

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

KATEDRA VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ A ENVIRONMENTÁLNÍHO
MODELOVÁNÍ

SROVNÁNÍ RŮZNÝCH ZDROJŮ DIGITÁLNÍCH MODELŮ
TERÉNU V PROSTŘEDÍ GIS PRO HYDROLOGICKÉ
MODELOVÁNÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vedoucí práce: Ing. Petr Bašta

Vypracoval: Bc. Hynek Klempíř

2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Hynek Klempíř

Voda v krajině

Název práce

Srovnání různých zdrojů digitálních modelů terénu v prostředí GIS pro hydrologické účely

Název anglicky

The comparison of digital terrain model sources in GIS for hydrological purposes

Cíle práce

Hlavním cílem práce bude vzájemné srovnání digitálních modelů terénu (DTM) vytvořených z různých zdrojů: ZABAGED, SRTM, Aster, LiDAR, DMR4G, DMR5G a vlastní měření pomocí RTK GPS.

Rozdíly mezi jednotlivými modely budou zhodnoceny na základě vybraných geomorfologických charakteristik terénu odvozených pro jednotlivé typy DTM.

Metodika

V rámci teoretické části práce autor popíše datové typy DTM (rastr, TIN, vrstevnice), možné způsoby získávání dat pro tvorbu DTM (GPS, laser-scan apod.), dnešní dostupné zdroje a typy DTM (ZABAGED, DMR, SRTM, Aster apod.), interpolační techniky k odvození rastrových DTM dostupné v ArcGIS (IDW, spline, kriging apod.), základní geomorfologické charakteristiky území (především sklonové poměry) a odtokové algoritmy (především D8 užívaný v ArcGIS).

V rámci metodické části budou popsány způsoby získání či odvození porovnávaných DTM a rovněž proces jejich porovnání. Dále bude popsána zájmová lokalita.

Kapitola s výsledky bude obsahovat vlastní srovnání DTM formou rastrové algebry a také pomocí geomorfologických charakteristik a drah povrchového odtoku odvozených z jednotlivých DTM. Rozdíly mezi analyzovanými DTM budou diskutovány.

Doporučený rozsah práce

standardní rozsah diplomové práce

Klíčová slova

digitální model terénu, interpolace, LiDAR, DMR, SRTM, Aster

Doporučené zdroje informací

- El-Sheimy, N., Valeo, C., Habib, A. (2005): Digital terrain modeling: acquisition, manipulation, and application. Artech House remote sensing library. Artech House, Inc., Canton Street, Norwood.
- Heritage, G. L., Milan, D. J., Large, Andrew R. L., Fuller, I. C. (2009): Influence of survey strategy and interpolation model on DEM quality. *Geomorphology* 112, s. 334–344.
- Chaplot, V., Darboux, F., Bourennane, H., Leguédois, S., Silvera, N., Phachomphon, K. (2006): Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density. *Geomorphology* 77, s. 126–141.
- Moore, I. D., Grayson, R. B., Ladson, A. R. (1991): Digital Elevation Modeling: A Review of Hydrological, Geomorphological, and Ecological Applications. *Hydrological Processes* 5, s. 3-30.
- Wilson, J. P., Gallant, J. C. (2000): *Terrain Analysis” Principles and Applications*. John Wiley and Sons., 479 s.

Předběžný termín obhajoby

2015/16 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Petr Bašta

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 29. 2. 2016

prof. Ing. Pavel Pech, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 7. 3. 2016

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 16. 04. 2016

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci zpracoval samostatně pod vedením Ing. Petra Bašty a pracoval pouze s literárními zdroji, jež jsou uvedené v seznamu literatury.

V Praze dne 12. 4. 2009

.....

Hynek Klempíř

Poděkování:

Na prvním místě bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Petru Baštovi, který mi poskytnul cenné rady, trpělivost a především čas, strávený při psaní této práce. V další řadě bych poděkoval své přítelkyni, rodině a přátelům za podporu a pochopení.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá srovnáním digitálních modelů terénu z různých zdrojů zpracovávaných v prostředí GIS pro hydrologické účely. Práce je složena z několika částí, které na sebe postupně navazují. Nejprve jsou popsány charakteristiky vztahující se k povodí a vodnímu toku, které jsou primárně důležité pro porozumění této práci. Dále je v práci detailně popsán digitální model terénu, jeho tvorba a způsoby získávání těchto digitálních modelů. Následně jsou zde popsány zdroje dat, ze kterých je možné digitální modely terénu získat. Další kapitola je věnována souřadnicovým systémům, jenž se vyskytují u digitálních modelů využívaných v této práci. Poslední část literární rešerše je věnována odtokovým algoritmům.

Vyšetřované charakteristiky zájmového území se získávaly na experimentálním povodí Modrava II pomocí softwaru ESRI ArcGIS Desktop a především extenzí Spatial Analyst a ArcHydro.

Z výsledků této práce lze usoudit, že bezplatný digitální model terénu SRTM 90 není vhodný pro malé územní celky s rozmanitou terénní strukturou. Je to z důvodu malého rozlišení modelu. Další modely terénu poskytované bezplatně, jsou dostačující, i pro tak malé oblasti jako zvolené zájmové území. Placené digitální modely lze všechny stanovit pro zájmové území za vhodné.

Klíčová slova: digitální model terénu, interpolace, LiDAR, DMR, SRTM, Aster

ABSTRACT

This thesis deals with comparison of digital terrain models from different sources processed in GIS for hydrological purposes. The diploma thesis is composed from several parts. First part consists of characteristics related to watershed and water flow, which are important for the understanding this work. The thesis also describes digital terrain model, its creation and methods for obtaining digital models. Then, there are described data sources from which is possible to gain digital models. Next chapter is dedicated to the coordinate system. The last parts of this thesis describes drain algorithms.

Characteristic of this area was collected on experimental watershed Modrava II with the ESRI ArcGIS Desktop software that would mainly Spatial Analyst and ArcHydro extensions.

The results of this diploma thesis can be concluded that the free digital terrain model SRTM 90 is not suitable for small regions with diverse terrain structure. The

reason is a small resolution model. Other terrain models provided free of charge are sufficient even for small areas as the selected area of interest. Paid digital models can all be established for the area of interest as appropriate.

Key word: digital terrain model, interpolation, LiDAR, DMR, SRTM, Aster

OBSAH

1. Úvod	11
2. Cíle práce	12
3. Literární rešerše.....	13
3.1. Charakteristiky povodí.....	13
3.1.1. Povodí.....	13
3.2. Geomorfologické charakteristiky	14
3.2.1. Výškové poměry povodí.....	14
3.2.2. Průměrná nadmořská výška.....	14
3.2.3. Sklonové poměry.....	14
3.3. Charakteristiky říční sítě	15
3.3.1. Povrchový odtok	15
3.3.2. Vodní tok	15
3.3.3. Délka toku	15
3.3.4. Průměrný sklon toku	15
3.3.5. Řádovost toku	15
3.3.6. Říční koryto	16
3.3.7. Trasa toku.....	16
3.4. Digitální model terénu.....	16
3.4.1. Dělení digitálního modelu terénu	17
3.4.2. Modely digitálních výškopisů	17
3.5. Tvorba DTM	18
3.5.1. Interpolační metody.....	19
3.6. Způsoby získávání DTM	21
3.6.1. Tachymetrie	22
3.6.2. Trigonometrické měření výšek.....	23
3.6.3. Nivelace.....	23
3.6.4. GNSS.....	24
3.6.5. Fotogrammetrie	26

3.6.6.	LiDAR	28
3.6.7.	RADAR	30
3.7.	Zdroje dat DTM.....	30
3.7.1.	SRTM	30
3.7.2.	ASTER GDEM	31
3.7.3.	ZABAGED	31
3.7.4.	DMR 4G	32
3.7.5.	DMR 5G	32
3.7.6.	DMP 1G	32
3.8.	Souřadnicové systémy	32
3.8.1.	WGS-84.....	32
3.8.2.	PZ-90.....	33
3.8.3.	GTRF	33
3.9.	Odtokové algoritmy.....	33
3.9.1.	Jednosměrný algoritmus SFD8.....	33
3.9.2.	Jednosměrný algoritmus Rho8.....	34
3.9.3.	Jednosměrný algoritmus Lea	34
3.9.4.	Jednosměrný algoritmus SFD ∞	34
3.9.5.	Vícesměrný algoritmus MFD8.....	34
3.9.6.	Vícesměrný algoritmus MFD ∞	34
3.9.7.	Vícesměrný algoritmus DEMON.....	35
4.	Zájmové území	36
4.1.	Popis oblasti Šumava	36
4.1.1.	Podnebí	36
4.1.2.	Geologie	36
4.1.3.	Geomorfologie	36
4.1.4.	Vegetace.....	36
4.2.	Popis zájmového území	37
5.	Metodika	39
5.1.	Popis dat	39
5.2.	Úprava dat	39
5.3.	Analýzy uskutečněné prostřednictvím ArchHydro.....	40

5.3.1.	Příprava DTM k porovnání	41
5.3.2.	Úprava DTM	41
5.3.3.	Vyhlazení bezodtokých oblastí.....	41
5.3.4.	Odtokové směry	41
5.3.5.	Akumulace vody	41
5.3.6.	Rastr vodních toků	41
5.4.	Analýzy uskutečněné nástroji ArcGIS	42
5.4.1.	Sklonitostní poměry	42
5.4.2.	Zonální algebra	42
5.4.3.	Cross validace	42
5.4.4.	Root mean square error	43
5.4.5.	Vykreslení rozvodnice	43
6.	Výsledky.....	44
6.1.	Výškové poměry	44
6.2.	Sklonitostní poměry	45
6.3.	Směr odtoku	46
6.4.	Akumulace vody	46
6.5.	Soustředěný povrchový odtok	46
6.6.	Rozvodnice	47
7.	Diskuze.....	48
8.	Závěr	51
9.	Použitá literatura	52
9.1.	Knižní zdroje	52
9.2.	Online zdroje	56
10.	Seznam příloh.....	58

1. ÚVOD

Diplomová práce se zabývá porovnáním digitálních modelů terénu z odlišných zdrojů dat a rozdílné kvality. Odlišnosti budou zjištěny pomocí hydrologických a geomorfologických charakteristik, jako jsou sklonové poměry, odtokové algoritmy, místa s akumulací vody a mnoho dalších. Digitální modely terénu použité v této práci jsou z placených, ale i bezplatných zdrojů. Modely terénu mají v hydrologii velké množství využití, pomocí nich lze určit směry odtoků, akumulaci vody v povodí a mnoho dalších charakteristik. Zájmovým územím bylo zvoleno experimentální povodí Modrava II na Šumavě, kde byly charakteristiky zjišťovány. Potřebné analýzy požadovaných charakteristik byly zjišťovány pomocí softwaru ArcGIS a jeho extenzí

V úvodu jsou nejprve postupně zmíněny charakteristiky povodí, říční sítě a především geomorfologické charakteristiky. Zařazení zmíněných charakteristik do této diplomové práce je nezbytné, protože jsou to právě ony, které jsou v zájmovém území vyšetřovány. Dříve docházelo k získání těchto charakteristik terénním měřením v místě dané lokality, či pomocí mapových podkladů a matematických výpočtů. V současnosti se dřívější metody využívají zřídka, protože technologický vývoj umožňuje nasnímat povrch Země a převést na digitální modely terénu. Modely se začaly hojně využívat na počátku 80. let minulého století, v této době vyšla první zpráva o digitálním modelu terénu. Od 80. let prodělaly modely řadu zdokonalení a dovolují získat potřebné údaje o území v kvalitnější a modernější formě. Dále zde musí být zmíněno, jak digitální modely získáváme a jak probíhá jeho samotná tvorba.

2. CÍLE PRÁCE

Cílem této diplomové práce je vzájemné porovnání digitálních modelů terénu (DTM). Digitální modely terénu byly vyhotoveny pro zájmové území a z rozdílných zdrojů dat: SRTM, ASTER, LiDAR, DMR 5G, DMR 4G, ZABAGED a také byl použit zdroj dat z vlastního zaměření zájmového území pomocí RTK GPS. Pro porovnání DTM byla zvolena referenční vrstva z laserového skenování terénu (LiDAR) pro jeho nejpřesnější rozlišení, s touto referenční vrstvou budou porovnány ostatní DTM.

Odlišnosti jednotlivých DTM budou vyhodnoceny a vyobrazeny pomocí zvolených geomorfologických charakteristik terénu aplikovaných na jednotlivé DTM.

3. LITERÁRNÍ REŠERŠE

Tato kapitola se zabývá vysvětlením veškerých pojmů, které jsou využívány při zhotovení této práce. Jsou zde popsány pojmy jako například: charakteristiky povodí, DTM, zdroje dat DTM, interpolační metody, odtokové algoritmy.

3.1. CHARAKTERISTIKY POVODÍ

V této části budou vysvětleny hlavní pojmy, objasňující problematiku týkající se zájmového území a současně celé práce. V zásadě nejdůležitější pojem, který se týká zkoumaného území, je povodí. Proto je naší prioritou vysvětlit si především význam a charakteristiky povodí.

3.1.1. POVODÍ

Samotné povodí můžeme definovat mnoha způsoby, pan Čermák (1970) popisuje povodí jako oblast ležící na povrchu Země, kam je sváděna veškerá voda z oblasti. Podstatnou součástí povodí je rozvodnice, která nám povodí obklopuje a uzavírá. Voda opouštějící tuto oblast musí protékat uzávěrovým profilem, který je také začátečním místem vynášení rozvodnice. Povodí je určeno orografickými poměry oblasti. Dle hydrologického pojetí je oblast uzavřená, jinými slovy do oblasti neproudí voda podzemní ani z povrchu. Povodí lze dělit na povodí vod podpovrchových, vymežující rozvodnice hydrogeologická a povrchových vod vymežující rozvodnice orografická (Čermák 1970).

3.1.1.1 Plocha povodí

Rozloha povodí se řadí mezi základní charakteristiky a obvykle je označována písmenem F. Norma vymezuje plochu povodí jako rozlohu půdorysného průmětu povodí na horizontální rovinu a jednotky jsou zpravidla kilometry čtvereční. Velikost je stanovuje polárním, či nitkovým planimetrem. S rozvojem technologií v současnosti využíváme k určení plochy digitální data (Hrádek et Kuřík 2008).

3.1.1.2 Tvar povodí

Přirozené povodí má obvykle tvar symetrického či asymetrického listu, podlouhlého nebo méně podlouhlého tvaru. Tvar povodí nám ovlivňuje vývoj průtoku při tání sněhové pokrývky, anebo po dopadu srážek na povrch. Pomocí rozvodnice zjistíme rozložení a celkový tvar. Směrová orientace rozvodnice je určena morfologií terénu, avšak je nutné, aby byla kolmá na jednotlivé vrstevnice,

vedena přes hřebeny, vrcholy a různé útvary topografie. Nejběžnější povodí je protáhlé ve své střední části (Čermák 1970).

3.2. GEOMORFOLOGICKÉ CHARAKTERISTIKY

Základní geomorfologické charakteristiky jsou především výškové a sklonové poměry, které jsou detailně níže popsány.

3.2.1. VÝŠKOVÉ POMĚRY POVODÍ

Hodnoty výšek povodí značíme v mapách vrstevnicemi, nejvýznamnější jsou místa s nejnižší a nejvyšší výškou, zejména na rozvodnici. Výškové poměry v povodí udává průměrná výška, která se určí střední výškou tělesa nacházející se nad oblastí povodí. Při použití podrobných map s velkou hustotou vrstevnic docílíme velmi přesného výsledku (Čermák 1970).

3.2.2. PRŮMĚRNÁ NADMOŘSKÁ VÝŠKA

V současné době určujeme průměrnou nadmořskou výšku pomocí rastrových analýz v prostředí GIS na základě digitálních dat.

Dříve se tato výška získávala z hypsometrické čáry. Tuto čáru zjistíme pomocí výškových kót vrstevnic, které nanese na osu pořadnic. Poté na osu nanese úsečky reprezentující plochy příslušných vrstevnic. Nakonec vzniklou plochu, ohraničenou hypsometrickou čarou společně s osami pořadnic doplníme na obdélník se shodnou základnou. Výška vytvořeného obdélníku nám vyjadřuje průměrnou výšku v povodí (Sommer 1973).

3.2.2.1 Hypsometrická křivka

Hypsometrická křivka vyjadřuje grafický vztah plochy povodí s nadmořskou výškou, jako podklad slouží vrstevnicová mapa (Čermák 1970).

3.2.3. SKLONOVÉ POMĚRY

Sklonitost, je vyjadřována nadmořskou výškou a expozicí svahů ovlivňují zvláště klimatické a meteorologické charakteristiky. Vrstevnicové mapy používáme jako podklad pro určení sklonových poměrů a také pro stanovení nejvýše položené plochy v povodí. Reálné spádové poměry zjistíme středním sklonem svahů, který je určen proložením sklonu náhradní roviny nejnižše položeným místem v povodí na rozvodnici (Pokorná et Záborská 2008). Další metodou na zjištění sklonových poměrů je využití digitálních dat, na které aplikujeme rastrové analýzy v prostředí GIS.

3.3. CHARAKTERISTIKY ŘÍČNÍ SÍTĚ

V našem zájmovém území se také vyskytuje vodoteč a je analyzován povrchový odtok. V následujícím textu je vysvětleno několik pojmů týkající se tohoto tématu.

3.3.1. POVRCHOVÝ ODTOK

Povrchový odtok definujeme jako veškerou vodu tekoucí po povrchu, nevsáklou a neodpařenou z půdy. Měrná zařízení, či bilanční rovnice nám určují velikost povrchového odtoku. Povrchový odtok můžeme členit na tři fáze odtoku. Z počátku proudí voda po povrchu minimální rychlostí, poté přechází do soustředěného odtoku nízké hloubky a nakonec vtéká do recipientu (Sommer 1973).

3.3.2. VODNÍ TOK

Proud vody tekoucí po povrchu Země, jež je prostorově vymezený dnem a břehy je chápán jako Vodní tok. Pramen vodního toku je místem vzniku, oproti tomu ústí toku je místem konce, anebo vtokem do toku s vyšším řádem, či vodní plochy (Pokorná et Zábranská 2008).

3.3.3. DÉLKA TOKU

Délku vodního toku popisujeme délkou střednice půdorysného tvaru koryta. Obvyklé jednotky jsou km a běžně se značí písmenem L. Samotné délky dosáhneme přerušением toku na menší celky. Tento postup je nazýván kilometráž, začátek měření probíhá od ústí toku a pokračuje směrem proti proudu toku až k prameni (Starý et kol. 1989).

3.3.4. PRŮMĚRNÝ SKLON TOKU

Tento sklon především využíváme k odhadu sklonu celé délky toku a nejčastěji se vyjadřuje v procentech či promilách. Velikost sklonu bude narůstat s výškovým rozdílem mezi pramenem a ústím, když bude shodná délka toku (Suda et Herber 2001).

3.3.5. ŘÁDOVOST TOKU

Řád toku přiřazuje pořadí vodním tokům, které jsou součástí soustavy říční sítě, určuje se na základě toho, kam vodní tok vtéká.

3.3.5.1 Absolutní řádovost

Graveliova klasifikace se řadí mezi nejnámější členění absolutní řádovosti toků, její vznik se datuje od roku 1914. Dle této klasifikace je tok ústící do moře

tokem I. řádu, toky II. řádu vtékají do toků I. řádu a s dalšími přítoky postup funguje na shodném principu. Tato klasifikace je užívána pro jednoduchost a přehlednost. Negativum může nastat, když dva toky odlišného charakteru jsou označeny za toky shodného řádu (Pavelková et al. 2009).

3.3.5.2 Relativní řádovost

Relativní řádovost pracuje dle Strahlerově klasifikace. Tato řádovost vznikla roku 1957 a využívá principu značení úseku vodního toku ohraničeného soutoky. Úseky od pramene jsou značeny jako toky I. řádu. V případě soutoku shodného řádu dvou úseků vznikne vyšší řád toku, na rozdíl od soutoku rozdílného řádu úseků, pokračuje úsek vyššího značení řádovosti (Pavelková et al. 2009).

3.3.6. ŘÍČNÍ KORYTO

Koryto toku si můžeme představit jako zářez do horniny vzniklé erozivní činností, jeho podobu určuje soudržnost půdy (Kemel 1996).

3.3.7. TRASA TOKU

Za podobu trasy vodního toku mohou geologické poměry, v žádném případě není napřímená, nejedná-li se ovšem o koryto umělé, nebo jinak stavebně upravené. Trasa toku se nepravidelně vlní po sobě jdoucími levostrannými a pravostrannými oblouky v krajině (Sommer 1973).

3.4. DIGITÁLNÍ MODEL TERÉNU

Digitální model terénu (DTM) z anglického překladu Digital terrain model (DTM) není lehce srozumitelný, jak se jeví na první dojem. Termín samostatného terénu, bývá chápán jako vše, co je zaznamenáno v topografických mapách, např: vodstvo, povrch země, hranice kultur. Pod pojmem digitální model, může být představen program, určený k řešení různorodých terénních úkolů (Urban 1991). Digitální modely terénu byly představeny v 50. letech a posléze využívány k prezentaci skutečného povrchu Země zbaveného veškerých objektů, které mohou být pozorovány. DTM je k následujícímu zpracování využíván v digitální formě, kde je efektivněji a jednodušeji zpracován prostřednictvím informačních technologií. Skutečný povrch Země je nekonečně rozmanitý a komplikovaný, proto DTM zachycuje povrch ve stanovené přesnosti a podrobnosti (Oršulák 2010).

DTM je formován za obtížného procesu odhadu hodnot sledované veličiny v odhadovaném bodě ze zjištěných hodnot vzorových bodů, které jsou umístěny v upřesněném prostředí odhadovaného bodu. Výše popsaná technika se nazývá

interpolace (El-Shiemy et al, 2005). V podstatě je DTM 3D digitální prezentací povrchu terénu, avšak v některých situacích může být tento termín zaměnitelný s digitálním výškovým modelem (DEM) z anglického digital elevation model. Odlišnost těchto dvou digitálních modelů je, že DTM může obsahovat některé jiné odlišné topografické funkce (Pfeifer et Mandlburg 2008).

DTM je jedním z nekritičtějších produktů topografie, to hraje podstatnou roli v oblastech jako je mapování, stavebnictví, hydrologie, hydrogeografie, přírodní zdroje, řízení a zvládání katastrof. Jeho rozsáhlé aplikace se pohybují směrem od tradičního použití k modernějším a v současné době více inovativnímu využití, jako měření hloubky a hustoty lesa, mapování povodňových oblastí, laviny a sesuvy půdy, mapování trasy (Toutin 2008, Pike 1988). DTM má širokou paletu využití v inženýrství a geovědách, jeho aplikace jsou v současné době považovány za normu geografických informačních systémů (GIS) (Li et al. 2005).

3.4.1. DĚLENÍ DIGITÁLNÍHO MODELU TERÉNU

DTM lze dělit mnoha způsoby, zde popsané rozdělení nám znázorňuje rozklad na digitální výškový model a model povrchu.

3.4.1.1 Digitální výškový model

Jednou z možných variant dělení digitálního modelu terénu je digitální výškový model (anglicky digital elevation model, DEM). DEM je představován ve formě rastru, každá buňka zahrnuje informace o nadmořské výšce s pevně určenou hustotou bodů (Moore et al. 1991).

3.4.1.2 Digitální model povrchu

Digitální model povrchu se označuje DSM (anglicky digital surface model). Od DTM se tento model odlišuje vyobrazením veškerých objektů nalézajících se na zemském povrchu. Slouží jako materiál ke tvorbě DTM. DSM vzniká hlavně za užití automatizovaného sběru dat, prostřednictvím obrazové korelace při fotogrametrii, dálkovém průzkumu Země, radarovém měření či laserovém skenování. Výše popsané metody slouží ke zpracování dat, ze kterých vznikne digitální forma modelu povrchu. V počáteční formě se dá DSM bezpečně využívat při vizualizaci a modelování krajiny s vegetačním krytem, městské celky a rovněž při vyobrazení tratí vysokého napětí (Oršulák 2010).

3.4.2. MODELY DIGITÁLNÍCH VÝŠKOPISŮ

Výškopisný model digitálního charakteru se rozděluje na tři hlavní typy, podle druhu vstupních údajů.

3.4.2.1 Vrstevnice

Charakteristické vyobrazení nadmořské výšky provádíme právě pomocí vrstevnic. Vrstevnice ztvárňují reliéf nesouvisle z důvodu zobrazení pouze zvolené nadmořské výšky pro předem stanovený interval. K liniovému zobrazení náleží též soustava údolnic a hřbetnic společně s vertikálními profily. Prostřednictvím programu GIS vytváříme ze sítě vrstevnic výškopisné modely.

3.4.2.2 GRID

Toto ztvárnění reliéfu reprezentuje pravidelná struktura ve formě rastru. Nejběžnější tvar buněk rastru pro tento povrch je čtvercový, může být ale také trojúhelníkový či hexagonální. Nadmořská výška je přiřazena k jednotlivé buňce rastru, přesněji k jejímu středu, popřípadě k uzlu rastru. Tento typ reliéfu je souvislý, vhodný k aplikování statickému rozboru mapové algebry. U tohoto typu reprezentace terénu vzniká nadhodnocení nebo podhodnocení při výrazné různorodé členitosti terénu (Voženílek 2001).

3.4.2.3 TIN

TIN je posledním typem zobrazení reliéfu. Zkratka TIN znamená Triangulated Irregular Network, v překladu poté Trojúhelníková nepravidelná síť. Již z popisu je patrné, že vyobrazení povrchu Země bude sítí trojúhelníkového tvaru. Tvorba trojúhelníkové sítě se nazývá triangulace, při které tvoříme trojúhelníky pravidelné a příhodného tvaru. Vzniklá trojúhelníková síť má za úkol kopírovat co možná nejpřesněji povrch Země. Terén je zde zobrazen počtem bodů dle členitosti. Při členitějším reliéfu je tedy nutné pracovat s více body, přičemž jednotlivé trojúhelníky budou menší a dojde k co největšímu kopírování reliéfu. TIN má i určité nedokonalosti ve vyobrazení reliéfu u nekonvexních míst, kde nelze provést triangulaci, tato místa jsou vodní toky. Terén s velkou členitostí obsahuje více bodů, čímž vzniká hustší trojúhelníková síť. Terén s rovinnými oblastmi či neměnným sklonem má méně bodů, vznikají větší trojúhelníky (Voženílek 2001, Vaníček 2009).

3.5. TVORBA DTM

Digitální model terénu se dříve tvořil pomocí přímého zeměměřičství. Později byly tyto metody nahrazeny analytickou fotogrammetrií, která vyžaduje snímání povrchu a následné prostorové transformace pro DTM. V posledních desetiletích s příchodem vysokého rozlišení a automatického dálkového průzkumu Země se začaly používat metody jako Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) a Light Detection and Ranging (LiDAR) (Briese 2010).

Data pro tvorbu DTM získané prostřednictvím automatického dálkového průzkumu Země zčásti zastoupí lidskou interpolaci. Dle Briese (2010) je tato fáze obvykle rozdělena na klasifikaci a interpolaci. V klasifikační části jsou extrahovány informace o holé zemi (nadmořská výška, intenzity) z naměřených dat, které automaticky rozdělují získaná data z terénu a do terénu. Ve společenství leteckého laserového skenování je tento proces znám také jako filtrování. Poté mohou být DTM tvořeny pomocí interpolací dat extrahovaných z terénu (Briese 2010).

3.5.1. INTERPOLAČNÍ METODY

Interpolační metody bodových dat nám pomáhají určit neznámé hodnoty jevu pomocí známých bodů, dále si přiblížíme základní metody.

3.5.1.1 IDW

Inverse Distance Weighting je metoda použitelná pro dostatečně hustý soubor bodů vyobrazující rozsah území a povrchovou členitost, nezbytnou pro analýzu (Childs 2004). Tato metoda je zařazena do deterministických interpolačních metod a používá přesná data pro tvorbu terénu (Philip et Watson 1982). Hodnoty nezjištěných bodů se zjišťují pomocí známých bodů. Prostorově bližší body si jsou vzájemně více podobné, oproti bodům prostorově vzdálenějším. Velká hustota bodů v údolích nebo u vrcholů má za důsledek zploštění jejich tvaru a tím způsobené zkreslení výsledku (Johnston et al. 2001). IDW metoda je jednodušší technikou interpolace, protože nevyžaduje přípravné modelování jako u metody kriging (Tomczak 1998).

3.5.1.2 SPLINE

Metoda spline, známá také jako radial basis function (RBFs) patří do souboru deterministických interpolačních technik. Snaží se zajistit, aby vytvořený povrch vedl skrze vstupní body a docílit tak co nejvíce hladkého povrchu. Údolí a hřebeny je touto metodou možno předpovědět z pořízených dat a je to nejvhodnější technika pro vytvoření povrchu plynule se měnícího (Childs 2004).

Metoda Spline se využívá pro tvorbu povrchu z velkého množství vstupních bodů, nejlépe reprezentuje svažité plochy jako mořské dno a nadmořské výšky. Naopak není metoda vhodná pro tvorbu povrchu z dat, které mají rychlé přechody povrchových hodnot (Collins et Fred 1995).

Tato technika je značně účinná pro tvorbu povrchu, kde jsou body pravidelně rozděleny. Spline oproti IDW technice dokáže odhadnout hodnoty povrchu nad nejvyšší a pod nejnižší hodnotou bodu, pomocí sousedního bodu (Johnston et al. 2001).

3.5.1.3 KRIGING

Prostorovou korelaci mezi sousedními dvěma body vyjadřujeme pomocí semivariogramu. Kriging se především využívá pro tvorbu co nejpřesnějšího povrchu, takový povrch není v žádném případě vyhlazený (Lam 1983).

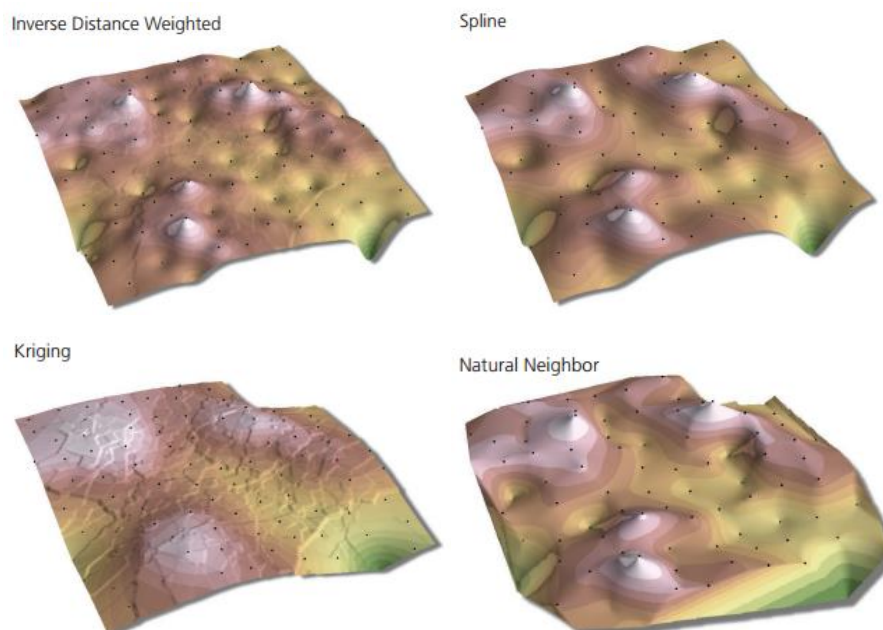
Principem metody je autokorelace jevů, prostorová závislost. Blízko sebe umístěné body, si jsou navzájem více podobné, než body umístěné dále od sebe. S nárůstem vzdálenosti mezi body klesá jejich podobnost. Tato metoda je podobná technice IDW, protože na zjištění výšky hledaného bodu se podílejí sousední známé body takovou mírou, kterou těmto bodům přiděluje příslušná váha (Royel et al. 1981, Oliver 1990).

3.5.1.4 NATURAL NEIGHBOR

Interpolační technika natural neighbor patří mezi deterministické funkce a má hodně pozitivních vlastností. Metoda všeobecně dobře pracuje clusterovým rozptylem bodů. Tato metoda používá váženého aritmetického průměru. Základní rovnice použitá v interpolaci natural neighbor je totožná s rovnicí využívaná pro IDW metodu. Touto technikou můžeme efektivně zpracovat velké množství vstupních bodů (Childs 2004).

3.5.1.5 CROSS VALIDATION

Cross validace (anglicky cross validation) je jednou z nejpoužívanějších technik pro stanovení prostorové přesnosti interpolace. Technika cross validation je prostředek pro posouzení statického odhadu a předpovídání hodnot interpolované veličiny v neznámých bodech. Při procesu interpolace výsledného povrchu pracuje metoda na principu vynechání naměřeného bodu a odhadnutí jeho hodnoty pomocí okolních zbývajících bodů. Tento postup se opakuje pro všechny neměřené body. Poté srovnává odhadnutou a naměřenou hodnotu bodu. Cross validation je vhodná pro použití u bodů náhodně uspořádaných a u sítě obsahující malé množství bodů umístěných daleko od sebe (Cressie 1993, Johnston et al. 2001).



Obr.1: Vizualizace základních interpolačních metod (Childs 2004)

3.6. ZPŮSOBY ZÍSKÁVÁNÍ DTM

Digitální ztvárnění výškopisné součásti velkoformátových map staví na principu, že veškeré výškové informace o terénu, které jsou stanovené fotogrammetrii, geodetickým měřením eventuálně kartometrickými metodami, musí být v digitální formě pro možnost dalšího zpracování. Organizování, vyjádření a ukládání výškopisných dat, musí být uspořádáno k přímému využití počítačem k řešení nejrůznějších aplikačních úkolů. Digitální znázornění výškopisu ukazuje uživateli, pomocí vrstevnic průběh terénu (Podhorský 1980, Podhorský 1985).

U terénních ploch s různorodým typem krytí, se mohou pro měření použít odlišné techniky k získání dat. K výběru nejvhodnější techniky pro příslušné území, musíme zvolit kompromis mezi náklady a přesností měření. Náklady při výběru DTM se mohou navyšovat s vyšší přesností, lepším rozlišením a početností výškových bodů (Zhang et al. 2004).

- **Pozemní měření**

- Geodetické měření (nivelace, tachymetrie)
 - Globální navigační satelitní systém (GPS)

- ***Dálkový průzkum Země (DPZ)***

Fotogrametrie

Radarové snímání (RADAR)

Laserové snímání (LiDAR)

- ***Existující analogová a digitální data***

ZABAGED

ASTER

SRTM

(Klimánek 2006)

3.6.1. TACHYMETRIE

Postup měření pomocí tachymetrie je popsán mnoha autory (např. Doušek, Maršík a Maršíková), avšak jejich popis je velice obdobný. Pomocí tachymetrie dosáhneme zaměření jak výškopisných tak polohopisných dat při jednotném měření. Pozice jednotlivých bodů stanovujeme prostřednictvím polárních souřadnic vztahených k pólu, neboli ke stanovisku. Zmíněné polární souřadnice definujeme jako horizontální vzdálenost ze stanoviska k podrobnému bodu společně s horizontálním úhlem měřeného od vybraného směru. Změřením výškového úhlu a vzdálenosti dostaneme podrobný bod, přesněji jeho výškové údaje (Maršík et Maršíková 2002).

Doušek popisuje tachymetrii jako techniku zaměřování krajinného reliéfu povrchu. Tachymetrie se využívá při společném zaměření výškopisu s polohopisem, eventuálně k zaměření výškopisu do polohopisného základu. Výchozí idea tachymetrie má základ v jednotném zaměření výšky i polohy bodů na zemském povrchu. Body jsou stanoveny polárními souřadnicemi. Výškopis bodů běžně stanovujeme s použitím trigonometrie (Doušek 1998).

V současné době jsou k měření využívány elektronické tachymetry (totální stanice) usnadňující práci díky automatizaci výpočetních, měřických postupů. Hlavní výhoda automatizace spočívá v grafickém vyhotovení konečné mapy či plánu. Značná relativní přesnost elektronického tachymetru přispívá k preciznímu stanovení výšky a polohy bodu. Chyba tohoto měření je obvykle několik centimetrů. Než došlo k výrobě elektronických tachymetrů, byla po mnoho desetiletí velmi rozšířena nitková tachymetrie. Při měření touto metodou byly využívány obyčejné teodolity. Diagramové nebo nitkové dálkoměry přispívaly k zaměření délek. Přesnost měření délek, které bylo obvykle v rozmezí dva až tři decimetrů na jedno sto metrů, je však velké nevýhoda (Nevodás et Vitásek 2000).

3.6.2. TRIGONOMETRICKÉ MĚŘENÍ VÝŠEK

Trigonometrie využívá pro zaměření výšek bodů jejich rozdíl, stanovený prostřednictvím známé horizontální eventuálně šikmé délky s a známého zenitového úhlu ε . Výškového rozdílu bodů dosáhneme užitím vzorce:

$$h = s \cotg \varepsilon$$

h výškový rozdíl bodů neboli převýšení

s horizontální vzdálenost

ε zenitový úhel

Elektronické tachymetry mají výhodu v přímém určení převýšení. Pro přesnost tohoto měření je důležitá horizontální vzdálenost a zenitový úhel. S rostoucí horizontální vzdáleností musí být zároveň přesnější zenitový úhel. Výslednou přesnost převýšení ovlivňuje zakřivené povrchu Země nad horizontální délku 300 metrů. Nadmořská výška stanoviska je nezbytná k výpočtu nadmořské výšky bodu. Na zvoleném stanovisku přístroje určíme výšku přístroje, výšku cíle, vzdálenost mezi stanoviskem a bodem, poté zenitový úhel. Následně dosadíme do vzorce (Nevosád et Vitásek 2000):

$$H = H_s + h + v_p - v_c$$

H výška bodu

H_s výška stanoviska

h převýšení

v_p výška stroje

v_c výška cíle

3.6.3. NIVELACE

Jedná se o nejstarší techniku měření výšek. Základ metody závisí na rozdílu výšek dvou bodů. Rozdíl výšek dvojice bodů A , B stanovíme ze svislé vzdálenosti l_A , l_B od určené horizontální vzdálenosti. Velikost vzdáleností l_A , l_B určíme pomocí nivelační latě. Rozdíl výšek vypočítáme dle vzorce níže: (Blažek et Skořepa 2004).

$$\Delta H_{AB} = l_A - l_B$$

Rozdíl výšek dvojice bodů je možno nivelací stanovit dvěma výchozími metodami.

3.6.3.1 Metoda kupředu

Nivelační stroj umístíme a přichystáme na bodě A, zatímco nivelační lať umístíme na bod B. Důležité je změřit výšku přístroje, poté se odečte na lati vzdálenost IB. Když zaměřujeme vzdálenější body, nebo při terénních překážkách, musíme vzdálenost rozčlenit na více úseků. Tato metoda není moc využívána, je pracná a méně přesná.

3.6.3.2 Metoda ze středu

Nivelační stroj umístíme přibližně na střed spojnice mezi body A,B. Nivelační lať umístíme na dvojici bodů A,B a provedeme čtení vzad Az a vpřed Bp. Umístění dvojice latí a stroje utváří nivelační sestavu (40 – 100m). Větší vzdálenosti mezi body A,B nás nutí přidat pomocné mezi body (Vinkler 1987).

- **Technická nivelace**

Nejvyužívanější druh nivelace, použití na obvyklé technické práce.

- **Přesná nivelace**

využití pro stanovení nadmořské výšky, pro měření kde je potřeba větší přesnost, práce náležející pod inženýrskou geodézií.

- **Velmi přesná nivelace**

Využívá se na měření v základním výškovém poli, nivelační sítě prvního a druhého řádu.

- **Zvlášť přesná nivelace**

Využití u speciálních prací kde je vyžadována velká přesnost. Slouží k určení výšek indikačních bodů (VIB) (Nevosád et Vitásek 2000).

3.6.4. GNSS

Označení GNSS znamená Global Navigation Satellite System, v českém překladu znamená Globální navigační satelitní systém. Vznik systémů tohoto typu sahá do 70. let minulého století. V tom čase jsou konstruovány 2 systémy moderní generace určování polohy. Ve Spojených státech amerických, byl budován systém GPS NAVSTAR. SSSR nezůstal pozadu a vyvíjel projekt s názvem GLONASS. V současné době se buduje evropský systém GALILEO, který by měl být dokončen během několika let. Plný provoz se plánuje na 2019/2020 (Klimánek 2006).

GPS fungují obdobně jako GNSS, avšak GNSS přenáší nepřetržitě radiové signály skrz umělé družice obíhající kolem Země, které přijímají pozemní stanoviště (Maršíková et Maršík 2005).

3.6.4.1 GPS systém

Označení GPS znamená Global Positioning System, v překladu pak značí globální polohový systém, či globální poziční systém (Maršíková et Maršík 2007). Je charakterizován jako pasivní satelitní navigační systém sloužící ke zjištění polohy, času a rychlosti (Hánek et Maršíková 2008). U metody GPS slouží družicový vysílač pro přenos signálu k přijímací anténě. Čas potřebný k přenosu musíme skrze rychlost šíření signálu převést na vzdálenost (Švábenský et kol. 1995). Uživatel vlastní potřebné vybavení je schopen pomocí GPS zjistit velice přesnou třírozměrnou pozici, společně s rychlostí pohybu a signálového času (Rapant 2002).

GPS metody jsou vůči tradičním geodetickým metodám velice účinné a úsporné. Jednotlivé body nemusí být s použitím GPS metod vzájemně viditelné (nevyhnutelné při délkovém a úhlovém měření). Samotné měření může probíhat v jakoukoli denní dobu a není závislé na počasí. Technologie GPS jsou hojně užívány při tvorbě geodetických podkladů, na vytyčovací práce, ke spravování a aktualizování geodetických sítí, využitelné pro inženýrskou geodézii, při tvorbě specifických inženýrských sítí, nebo hraničních prací a v současné době se také aplikují v katastrálních měřeních. Také systémy GPS upotřebíme při fotogrametrii a mapování. GPS má zobrazovací souřadnicovým systémem WGS 84 (Švábenský et al. 1995).

- **NAVSTAR GPS**

Rozsáhlý satelitní systém tvořen 24 družicemi byl schválen roku 1973, první z družic byla vypuštěna roku 1978 a poslední z nich roku 1994. Systém se stal přístupným i pro civilní sektor roku 2000, kdy došlo ke zrušení záměrného zneřádnění signálu. Označení NAVSTAR je zkratkou Navigation Signal Timing and Ranging. Tento systém nahradil starší systém Transit. Naklonění drah bylo zvoleno na hodnotu 55° , šest oběžných drah a na každé z nich čtyři družice. Navstar využívá souřadnicový systém WGS 84 (Howelle 2013).

- **GLONASS**

GPS technologie GLONASS (Globalnaja Navigacionaja sutnikovaja sistema) dovoluje stanovit čas, polohu a rychlost třírozměrné dimenze na všech místech na Zemi. Systém je pod správou ruského vesmírného programu a je rozdělen na 3 úseky: kosmický, uživatelský a řídicí (Rapant 2002).

Tento systém byl zkonstruován analogicky jako GPS Navstar. Podává údaje polohy a času kdekoli na Zemi 24 hodin denně (Hánek et Maršíková 2008). Družice systému GLONASS operují s kmitočtovým dělením, což je stěžejní rozdíl oproti NAVSTAR GPS (Hrdina et kol. 1995). Naklonění drah bylo ustáleno na hodnotu

64°. Systém tvoří tři oběžné dráhy s osmi družicemi na každou z nich. Toto uspořádání nám umožňuje zahlédnout minimálně šest družic z jakéhokoli místa na povrchu Země (Rapant 2002).

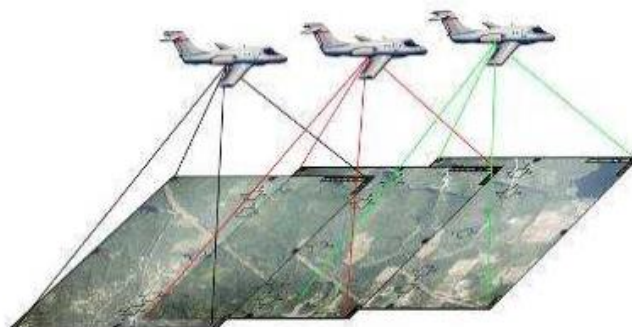
- **GALILEO**

Navigační systém Galileo, projektovaný celosvětový družicový polohový systém, podobný americkému NAVSTAR GPS a ruskému GLONASS. Evropská komise zaštiťuje celou výstavbu. Systém GALILEO je prvotně budován jako projekt, který bude obsluhován a spravován civilním orgánem, oproti NAVSTAR GPS a GLONASS. Systém bude tvořen 30 družicemi, z toho jsou 3 družice navrhovány jako záložní. Družice jsou navrženy na obíhání po třech osách. Vyšší množství satelitů zabezpečí bezpečnou funkci celého systému. Bude spolupracovat se souřadnicovým systémem GTRF (czechspaceportal.cz).

3.6.5. FOTOGRAMMETRIE

Samotná fotogrammetrie náleží pod odvětví kartografie či geodézie. Fotogrammetrická metoda se začala využívat zhruba před 150 lety a lze ji zařadit mezi bezkontaktní metody zjišťování výškopisu. Počátkem 20. století se tato metoda začala více využívat pro měření výškopisu a to díky rozmachu stereoskopie a letecké fotogrammetrie. Před 50 lety se data z fotogrammetrie vyhodnocovala pomocí komplikovaných analogových strojů. Postupem času tyto stroje vystřídali stroje analytické. V dnešní době jsou využívány stroje digitální. Nepřetržitý vývoj techniky dovolil vesmírné snímkování. Nastal zrod družicové fotogrammetrii (Pavelka 1998).

Přesnost této metody závisí na vzdálenosti. Větší vzdálenost pozorovaných objektů znamená nižší přesnost výsledků. Díky této metodě lze data o sledovaných objektech získat během okamžiku, avšak zpracování těchto dat musí být uskutečněno v kanceláři, z tohoto důvodu na výsledky čekáme delší dobu (Švábenský 2007).



Obr.2: Letecká fotogrammetrie (Oršulák et Pacina 2012)

3.6.5.1 Dělení fotogrammetrie

Dělit fotogrammetrii je možno dle mnoha hledisek, níže je popsáno rozdělení do čtyř základních kategorií.

- ***Dle postavení stanoviška***

Letecká – Stanoviško při této metodě je instalováno na letadle či dalším létajícím prostředku. Snímek zaznamená větší územní celek oproti fotogrammetrii pozemní. Snímky jsou získávány zhruba kolmo k zemi, vzdálenost zdroje fotografování a snímaného objektu je skoro stejná, z toho vyplývá, že je přibližně obdobná i přesnost.

Pozemní – Tento druh fotogrammetrie využívá statického stanoviště. Snímky získané touto metodou jsou jednodušší na zpracování, avšak nedostatek je, že objekty měření mohou být navzájem cloněny a fotografie zahrnuje nevyhodnotitelné celky.

Družicová – Tato metoda je obdobná jako letecká fotogrammetrie. Rozdíl je v umístění snímače, který je usazen na družici. Samozřejmě zaznamenává ještě větší celky než letecká metoda.

- ***Dle množství a sestavy snímků***

Jednosnímkové – Touto metodou lze měřit výhradně rovinné souřadnice a používá jednotlivé snímky. Využití je u rovinných nebo skoro rovinných měření. Metoda se využívá jak při pozemní, tak při letecké metodě. Tato metoda dokáže stanovit jen 2D souřadnice.

Vícesnímkové – Fotogrammetrie vícesnímková využívá pro získání 3D souřadnice a překrývající se fotografie. Objekt měření je nutné zaznamenat na oba snímky, přičemž pak je možné pomocí výpočtu zjistit 3D pozici. Pro zjištění 3D modelu využíváme tzv. stereofotogrammetrii.

- ***Dle technologie a metody zpracování***

Analogové – Vyhodnocení probíhalo na starých, komplikovaných analogových stojích.

Analytické – Pomocí prostorové transformace se upravuje snímek do geodetického systému, operaci provádí počítač.

Digitální – Prostorová transformace pro převod na geodetický systém se využívá i zde, prostřednictvím počítače.

- ***Dle typu výstupu***

Numerické – Souřadnice vyhodnocovaných bodů se automaticky zapisují do počítače. Výsledky mohou být ve formě rastru nebo vektorů.

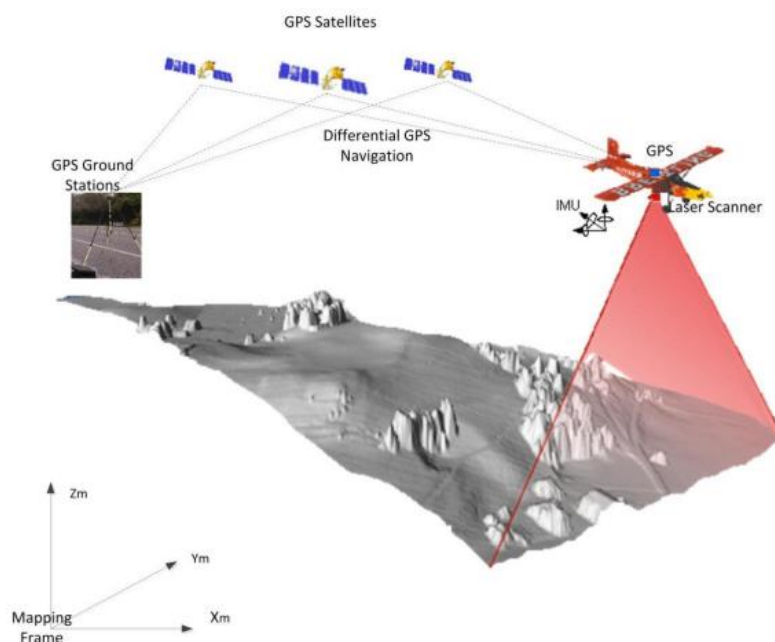
Grafické – Výsledek grafické metody se provádí na rýsovacím stole, který je propojen se strojem na vyhodnocování. Při této metodě se tvoří kartografický originál, avšak výsledek je v současnosti skoro nepoužitelný, z důvodu nemožnosti editování výpočetní technikou (Pavelka 1998, Šmidrkal 1991).

3.6.6. LiDAR

Technologie LiDAR v celém znění Light Detection and Ranging je známá také jako Laser Altimetry, Laser Ranging, Laser Scanning, souhrnný překlad pro tyto názvy je laserové skenování terénu Země (Jiang et al. 2005). LiDAR využívá vzdálený způsob snímání využitím světelného toku ve formě pulzního laseru měřící vzdálenost k Zemi. Světelné pulzy dohromady s dalšími informacemi registruje palubní systém, který tvaruje trojrozměrné údaje tvaru povrchu Země (Lemmens 2011, Shan et Toth 2008). LiDAR se stal velice zavedenou metodou sbírání husté sítě výškopisných údajů krajiny a je také využitelná u mělkých vod. Tato aktivní metoda průzkumu Země je obdobná radaru, avšak využívá laserové světelné pulzy oproti radiovým vlnám. Metoda obvykle shromažďuje údaje pomocí letadla, se kterým může posbírat velké množství bodů rozlehlých ploch. LiDAR lze také využívat na pozemní bázi, jako mobilní či stacionární (Carter et al. 2012). Tato technologie získává data ve velmi vysokém rozlišení za krátký časový úsek, netvoří spojitý obraz dat, tvoří bodovou síť a tím se liší od radarových metod. Pomocí shromážděných dat můžeme vymodelovat 3D reprezentaci území. Samotné měření je do velké míry automatizované. Měření laserem nepodléhá denní době.

LiDAR je zkonstruován z několika součástí. Nejdůležitějšími součástmi pro fungování přístroje jsou zdroj pro laserové záření, optický systém, indikátor elektromagnetického záření a co nejpřesnější hodiny. Při leteckém použití je stroj vybaven systémem GPS a také je nezbytný silný zdroj záření, jelikož účinnost slábne s druhou mocninou délky, kterou paprsek zdolá od zdroje přes překážku a opět ke zdroji (Dolanský 2004, Baltsavias 1998).

Pomocí LiDAR technologie můžeme zkoumat změny topografie zemského terénu. Tuto problematiku popisuje pan Rou-Fei Chen (2006), v období kdy byl nasnímán povrch Země před, během a po ukončení zemětřesení v Tchajwanu (Chen et al. 2006).



Obr.3: Letecké laserové skenování terénu (Guann et Chapman 2011)

3.6.6.1 Platformy LiDARu

Rozdílné platformy rozdělují LiDAR do třech skupin, pozemní systém (TLS), letecký systém (ALS) a mobilní (MLS) (LIU 2008).

- **Pozemní LiDAR**

Nejprve byl LiDAR vyvinut jako stacionární nástroj pro studium atmosféry. LiDARové snímače byly také pevně namontované ke stativům a sloužily pro skenování určitého cíle například: budovy a mosty. Tyto statické systémy produkují data bodového charakteru s centimetrovou odchylkou. Jsou také využívány pro terénní mapové aplikace určitého místa vyžadujícího časté prozkoumání.

- **Letecký LiDAR**

Letecké topografické LiDARové systémy jsou nejobvyklejší systémy tohoto typu, využívané pro vytváření digitálního výškového modelu rozlehlých území.

- **Mobilní LiDAR**

Mobilní platformy mohou být umístěné na silničním, ale také na vodním dopravním prostředku. Data z mobilních platforem jsou velice přesná, a ve velké míře využívána k mapování diskrétních zón jako silnice, přístavy, železnice, letiště, průmyslové zóny (Vosselman et Mass 2010, Shan et Toth 2008).

3.6.7. RADAR

Radio Detection and Ranging je aktivní zařízení vysílající záření, které poté opět přijímá v deformovaném tvaru od ozářených objektů. Zobrazující radar dokáže přetvořit vzdálenosti na obrazovou formu (Pavelka 1999). Vlny rádiového charakteru bývají částí elektromagnetického spektra, vlny tohoto spektra mají délky vln výrazně delší než viditelné světlo (Polidori 1991). Polarizace a vlnová délka záření jsou hlavní charakteristiky radarových zařízení. Vlnová délka nám vyjadřuje prostupnost radarového záření prostředím. Obecně platí tvrzení že, radarové záření prochází prostředím s menšími částicemi (Pavelka 1999).

Radarové systémy můžeme rozdělit na dva druhy, monostatické a bistatické. Monostatický radar má vysílač a přijímač na totožném místě, oproti bistatickému radaru, které má vysílač a přijímač dál od sebe, avšak zohledňuje vlnovou délku použitého radaru (Richards 2014).

SAR je zkratka pro Synthetic Aperture Radar, pomocí tohoto systému se vytváří obraz vysokého rozlišení zájmového území. SAR je schopen sledovat zájmové území ve dne, ale i během noci. Pro vytvoření obrazu SAR se používá vysílání radarového signálu k zemskému povrchu. Vyslaný signál se odrazí od povrchu terénu a je přijat zpět stejnou anténou. Zařízení SAR je nejčastěji připevněno k satelitní platformě. Důležité je tzv. post-zpracování obrazu, jinak řečeno zaostření umožňující SAR technologii tvořit prostorové rozlišení méně než jeden metr (Pavelka 1999).

Technika interferometrie SAR (InSAR) používá obrazy SAR pro tvorbu topografické mapy a mapy pohybu zemského povrchu. Princip spočívá v pořízení dvou snímků shodného území a porovnání rozdílů naměřených vzdáleností ve fázi vln, které se vracejí zpět na družici. Tato metoda se využívá pro tvorbu digitálního výškového modelu (DEM) z pozorovaného území. Dvojice snímků SAR je zhotovena v nejkratší době po sobě, snažíme se minimalizovat časovou dekorelaci. InSAR metoda je využívána pro DEM v odlehlých oblastech (Urdirroz et al. 2012).

3.7. ZDROJE DAT DTM

V této podkapitole budou přiblíženy jednotlivé zdroje dat digitálních modelů terénu.

3.7.1. SRTM

SRTM DEM je zkratka pro digitální model terénu zhotovený během amerického výzkumného programu organizovaného americkými agenturami NGA a NASA. Do projektu přispěly kosmické agentury z Itálie a Německa. Hlavní cíl

mise bylo pořízení přesné topografické mapy vysokého rozlišení. Mise odstartovala v únoru 2000 vypuštěním raketoplánu Endeavour, který nesl radarové snímací zařízení. Raketoplán nasnímal radarová data celého povrchu Země během 11 dní (nasa.gov). SRTM DEM je zobrazen pomocí souřadnicového systému WGS-84. V současné době je již SRTM dostupný pro celý svět v prostorovém rozlišení 1 úhlové vteřiny, na rovníku přibližně 30m a také ve starší formě v prostorovém rozlišení 3 úhlové vteřiny, na rovníku přibližně 90m (gissat 2016).

3.7.2. ASTER GDEM

Digitální model terénu ASTER GDEM vznikl v kooperaci NASA a japonského ministerstva obchodu, průmyslu a hospodářství (METI) (nasa.gov). Roku 1999 byla vypuštěna družice Terra, jenž nesla barevný multispektrální skener (Advanced Spaceborne thermal Emission and Reflection Radiometer), podle kterého nese tento produkt název. ASTER snímá data ve 14 spektrálních pásmech, počínaje viditelným až po záření infračervené. V nedalekém infračerveném pásmu můžeme pořizovat data ve směru šikmo dozadu. Pro jedno území lze nasnímat dvojice stereoskopických snímků, které mají prostorové rozlišení 15m. Stereoskopické dvojice můžeme využít k prostorové vizualizaci zkoumané oblasti a pro určení výškových poměrů. Hotový produkt má rastrovou podobu. V tomto rastru je hodnota pixelu rovna nadmořské výšce v metrech. Rozlišení ASTER GDEM je 1 úhlová vteřina, to odpovídá 30m na rovníku a je zobrazen v souřadnicovém systému WGS-84 (ČÚZK 2016, gissat 2016).

3.7.3. ZABAGED

Digitální topografický model ČR ZABAGED (Základní Báze Geografických Dat) je částí informačního systému geodézie a je vytvořený pouze pro naše území. V roce 1995 započala tvorba ZABAGED vektorizací základních map (1:10 000). Naplnění ZABAGED pro celé území ČR bylo ukončeno v roce 2004. Aktualizace ZABAGED probíhají každé 3 roky. V dnešní době je ZABAGED složen ze 116 druhů geografických objektů, které jsou vloženy do výškopisné, či polohopisné části ZABAGED. Polohopisná součást zahrnuje 2D prostorové a popisné informace o komunikacích, sídlech, vodstvu a dalších objektech. Výškopisná součást zahrnuje 3D prvky terénního reliéfu. Tato část je zobrazována pomocí 3D vrstevnic. Souřadnicový systém ZABAGED je S-JTSK (ČÚZK 2016).

3.7.4. DMR 4G

Digitální model reliéfu ČR 4. generace reprezentuje ztvárnění přirozeného, či upraveného povrchu Země lidskou činností v digitální podobě ve tvaru výšek diskrétních bodů v rovnoměrné síti, kde jsou body od sebe vzdálené 5x5m. Souřadnice bodů X, Y a H, kde H značí nadmořskou výšku. Vyrovnaný výškový systém má v otevřeném terénu střední úplnou chybu výšky 0,3m a v zalesněném terénu 1m. Model byl tvořen daty z leteckého laserového skenování výškopisu České republiky, které bylo započato roku 2009 a ukončeno roku 2013. Model DMR 4G je předurčen k terénním analýzám České republiky např. modelování přírodních jevů, projekty vodohospodářského a dopravního charakteru (ČÚZK 2016).

3.7.5. DMR 5G

Digitální model reliéfu ČR 5. generace započal svůj vznik souběžně s Digitálním modelem reliéfu 4. generace. DMR 5G má oproti DMR 4G umístěné body v nepravidelné trojúhelníkové síti, kde je vyšší hustota bodů. (TIN) (ČÚZK 2016).

3.7.6. DMP 1G

Digitální model povrchu ČR 1. generace reprezentuje vyobrazení území zahrnující stavby a vegetaci. Výškové body jsou nerovnoměrně rozmístěné v trojúhelníkové síti (TIN). Střední chyba výšky u přesně vymezených objektů činí 0,4m, objekty přesně neohrazené mají chybu 0,7m. Stejně jako předešlé modely, i tento vznikl pomocí leteckého laserového skenování (ČÚZK 2016).

3.8. SOUŘADNICOVÉ SYSTÉMY

Pro naše území používáme souřadnicový systém pana Křováka S-JTSK Křovák EastNorth, který je využívám pouze pro Českou republiku. V případě dat, která mají odlišné souřadnicové systémy, není problém provést transformaci do jiného systému.

3.8.1. WGS-84

Americké ministerstvo obrany vyvinulo WGS-84 referenční systém podporující mapování, polohové služby a navigace. Tento systém je používán od roku 1987 (Snay et Soler 2000). GPS využívá v současnosti pro své záměry souřadnicový systém WGS-84 přesně určený dynamickými a geometrickými parametry (Ratiborský 1996). Tento souřadnicový systém vojenského charakteru je využíván

NATO. Výchozí plochu tvoří elipsoid WGS-84. Aplikované kartografické zobrazení nese název Universální Transversální Mercatorovo. Tento systém má původ v hmotném zemském středu a nazývá se geocentrický. Osy X,Y a Z mají počátek a směr určeny skrze 12 zemních stanic, u kterých víme konkrétní souřadnice a bez přestání zaznamenávají družicový pohyb systému NAVSTAR GPS (Plánka 2006). Satelitní systém WGS 84 je využíván v pozemní a lodní dopravě, letecké navigaci a také pro vojenské záměry (Nevosád 2005).

3.8.2. PZ-90

Souřadnicový systém Parametry Zemli 1990 (PZ-90) je celosvětový systém vyvíjený v Rusku, podobný systému WGS-84 a je používán jako koordinační systém pro GLONASS. Použití tohoto souřadnicového systému bylo uskutečněno umístěním 26 pozemních stanic stanovených pomocí geodetické družice Geo-IK, obsahující laserové skenování, dopplerovské měření, fotografování pozadí hvězd. Jedná se o 3D souřadnicový systém (Boykov et al. 1993).

3.8.3. GTRF

Společenství nesoucí název Galileo Geodetic Service Provider (GGSP) dostalo úkol vybudovat prototyp na vývoj Galileo Terrestrial Reference Frame (GTRF) současně s produktem poskytnou informace pro možného uživatele. Podobně jako GPS bude GALILEO stanoven pozemním souřadným systémem (GTRF). Tento systém musí být nezávislý vůči mezinárodnímu referenčnímu pozemnímu systému ITRS (Gendt 2008).

3.9. ODTOKOVÉ ALGORITMY

V této kapitole se seznámíme s odtokovými algoritmy, které jsou využity pro následné hydrologické analýzy porovnávaných DTM. Lze je rozdělit na jednosměrné, kde voda odtéká vždy pouze jedním směrem a vícesměrné, kde oproti zmíněnému jednosměrnému má voda možnost odtéci více směry.

3.9.1. JEDNOSMĚRNÝ ALGORITMUS SFD8

Odtokový jednosměrný algoritmus SDF8 (Single Flow 8 Direction) je nejstarší a nejsnazší algoritmus simulující povrchový odtok, nese také označení D8. Pracuje na principu výběru jednoho z osmi směrů odtoku, kam poté směřuje odtok z prostřední buňky. Odtokový směr náleží buňce, která má největší kladnou změnu nadmořské výšky (O'Callaghan et Mark 1984).

Nevýhoda tohoto algoritmu nastává, jsou-li shodné hodnoty výšek v okolních buňkách. V tomto případě algoritmus zvolí první zkoumaný směr. Algoritmus má také nedostatky v rovinných oblastech, kde vznikají plošiny, či díry (Jenson et Dominique 1988).

3.9.2. JEDNOSMĚRNÝ ALGORITMUS RHO8

Algoritmus Rho8 pokračuje v algoritmu SDF8, snaží se o zobrazení skutečných odtokových směrů. Algoritmus využívá k určení směru odtoku z počáteční buňky do sousedících buněk náhodný prvek. Směr odtoku může ležet mezi dvěma přípustnými směry, v tom případě se musí buňka rozhodnout kam směřovat odtok. Výsledný směr trasy odtoku by se měl co nejvíce shodovat se směrem skutečného sklonu svahu. Při opakované aplikaci této metody na stejné území, má vždy odlišný výsledek odtoku (Fairfields et Leymarie 1991).

3.9.3. JEDNOSMĚRNÝ ALGORITMUS LEA

Tento algoritmus pracuje s rozsáhlejším územím (4x4 buňky) k určení odtoku a náleží mezi algoritmy vedené svahovou orientací. Konečný směr odtoku tvoří algoritmus, který si můžeme představit jako balónek umístěný na šikmé ploše (Lea 1992).

3.9.4. JEDNOSMĚRNÝ ALGORITMUS SFD ∞

Algoritmus snaží se zlepšit reprezentaci reálných směrů odtoku na rozdíl od algoritmu SDF8. Oproti SFD8 nevybírá tento algoritmus pouze z 8 přípustných směrů, ale z nekonečného množství směrů (Tarboton 1997).

3.9.5. VÍCESMĚRNÝ ALGORITMUS MFD8

Tento algoritmus pracuje s myšlenkou, že voda neproudí při modelování odtoku pouze směrem nejvýznamnějšího sklonu, ale odtéká více směry, kde najdeme kladný sklon. Rozdělení množství vody mezi samostatné směry určíme velikostí jednotlivých sklonů (Freeman 1991).

3.9.6. VÍCESMĚRNÝ ALGORITMUS MFD ∞

Algoritmus MFD ∞ rozšiřuje algoritmus SFD ∞ dovolením odtoku proudit více směry, podobná závislost funguje mezi algoritmy SFD8 a MFD8. Odtok je rozdělován do jednotlivých směrů pomocí hodnot velikostí příslušných sklonů, podobné řešení jako u algoritmu MFD8. Odtok je rozdělován do jednotlivých směrů

pomocí hodnot velikostí příslušných sklonů, podobné řešení jako u algoritmu MFD8 (Seibert et McGlynn 2007, Freeman 1991).

3.9.7. VÍCESMĚRNÝ ALGORITMUS DEMON

Algoritmus se snaží zachovat sbíhavost toku a také vynechat nevýhody MFD8 algoritmu, především záporům s určením odtoku do osmi přípustných směrů. Snaží se také zjistit pro jednotlivé buňky DEM reálný směr největšího sklonu a zobrazit odtok pomocí dvourozměrně vizualizace, který je tvořen trubicemi měnící v průběhu odtoku šířku. DEAMON si lze představit obdobně jako Lea pomocí plošiny nasazené na okrajové hodnoty buňky (Costa-Cabral et Burges 1994).

4. ZÁJMOVÉ ÚZEMÍ

4.1. POPIS OBLASTI ŠUMAVA

Zkoumané zájmové území Modrava 2 se nachází v oblasti Šumavy. Pro jejíž vybrané území byly provedeny různé analýzy pomocí softwaru ArcGIS, které budou popsány v následující kapitole.

4.1.1. PODNEBÍ

Oblast Šumavy patří dle klimatických regionů mezi chladné oblasti, které jsou charakteristické velkým množstvím srážek a malým výkyvům teplot během roku. Klima území je tvořeno přechodem vnitrozemského a přímořského podnebí. Teploty se v průměru pohybují mezi 3 až 5° C (sumavainfo 2016).

4.1.2. GEOLOGIE

Vývoj geologie na území Šumavy probíhal v etapách, kdy docházelo k horotvorným procesům. První etapa byla prvohorní variské vrásnění, následovala druhá etapa třetihorní alpínské vrásnění. Stáří hornin moldanubika se odhaduje na 600 mil. let. Moldanobický plutón v dnešní době tvoří mohutné odkryté horské masivy. V oblasti jsou nejvíce rozšířeny silně metamorfované horniny (sumavainfo 2016).

4.1.3. GEOMORFOLOGIE

Šumava je nejrozsáhlejší a zároveň nejstarší pohoří v ČR. Patří do provincie Česká vysočina, následující začlenění je Šumavská subprovincie a oblast Šumavská hornatina. Oblast se rozkládá přes Jihočeský a Plzeňský kraj. Délka pohoří se táhne ve vzdálenosti 190km, přičemž šířka je stanovena na 45km (sumavainfo 2016).

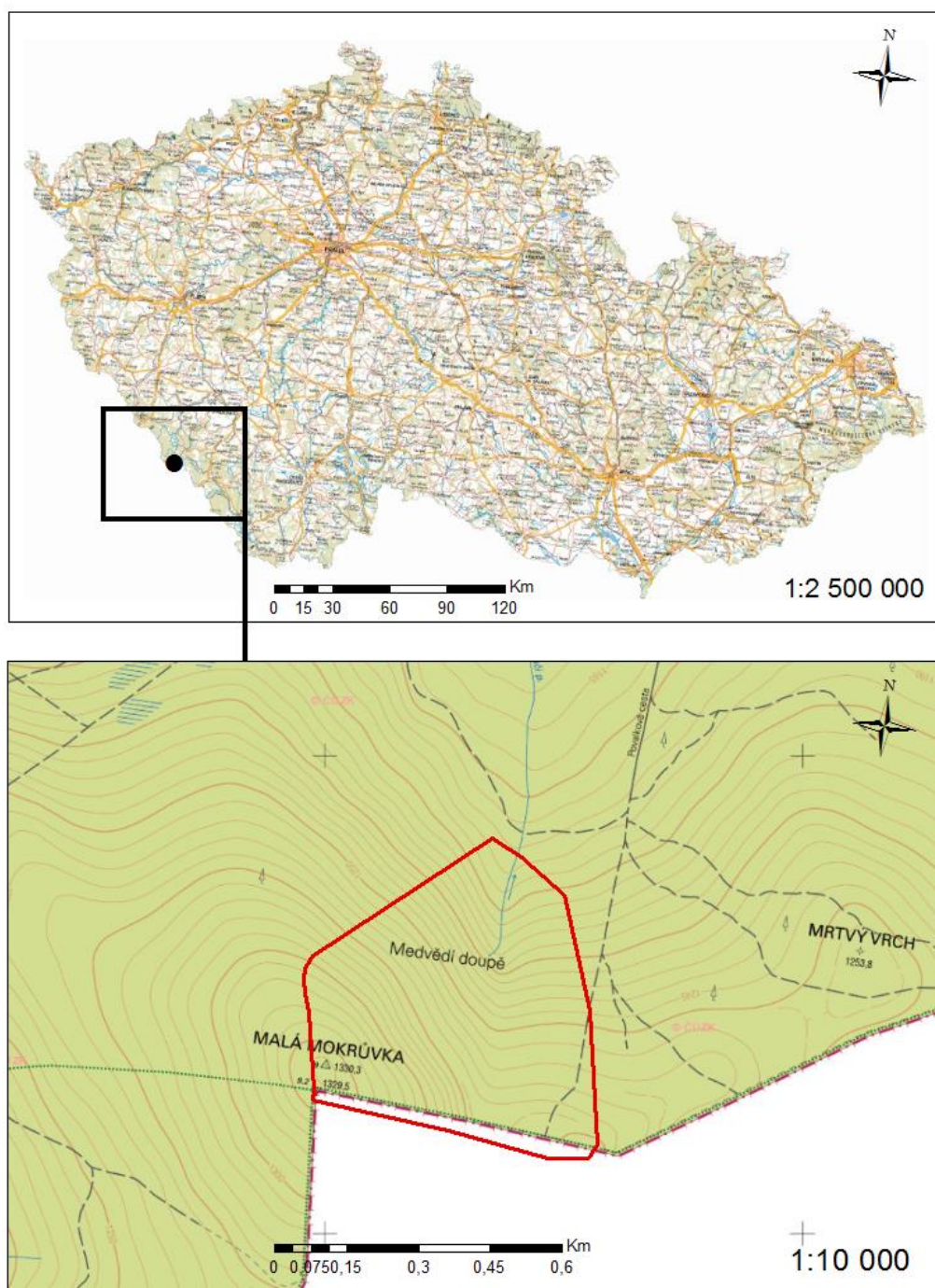
4.1.4. VEGETACE

Území Šumavy je pokryto více jak 60% lesními porosty. Nejsou zde rozvinuty horské hole, které jsou ovšem zastoupeny smilkovými porosty. Pro tuto oblast jsou typické rostliny smilka tuhá, prha arnika, hořec panonský a další (sumavainfo 2016).

4.2. POPIS ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ

Zájmové území povodí Modrava 2 leží u hory Malá Mokrůvka, přesněji na jejím severním svahu, kde pramenní Ptačí potok s hydrologickým pořadím 1-08-01-002 a zároveň na severozápadní straně Mrtvého vrchu. Území leží jižně, přibližně 5km od Filipovy Huti, která je částí obce Modrava. Povrch je v dnešní době tvořen náletovými dřevinami, větvemi a pařezy a travním porostem. Půdní horizont formuje mělký skeletovitý humózní horizont, který leží nad zvětralou granitovou mateční horninou prostupující místy na povrch (Pavlásek et al. 2008).

UMÍSTĚNÍ ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ



Obr.4- Umístění zájmového území

5. METODIKA

V této části práce budou popsány analýzy aplikované na zájmovou oblast a samotná práce s daty. Využívané analýzy jsou hydrologického i terénního charakteru. Zájmovým územím bylo vybráno experimentální povodí Modrava 2, které bylo popsáno v předchozí kapitole. Jedním z kritérií pro výběr dané oblasti bylo z důvodu poskytnutí laserově měřených dat od katedry vodního hospodářství a environmentálního modelování. Území je vhodné svou terénní strukturou a budou zde zřetelně viditelné odlišnosti.

5.1. POPIS DAT

Zde budou charakterizována jednotlivá vstupní data, která jsou nezbytná pro provádění různorodých analýz v této práci sloužících k provádění těchto vstupů. Pomocí vstupních dat získáváme skrze různé nástroje požadované výsledky.

Tato práce využívá mnoho geografických dat, bodová data, vrstevnicová data a rastrová data. Většina dat je dostupná pro uživatele zdarma, avšak jsou zde použita i data placená. Data bodového charakteru jsou pro tuto práci získána terénním zaměřením zájmového území totální stanicí a GPS metodou. Tato data jsou tedy zdarma a získána vlastním měřením. Data ve formátu vrstevnic jsou data ZABAGED, 3D vrstevnice a jsou poskytnuta od ČÚZK (Český úřad zeměměřičský a katastrální). Následující dvojice data jsou rastrového formátu, jsou to volně distribuovaná a stažitelná geografická data ASTER a SRTM. SRTM data jsou v této práci reprezentována odlišnými velikostmi buněk. Placená data jsou DMR 5G, DMR 4G a LiDAR. Data LiDAR byla poskytnuta od katedry Vodního hospodářství a environmentálních věd. DMR 5G a DMR 4g byly poskytnuty z WMS serveru ČÚZK 2016 v softwaru ArcGIS. Všechny zdroje dat jsou podrobně popsány v literární rešerši. Vodohospodářská data DIBAVOD jsou volně přístupná od VÚV TGM (Výzkumný Úřad Vodohospodářský T. G. Masaryka). Všechny analýzy provedeny na těchto datech byly v souřadnicovém systému S-JTSK Křovák EastNorth.

5.2. ÚPRAVA DAT

Pro práci s daty je potřeba provést patřičné úpravy. Jak bylo řečeno výše, musíme sjednotit souřadnicové systémy pro jejich další zpracování. Změřená data totální stanicí a GPS metodou jsou v systému S-JTSK Křovák EastNorth, stejně jako data ZABAGED, DMR 5G, DMR 4G a LiDAR. V souřadnicovém systému WGS 84 jsou data ASTER a SRTM. U těchto dat byla provedena transformace ze

systemu WGS 84 do systému S-JTSK pomocí nástroje Project Raster, kde lze zvolit transformační rovnici.

Jelikož k této práci jsou potřeba všechna data ve formě rastru z důvodu možnosti vzájemného porovnání, je nutné bodová a vrstevnicová vstupní data upravit do rastrové podoby. Bodová data konvertovala do rastrové podoby prostřednictvím interpolačních nástrojů Spline, IDW, Natural Neighbor a Kriging. Vrstevnice jsou převedeny na rastr pomocí nástroje Topo to Raster.

ZDROJE DAT	VELIKOST BUNĚK (m)
LIDAR	1X1
DMR 5G	2X2
DMR 4G	5X5
ASTER	30X30
SRTM 30	30X30
SRTM 90	90X90
ZABAGED	10X10
GPS	2X2
TOTÁLNÍ STANICE	2X2

Tab. 1 Zdroje dat

5.3. ANALÝZY USKUTEČNĚNÉ PROSTŘEDNICTVÍM ARCHYDRO

Jednotlivé zdroje dat DTM budou porovnány na základě různých charakteristik odvozených z těchto modelů terénu, např. sklon, cesty povrchového odtoku, akumulace povrchového odtoku, identifikace drah soustředěného povrchového odtoku. Z tohoto důvodu budou představeny následující funkce, které na sebe vzájemně navazují, a jejich konečným cílem je automatizované vytyčení povodí.

ArcHydro je nadstavba softwaru ArcGIS Desktop, pomocí kterého jsou provedeny vodohospodářské analýzy. Nadstavba zahrnuje srovnatelné funkce jako extenze Spatial Analyst programu ArcGIS Desktop, avšak mnoho funkcí je charakteristických pouze pro ArcHydro. Samotná nadstavba je zasazena do odděleného panelu.

5.3.1. PŘÍPRAVA DTM K POROVNÁNÍ

Nadstavba ArcHydro neobsahuje funkci umožňující vytvoření DTM. Zde byla využita extenze Spatial Analyst, která obsahuje interpolační analýzy. Pro vrstevnicové zdroje dat byla použita funkce Topo to Raster, na bodové zdroje dat byla aplikována funkce Spline, Natural Neighbor, IDW a Kriging. Ostatní geografická data ASTER, STRM a LiDAR jsou již rastrového formátu. DTM jsou odlišného rozlišení daného velikostí jednotlivých buněk. Na všech DTM byly provedeny totožné analýzy, aby byly zřejmé vzájemné odlišnosti.

5.3.2. ÚPRAVA DTM

Pro úpravu DTM slouží funkce DEM Reconditioning. Vstupní data pro tuto funkci představují jednotlivé DTM spolu s vrstvou toků (DIBAVOD). Funkce dále dovoluje nastavit řadu vlastností požadovaného výstupu, jako Stream buffer udávající projevení vzdálenosti prohloubení koryta. Smooth drop/raise udává snížení břehů, zatímco Sharp drop/raise udává snížení koryta. (Jedlička et Štych 2007)

5.3.3. VYHLAZENÍ BEZODTOKÝCH OBLASTÍ

Funkce Fill Sink slouží pro vyhlazení oblastí, na kterých neprobíhá odtok vody, v těchto oblastech nelze korektně provést některé z následujících hydrologických analýz. Funkce je zakomponována do sady nástrojů pod názvem Terrain Processing. Vstupní data jsou zde DTM. Nastavení parametru Fill Method, kde bylo označeno Fill All, zajišťující vyhlazení všech oblastí bez odtoku vody.

5.3.4. ODTOKOVÉ SMĚRY

Výstupem této funkce Flow Direction je vyobrazení kudy voda odtéká pryč z jednotlivých buněk. Data, která vstupují do této funkce, jsou DTM s vyhlazenými bezodtokými oblastmi. Výsledný rastr obsahuje směry odtoku.

5.3.5. AKUMULACE VODY

Pomocí funkce Flow Accumulation byly zjištěny oblasti, kde dochází k shromažďování vody v povodí. Vstupní data jsou rastry obsahující směry odtoku. Konečným výstupem této funkce je rastr akumulace vody.

5.3.6. RASTR VODNÍCH TOKŮ

Tato analýza se provádí prostřednictvím funkce Stream Definition vytvářející rastr vodních toků. Do této funkce byl dosazen rastr akumulace vody jako jedním z

vstupních dat. Abychom docílili kvalitního a efektivního výsledného rastru, je potřeba tuto funkci opakovat vícekrát s různým nastavením velikosti přispívající plochy a najít tak tu, která pro dané území podává co nejrealističtější hustotu sítě vodních toků. Pro stejné podmínky všech modelů terénu byla dosazená nejvhodnější hodnota přispívající plochy 0,01 km². Tato prahová hodnota byla ustálena na zmíněnou hodnotu z důvodu polohy zájmového území v horské poloze, kde je odtoková odezva rychlejší než v nížinných oblastech a je zde také větší hustota sítě vodních toků. Pro všechny rastry byla nastavena stejná hodnota. Výsledné rastry soustředěného povrchového odtoku odpovídají svou polohou vodnímu toku DIBAVOD.

5.4. ANALÝZY USKUTEČNĚNÉ NÁSTROJI ARCGIS

Zde popsané analýzy uskutečněné v prostředí ArcGIS, kde byla využívána extenze Spatial Analyst obsažena v základním softwaru.

5.4.1. SKLONITOSTNÍ POMĚRY

Sklonitostní poměry povodí byly znázorněny rastrem sklonitostí, vytvořený pomocí nástroje Slope. V nástroji je možno zvolit, zda bude výstup ve stupních, či procentech. Vstupní data pro rastr sklonitostí je DTM. Výsledek je rastr, kde jsou barevně znázorněny velikosti sklonů v oblasti.

5.4.2. ZONÁLNÍ ALGEBRA

Tato analýza byla provedena na digitálním modelu terénu a na rastru sklonitosti vyhotoveného v předešlém kroku. Nástroj použitý při analýze se nazývá Zonal Statistic as Table. Výsledky jsou vyobrazeny v tabulkách, každý rastr má svoji tabulku, kde se nacházejí informace o nadmořských výškách a sklonitostech v zájmovém území. Zonální algebra vypočítá rozlohy jednotlivých DTM.

5.4.3. CROSS VALIDACE

Vyhotovení náhodných kontrolních bodů proběhlo z důvodu srovnání kvality jednotlivých DTM s referenční vrstvou poskytnutou LiDARem, která je považována za nejpřesnější. V těchto náhodně vygenerovaných bodech dojde k porovnání DTM, kde budou jasně vidět odlišnost modelů od LiDARu. Body byly vyhotoveny pomocí nástroje Create Random Points, který vytvoří novou bodovou vrstvu. Můžeme zde nastavit, kolik chceme náhodných bodů a jakou minimální vzdálenost bude mít jeden bod od druhého.

Po vytvoření náhodných, je nezbytné těmto bodům přiřadit hodnoty nadmořských výšek z DTM. Nástroj se nazývá Extract Values to Points a vytvoří obtisk hodnot z DTM na vytvořené body. Vstupními daty je vrstva s vytvořenými náhodnými body a DTM, nástroj se použije u všech DTM. Výsledkem je bodová vrstva, kde mají body vyexportované hodnoty nadmořských výšek. Poté bude u všech vzniklých bodových vrstev vypočítána odchylka RMSE ze všech DTM od referenční vrstvy.

5.4.4. ROOT MEAN SQUARE ERROR

Tento výpočet byl vytvořen za pomoc softwaru microsoft excel. Odchylka také nazývána zkráceně RMSE vyjádří, jaký DTM je nejpodobnější referenční vrstvě (LiDAR). Odchylku vypočítáme z hodnot nadmořských výšek. Nejprve musíme provést odečtení všech hodnot bodů DTM od bodů referenční vrstvy jeden po druhém, následně musíme výsledek umocnit na druhou. Dále se provede průměr mezi všemi umocněnými hodnotami, z čehož dostaneme jeden výsledek, poslední krok k dosažení odchylky RMSE spočívá v odmocnění vzniklé hodnoty.

5.4.5. VYKRESLENÍ ROZVODNICE

Tvorba rozvodnice proběhla pomocí nástroje Watershed obsažená v extenzi Spatial Analyst. Vstupní vrstvy do této funkce jsou směry odtoků (Flow Direction) a vrstva obsahující uzávěrový profil povodí. Dále je potřeba v tomto nástroji v záložce Environments nastavit Processing Extend a zde zvolit libovolnou vrstvu překrývající zájmové území. Výsledek analýzy je rozvodnice povodí.

6. VÝSLEDKY

Tato kapitola diplomové práce je věnována srovnání jednotlivých vstupních digitálních modelů terénu. Modely byly srovnány zejména prostřednictvím vybraných geomorfologických charakteristik povodí z nich odvozených, např. nadmořské výšky, sklonitostní poměry, směry odtoků. Vybrané charakteristiky povodí jsou vizualizovány v seznamu příloh.

6.1. VÝŠKOVÉ POMĚRY

Charakteristické hodnoty nadmořských výšek odvozené z testovaných digitálních modelů terénu.

NADMOŘSKÉ VÝŠKY				
DATOVÉ ZDROJE	MIN	MAX	PRŮMĚR	RELATIVNÍ ROZDÍL
	(m n.m)	(m n.m)	(m n.m)	(%)
LIDAR	1185,82	1330,74	1262,59	0
ASTER	1185	1328	1262,86	0,02
ZABAGED	1186,39	1330,63	1262,33	0,02
SRTM 30	1188	1334	1267,43	0,38
SRTM 90	1184	1332	1255,4	0,57
GPS	1187,9	1330,85	1262,57	0,00
TOTÁLNÍ STANICE	1188,02	1330,34	1262,62	0,00
DMR 4G	1185,81	1330,47	1261,14	0,11
DMR 5G	1185,47	1330,63	1260,69	0,15

Tab. 2 Nadmořské výšky

Srovnání minimálních, maximálních a průměrných nadmořských výšek zájmového území je zaneseno do tabulky 1. Všechny hodnoty jsou velmi podobné, v posledním sloupci je znázorněn procentuální poměr vztažený k referenční ploše ztvárněné LiDAREm, nejbliže k ní je měření GPS a totální stanicí. Oproti tomu největší odlišnost představuje model SRTM 90. Vizualizaci nadmořských výšek lze nalézt v příloze č. 4.

ROOT MEAN SQUARE ERROR		
DATOVÉ ZDROJE		RMSE (m)
LIDAR	ASTER	4,662092
	SRTM 30	5,639299
	SRTM 90	11,41388
	GPS	1,615716
	TOTÁLNÍ STANICE	1,411927
	ZABAGED	1,85316
	DMR 4G	0,417347
	DMR 5G	0,603594

Tab. 3 Root mean square error

Odmocnina střední kvadratické chyby (root mean square error, RMSE) znázorňuje, jakou chybu nadmořských výšek mají jednotlivé modely terénu vůči LiDARové referenční ploše. RMSE byla počítána mezi samostatnými digitálními modely a referenční vrstvou. V tabulce 2. jsou zaznamenány chyby a je zde patrné, že nejmenších chyb se dosáhlo u nejpřesnějších modelů jako DMR 5G, DMR 4G, GPS a měření totální stanicí, což perfektně koresponduje s odchylkami odvozených průměrných výšek.

6.2. SKLONITOSTNÍ POMĚRY

Charakteristické hodnoty maximálních, minimálních a průměrných sklonitostí odvozených z testovaných digitálních modelů zájmového území.

SKLONITOSTI				
DATOVÉ ZDROJE	MIN	MAX	PRŮMĚR	RELATIVNÍ ROZDÍL
	(°)	(°)	(°)	(%)
LIDAR	0	58,73	13,27	0
ASTER	1,75	23,34	11,26	-15,1
ZABAGED	0,26	19,63	11,37	-14,3
SRTM 30	0,5	21,67	11,39	-14,2
SRTM 90	1,63	20,5	9,94	-25,1
GPS	0,01	63,73	12,11	-8,7
TOTÁLNÍ STANICE	0,01	64,46	12,05	-9,2
DMR 4G	0,18	29,45	11,9	-10,3
DMR 5G	0,06	38,09	12,27	-7,5

Tab. 4 Sklonitosti

Hodnoty sklonitostí zájmového území jsou především dané rozlišením digitálních modelů, jejich vyobrazení nalezneme v příloze č. 5. Dle tabulky č. 4 je zřejmé, že kvalitnější DTM mají větší rozmanitost hodnot sklonitostí a naopak méně kvalitní DTM mají rozmanitost menší. Je to dané velikostí jednotlivých buněk rastru. Čím jsou buňky větší, tím více jsou zanedbány terénní nerovnosti lokálního významu a celkové dochází k vyhlazení terénu, tedy k zúžení rozpětí hodnot sklonů.

6.3. SMĚR ODTOKU

Z přílohy 6. jsou viditelné rozdíly mezi modely terénu. Ve všech případech převažují směry odtoku z území na severovýchod, sever a severozápad. Rozlišení jednotlivých rastrů není v této analýze tolik podstatné, avšak rastr SRTM 90 s nejhorším rozlišením obsahuje pouze čtyři kategorie směrů odtoku, v rámci generalizace se ostatní směry nevyskytly. Oproti tomu, nejkvalitnější rastr LiDAR má více směrů odtoků v místech, kde mají ostatní rastry směr pouze jeden, protože v podrobných rastroch jsou zohledněny i minimální nerovnosti terénu. Tato analýza je plně závislá na kvalitě rastrů.

6.4. AKUMULACE VODY

Zvolené referenční vrstvě se podobají téměř všechny vytvořené rastry akumulace, avšak ASTER, SRTM 30 a především STRM 90 vytváří odtokové dráhy příliš široké z důvodu velikosti buněk, což neodpovídá realitě, spíše to připomíná odtokové plochy. Dle vizualizace viditelné v příloze č. 7 lze říci, že kvalitnější rastry se svou podobou přibližují referenční vrstvě více, než méně kvalitní rastry. Referenční vrstvě se přibližují nejvíce DMR 5G, DMR 4G.

6.5. SOUSTŘEDĚNÝ POVRCHOVÝ ODTOK

Soustředěný povrchový odtok v podobě vodoteče je generovaný z rastru akumulace vody, avšak je zde nastavena prahová hodnota přispívající plochy (akumulace), která byla zvolena pro zájmové území $0,01\text{km}^2$.

6.6. ROZVODNICE

PLOCHY POVODÍ		
DATOVÉ ZDROJE	PLOCHA	RELATIVNÍ ROZDÍL
	(Ha)	(%)
LIDAR	17,4	0
DMR 5G	16,1	-7,5
DMR 4G	13,8	-20,7
ASTER	18,3	5,2
SRTM 30	18,8	8,0
SRTM 90	23,7	36,2
ZABAGED	14,9	-14,4
GPS	16,8	-3,4
TOTÁLNÍ STANICE	18,8	8,0

Tab. 5 Plochy povodí

Rozvodnice pro jednotlivé DTM jsou generovány z rastru směrů odtoků (Flow Direction), jejich rozdíly korespondují podobně jako u předešlých výstupů s podrobností rozlišení. U modelů ASTER, SRTM 30, SRTM 90 a totální stanice vyšla výsledná plocha povodí větší, oproti tomu u DMR 5G, DMR 4G, ZABAGED a GPS vyšly plochy povodí menší. Plocha povodí 17,4 ha LiDARové referenční vrstvy, koresponduje s původními odhady rozlohy experimentálního povodí dle katedry vodního hospodářství a environmentálního modelování. Při tvorbě rozvodnice je důležitý faktor rozlišení DTM. Zvolené referenční vrstvě jsou nejvíce podobné DMR 5G, DMR 4G, GPS, na rozdíl tomu největší rozdíly představuje model SRTM 90. Všechny rozvodnice jsou vykreslené v příloze č. 9.

7. DISKUZE

Pro tuto diplomovou práci bylo nezbytné získat, či vytvořit digitální modely terénu, které pochází z odlišných datových sad. Na těchto modelech terénu proběhlo vyšetření různorodých charakteristik zájmového území. Dva modely terénu byly vytvořeny z bodových dat získaných vlastním měřením. Měření proběhlo pomocí GPS přístroje a totální stanice. Dále bylo nutné bodová data převést na modely terénu pomocí interpolačních metod. Pro následující analýzy byly vybrány modely pocházející z interpolační metody IDW obsažené v extenzi Spatial Analyst. Výsledné DTM mají rozlišení 2x2m, protože byly vytvořeny z dostatečného množství bodů. Následující DTM byl vytvořen z vrstevnicových dat interpolační metodou Topo to Raster, kterou najdeme v extenzi Spatial Analyst. Zbávající požité DTM jsou dostupná ve formě rastru, není potřeba tyto DTM upravovat.

Velkou výhodou digitálních modelů SRTM a ASTER jsou dostupné bezplatně, na rozdíl od DMR 5G, DMR 4G, LiDARu a ZABAGEDu, které jsou placené. SRTM modely byly pro tuto práci vybrány ve dvou rozlišeních. Referenční vrstvou byl zvolen rastr LIDAR, vzhledem k jeho rozlišení a přesnosti, která je největší. Modely vytvořené z vlastního měření metodou GPS a měřením totální stanicí mají nevýhody z finančního a časového hlediska. Jsou drahé na pořízení měřicí techniky a především je zde velká časová náročnost pro získání takovýchto dat. Veškeré digitální modely jsou vyobrazeny v příloze č. 5.

Podle tabulky č. 2 jsou u odlišných modelů zájmového území obdobné nadmořské výšky, které se liší v nejhorsím případě pouze o 0,5% u SRTM 90. Ostatní modely jsou na tom vzhledem k referenční vrstvě obstojněji a nejlepších výsledků dosáhly modely vytvořené z měřených bodových dat. Model SRTM 90 není příliš vhodný pro malé území jako v našem případě, kvůli velikosti jednotlivých buněk rastru. Modely ASTER a SRTM 30 jsou na tom lépe. Zmíněné modely jsou ovšem poskytovány bezplatně, z tohoto hlediska jsou dostačující k práci, kde není potřeba přílišná přesnost, např. při analýzách velkých územních celků.

Rastry sklonitostí zájmového území jsou odlišné a závislé na rozlišení digitálních modelů. Z přílohy č. 5 je patrné, že kvalitnější DTM jako LiDAR, DMR 5G, DMR 4G, GPS a totální stanice vyhodnocují větší sklonitosti oproti méně podrobným modelům. V těchto rastrech jsou viditelné jednotlivé velké buňky a není v jejich moci zobrazit rozmanitost sklonitosti odpovídající realitě. Modely s menším rozlišením jsou vhodné pro hrubé analýzy větších území rovinatějšího či obecně méně členitějšího charakteru, kde nedochází ke skokovým změnám

nadmořské výšky a pro svoje měřítko je přiměřená generalizace spíše žádoucí. Větší velikosti jednotlivých buněk mají za následek vyhlazení sklonitostí zájmového území. Rastry LiDAR, DMR 5G a DMR 4G jsou vzájemně podobné a lze stanovit jejich největší příbuznost s přirozeným tvarem reálného území. Vzájemná podobnost modelů GPS a totální stanice je zapříčiněno vlastním zaměřením území, kde mohly vzniknout nepřesnosti vlivem nezachycení všech terénních rozmanitostí, nejčastěji z důvodu horší prostupnosti terénu, špatné přímé viditelnosti odrazného hranolu při měření pomocí totální stanice terénních rozmanitostí v území.

Ještě před následujícími hydrologickými operacemi s testovanými digitálními modely terénu musela být u všech DTM provedena analýza na vyplnění bezodtokých oblastí nástrojem Fill Sink. Kdyby tento nástroj nebyl aplikován, rastr směrů odtoků by mohl být nespojitě vykreslen a došlo by ke zkreslení výsledků. Směry odtoku tvoří nástroj Flow Direction v nadstavbě ArcHydro.

Příloha č. 6 obsahuje rastry směrů odtoků vody jednotlivých buněk. Kvalitnější modely jako LiDAR, DMR 5g, GPS a totální stanice znázorňují všechny směry odtoků, které bylo touto analýzou možno zobrazit. Směry odtoku jsou omezené použitým odtokovým algoritmem D8, se kterým pracuje software ArcGIS, v případě využití jiného odtokového algoritmu může být směrů odtoků více. U této metody lze na základě výsledných rastrů směrů odtoku v příloze č. 6 říci, čím podrobnější model terénu, tím kvalitnější výsledný rastr směrů odtoků. Avšak pro některé účely není vhodné mít výsledný rastr směrů odtoků příliš diferencovaný. Při pohledu na model SRTM 90 jsou viditelné pouze čtyři směry odtoků, oproti ostatním modelům, kde je na stejném území všech osm směrů.

Jako zajímavá charakteristika se jeví akumulace vody v zájmovém území, která na příloze č. 7 ukazuje, z jak velké oblasti je napájen soustředěný povrchový odtok z území. Přirozený tvar akumulace mají rastry s menší velikostí jednotlivých buněk. SRTM 90 není pro tuto charakteristiku na malém území vhodný, vytvoří spojitě vyobrazení, ze kterého se nedá příliš určit. Model terénu z dat ZABAGED vytváří rastr, kde akumulaci tvoří paralelní linie toků, které vůbec nekonvergují, tento rastr není příliš reálný a je vidět odlišnost od zbylých modelů.

Vytvořený soustředěný povrchový odtok vychází z rastru akumulace vody, je zde nastavena prahová hodnota 1 ha. Reálnému soustředěnému povrchovému odtoku se podobají stejně jako u rastru akumulace rastry s menším rozlišením. Soustředěný povrchový odtok nastává v místech, kde akumulace přesáhne stanovenou hodnotu a vznikne povrchový odtok.

Vytvořené rastry rozvodnic povodí ukázané v příloze č. 9 si jsou některé vzájemně podobné. Vzhledem k referenční vrstvě jsou dle rozlohy nejpodobnější povodí vytvořené z rastru totální stanice, SRTM 30, ASTER a DMR 5G. Tato

povodí jsou s referenční vrstvou a mezi sebou podobná tvarem i rozlohou. Povodí SRTM 90 je svou rozlohou 36 % větší, je to zapříčiněno velkými buňkami rastru přesahujícími přes okraj povodí. DMR 4G je o 20 % menší než povodí referenční vrstvy. S polohou uzávěrového profilu muselo být trochu posunuto, je důležité, aby ležel v dráze soustředěného odtoku, jinak nedojde k automatizovanému vytvoření rozvodnice povodí v ArcGIS.

Na všech modelech terénu byly aplikované stejné hydrologické charakteristiky. Na bezplatných modelech se vyskytují větší odlišnosti ve srovnání s LiDARovou referenční vrstvou, na rozdíl od placených modelů a modelů vytvořených z vlastního měření. Naopak digitální modely vytvořené pomocí zaměření bodů v území vycházejí obdobně jako poskytované placené DTM. Pro zvolené zájmové území byl vyhodnocen jako nevyhovující model SRTM 90, který z důvodu svého malého rozlišení a přesnosti poskytuje nereálné výsledné rastry, není vhodný pro práci s malými územními celky. Ve většině analýz provedené na zmíněném DTM nebylo možné vyvodit kvalitní výsledky. Modely SRTM 30 a ASTER, které jsou méně kvalitního rozlišení, dokáží i pro malé zvolené území poskytnout uspokojivé výsledky. Tyto modely jsou dostupné bezplatně a pro práci kde není potřebná přílišná přesnost, jsou plně dostačující. Placené modely používané při této práci poskytovaly kvalitní a přesné výsledky. Jejich výhodou je velké rozlišení, které umožňuje vyobrazení realistického zemského povrchu. Přesné digitální modely terénu jsou vhodné pro hydrologické analýzy, kde dokáží vyobrazit veškeré podrobnosti. Model z 3D vrstevnicových dat ZABAGED a jeho výsledné rastry jsou pro zájmové území dostačující, avšak rastr akumulace je odlišný od všech ostatních modelů. Digitální Modely vytvořené z vlastního výškopisného zaměření vycházejí obdobně jako placené DTM, ale mohou zde vznikat nepřesnosti vlivem měření v terénu. Tyto chyby jsou zapříčiněny například špatnou schůdností území, což má za následek absenci, či nerovnoměrné rozprostření zaměřovaných bodů a také mohou chybět body singularit terénu.

8. ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá aplikováním hydrologických funkcí na DTM zvoleného zájmového území Modrava II.

Cíl této práce spočívá v porovnání digitálních modelů terénu vyznačujících se různou velikostí buněk rastru a pocházejících z různých zdrojů dat. Jednotlivé odlišnosti jsou znázorněny pomocí geomorfologických charakteristik, které se analyzují na jednotlivých DTM. Práce využívá software ArcGIS a jeho extenzi Spatial Analyst a ArcHydro ke svému zpracování. Extenze ArcHydro je speciálně vyvinuta pro hydrologické analýzy využívané i při této práci. Vyhodnocení výsledků proběhlo v 6. kapitole. Odlišnosti jsou zapříčiněny různými zdroji dat, rozdílným rozlišením modelů a také metodami, jakými jsou data pořízena.

Tuto práci, kde dochází k porovnání odlišných digitálních modelů terénu, považuji za přínosnou z hlediska aplikování shodných geomorfologických charakteristik na placené a bezplatné DTM. Dle výsledků lze usoudit vhodnost použití digitálních modelů menšího rozlišení bezplatného charakteru pro větší územní celky a při práci nepožadující velké přesnosti. Naopak placená data jsou pro náročnější analýzy, kde je potřeba požadovaná přesnost.

Výsledky diplomové práce lze stanovit za přijatelné, avšak model SRTM 90 není příliš vhodný pro menší územní celky zapříčiněný jeho malým rozlišením. Ostatní modely jsou pro zvolené zájmové území plně dostatečné. Bezplatné modely terénu poskytly obdobné výsledky jako placené modely, avšak v horší kvalitě výsledných rastrů.

9. POUŽITÁ LITERATURA

9.1. KNIŽNÍ ZDROJE

- BALTSAVIAS E. P., 1998: *A comparison between photogrammetry and laser scanning*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Zurich: 83-94
- BLAŽEK R., SKOŘEPA Z., 2004: *GEODÉZIE III. České vysoké učení technické*, Praha: 161 p.
- BOYKOV VV., GALAZIN VF., KAPLAN BF., MAKSIMOV VG., BAZLOV YA., 1993: *Exprience in developing the PZ-90 Geocentric Coordinate system. Geod Kartog*. In: BOUCHER C., ALTAMINI Z., 2001: *ITRS, PZ-90 and WGS 84: Current realization and the related transformation parameters*. Journal of Geodesy, 75: 613-619
- BRIESE C., 2010: *Extraction of digital terrain models*. In G. VOSSelman, H. MASS (Eds.), *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Dunbeath: Whittles Publishing: 147-150
- COLLINS J., FRED C., 1995: *A Comparison of Spatial interpolation Techniques in Temperature Estimation*. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg
- COSTA-CABRAL M. C., BURGESS S. J., 1994: *Digital elevation model network (DEAMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersla areas*. Water Resources Research, Seattle: 30 (6): 1681-1692
- CRESSIE N. A. C., 1993: *Statistics for Spatial Data*. Wiley, New York: 900 p.
- ČERMÁK M., 1970: *Aplikovaná hydrologie: povrchové vody*, Praha 155 p.
- DOLANSKÝ T., 2004: *LiDARy a letecké laserové skenování*. Univerzita J. E. Purkyně, Ústí nad Labem: 100 p. ISBN 80-704-4575-0
- DOUŠEK F., 1998: *Geodézie*. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, Brno: 294p.
- EL-SHIEMY N., VALEO C., HABIB A., 2005: *Digital terrain modeling: acquisition, manipulation, and application*. Artech House, Norwood: 257 p.
- FAIRFIELDS J., LEYMARIE P., 1991: *Drainage Networks from Grid Digital Elevation Models*. Water Resources Research, 27 (5): 709 – 717

- FREEMAN T.G., 1991: *Calculating catchment area with divergent flow based on regular grid*. Computers&Geosciences 17(3): 413-422.
- GENDT G., 2008: *The Galileo Terrestrial Reference Frame and its Connection to the IGS*. IGS Workshop, Miami.
- GUAN H., LI J., CHAPMAN M. A., 2011: *Urban thematic mapping by integrating LiDAR point cloud with colour imagery*, GEOMATICA. 65: 375-385
- HÁNEK P., MARŠÍKOVÁ M., 2008: *Geodézie pro obor pozemkové úpravy a převody nemovitostí*. 2. vydání. Jihočeská univerzita ZF, České Budějovice: 88 p. ISBN 978-80-7394-086-7
- HRÁDEK F., KUŘÍK P., 2008: *Hydrologie*. Skripta. ČZU Praha: 272 p.
- HRDINA Z., PÁNEK P., VEJRAŽKAF., 1995: *Radiové určování polohy: Družicový systém GPS*. České vysoké učení technické, Praha: 267 p. ISBN 80-01-01386-3
- CHEN R. F., CHANG K. J., ANGELIER J., CHAN Y. CH., DEFFONTAINES B., LEE CH. T., LIN M. L., 2006: *Topographical changes revealed by high resolution airborne LIDAR data: The 1999 Tsaoling landslide induced by the Chi-Chi earthquake*. Engineering Geology, Taiwan: 160-172
- JENSON S. K., DOMINGUE J. O., 1988: *Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 54 (11) 1593 – 1600.
- JIANG J., MING Y., ZHANG Z., ZHANG J., 2005: *Point based 3D Surface Representation from LIDAR Point Clouds*. The 4th ISPRS workshop on dynamic and Multi dimensional GIS, Wales: 1-4
- JOHNSTON K., VER HOEF J. M., KRIVORUCHKO K., LUCAS N., 2001: *Using ArcGIS Geostatistical Analyst*. ESRI, Redlands: 306 p.
- KEMEL M., 1996: *Klimatologie, meteorologie, hydrologie*, Praha, 296 p.
- KOVÁŘ J., 2007: *Softwarové rádio a jeho aplikace v GNSS*. České vysoké učení technické, Praha: 22 p. ISBN 978-80-01- 03884-0
- LAM N., 1983: *Spatial Interpolation Methods: A Review*. The American Cartographer, 10(2): 129-149
- LEA N. J., 1992: *An aspect-driven kinematic routing algorithm*. In PARSONS A. J., ABRAHAMS A. D., (eds.): *Overland Flow: Hydraulics and Erosion Mechanics*. University College London Press, London: 393 – 407

- LI Z., ZHU Q., GOLD C., 2005: *Digital terrain modeling Principles and methodology*. CRC Press, Boca Raton: 324 p
- LIU X., 2008: *Airborne LiDAR for DTM generation: Some critical issues*. *Progress in Physical Geography*, 32: 31-49
- MARŠÍK Z., MARŠÍKOVÁ M., 2002: *Geodézie II*. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích – Zemědělská fakulta, České Budějovice: 123 p.
- MARŠÍKOVÁ M., MARŠÍK Z., 2005: *Speciální a vyšší geodézie*. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, České Budějovice: 82 p.
- MARŠÍKOVÁ M., MARŠÍK Z., 2007: *Dějiny zeměměřičství a pozemkových úprav v Čechách a na Moravě v kontextu světového rozvoje*. Libri. Praha: 182 p.
- MOORE I. D., GRAYSON R. B., LADSON A. R., 1991: *Digital terrain modeling: A review of hydrological, geomorphological and biological application*, *Hydrological Processes*, 5: 3-30
- NASER E. S., VALEO C., HABIB A., 2005: *Digital Terrain modelin – acquisition, manipulation and applications*. Artech House: 270 p.
- NEVOSÁD Z., VITÁSEK J., 2000: *Geodézie III*. Vysoké učení technické v Brně, Brno Vutim: 140 p.
- NEVOSÁD Z., VITÁSEK J., 2005: *Geodézie III*, Vysoké učení technické, Brno: 176p.
- O'CALLGHAN J. F., MARK D. M., 1984: *The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data*. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 28: 323 – 344
- OLIVER M. A., 1990: *Kriging: A Metohod of Inerpolation for Geographical Information Systém*. *International Journal of Geographic Information System*, 4: 313-332
- ORŠULÁK T., 2010: *3D Modelování a virtuální realita*, Ústí nad Labem: 64 p.
- ORŠULÁK T., PACINA J., 2012: *3D Modelování a virtuální realita*. Ústí nad Labem, 64 p.
- PAVELKA K., 1998: *FOTOGRAMETRIE 10*. vydavatelství ČVUT, Praha: 178 p. ISBN 80-010-1863-6
- PAVELKA K., 1999: *Zpracování Obrazových Záznamů DPZ*. Vydavatelství ČVUT, Praha: 138 p. ISBN 80-01-02031-2
- PAVLÁSEK J., MÁCA P., ŘEDINOVÁ J., 2006: *Analýza hydrologických dat z modravských povodí*. *J. Hydrol. Hydromech*, 54: 207-216

- PFEIFER N., and MANDLBURGER G., 2008: *LiDAR data filtering and DTM generation*. In SHAN J., TOTH CH. K., [eds]: *Topographic laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*, CRC Press, Boca Raton, 11: 309-333.
- PHILIP G. M., WATSON D. F., 1982: . A precise method for determining contoured surfaces. *Australian Petroleum Exploration Association Journal* 22: 205-212
- PIKE R. J., 1988: *The geometric signature: Quantifying landslide-terrain types from digital elevation models*. *Mathematical Geology*, 20: 491-511.
- PLÁNKA L., 2006: *GE18 Kartografie a základy GIS*. Vysoké učení technické, Brno, 117 p.
- PODHORSKÝ I., 1985: *Mapování*, ČVUT, Praha: 205 p.
- POKORNÁ D., ZÁBRANSKÁ J., 2008: *Hydrologie a hydrogeologie*, Praha: 218 p.
- POLIDORI L., 1991: *Digital Terrain models from radar images: A review*. *Proc. Int. Symp. On Road and LiDARs in Earth and Planetary Sciences*, Cannes: 141-146
- RICHARDS M. A., 2014: *Fundamentals of Radar Signal Processing*, New York: 688 p.
- ROYLE A. G., CLAUSEN F. L., FREDRIKSEN P., 1981: *Practical Universal Kriging and Automatics Contouring*. *Geoprocessing*: 377-394
- SEIBERT J., MCGLYNN B. L., 2007: *New triangular multiple flow direction algorithm for computing upslope areas from gridded digital elevation models* [online]. *Water Resources Research*, 43 (4)
- SHAN J., TOTH CH. K., 2008: *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*. CRC Press, 590 p. ISBN 14-200-5143-1
- SOMMER M., 1973: *Aplikovaná hydrologie*, Brno: 247 p.
- STARÝ M. A KOL., 1989: *Hydrologie: Návody ke cvičením*. Brno: 99 p.
- SUDA J., HERBER V., 2001: *Cvičení z fyzické geografie I*. Plzeň: 93 p.
- ŠMIDRKAL J., 1991: *Fotogrametrie a DPZ*. Ediční středisko ČVUT, Praha: 225 p.
- ŠVÁBENSKÝ O., FIXEL J., WEIGL J., 1995: *Základy GPS a jeho praktické aplikace*. 1. vydání. Akademické nakladatelství CERM, BRNO: 123 p. ISBN 80-214-0620-8.

- ŠVÁBENSKÝ O., VITULA A., BUREŠ J., 2007: *Inženýrská geodézie II*. Brno: 80 p.
- TARBOTON D. G., 1997: *A new method for the determination of flow direction and upslope areas in grid digital elevation models*. *Water Resources Research*, 33 (2): 309-319
- TOMCZAK M., 1998: *Spatial interpolation and its Uncertainty using Automated Anisotropic Inverse Distance Weighting (IDW) – Cross – Validation/ Jackknife Approach*. *Journal of Geographic information and Decision Analysis*, 2: 18-30
- TOUTIN T., 2008: *ASTER DEMs for geomatic and geoscientific applications: A review*. *International Journal of Remote Sensing*, 29: 1855-1875
- URBAN J., 1991: *Digitální model terénu*. Ediční středisko Českého vysokého učení technického, Praha: 60 p.
- URDIROZ A., COOKSLEY G., FARGO DE M., KOUDOGBO F., 2012: *Ground motion measurement in infrastructure and transport projects using InSAR technology*. Altamira Information, Barcelona: 4 p.
- VINKLER F., 1987: *GEODÉZIE*. Vysoká škola zemědělská v Praze, Praha: 303 p.
- VOSSelman G., MAAS H. G., 2010: *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Whittles Publishing, 336 p. ISBN 9781904445876
- VOŽENÍLEK V., 2001: *Integrace GPS/GIS v geomorfologickém výzkumu*. Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc: 185 p. ISBN 80-244-0383-8.
- ZHANG Y., TAO C. V., MERCER J. B., 2004: *An Initial Study on Automatics Reconstruction of Ground DEMs from Airborne IfSAR DSMs*. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 12: 427-438.

9.2. ONLINE ZDROJE

- CARTER J., SCHMID K., WATERS., BETZHOLD L., HADLEY B., MATAOSKY R., HELLERAN J., 2012: *An introduction to LiDAR Technology, Data, and Application*. [online]
https://coast.noaa.gov/digitalcoast/_pdf/LiDAR101.pdf cit. 12.3.2016
- ČÚZK: Geoportál: 2010, [online]. <http://ČÚZK 2016.cz/> cit. 12.3.2016
- GISAT: ASTER GDEM: [online].
<http://www.gisat.cz/content/cz/produkty/digitalni-model-terenu/aster-gdem>,
 cit. 12.3.2016

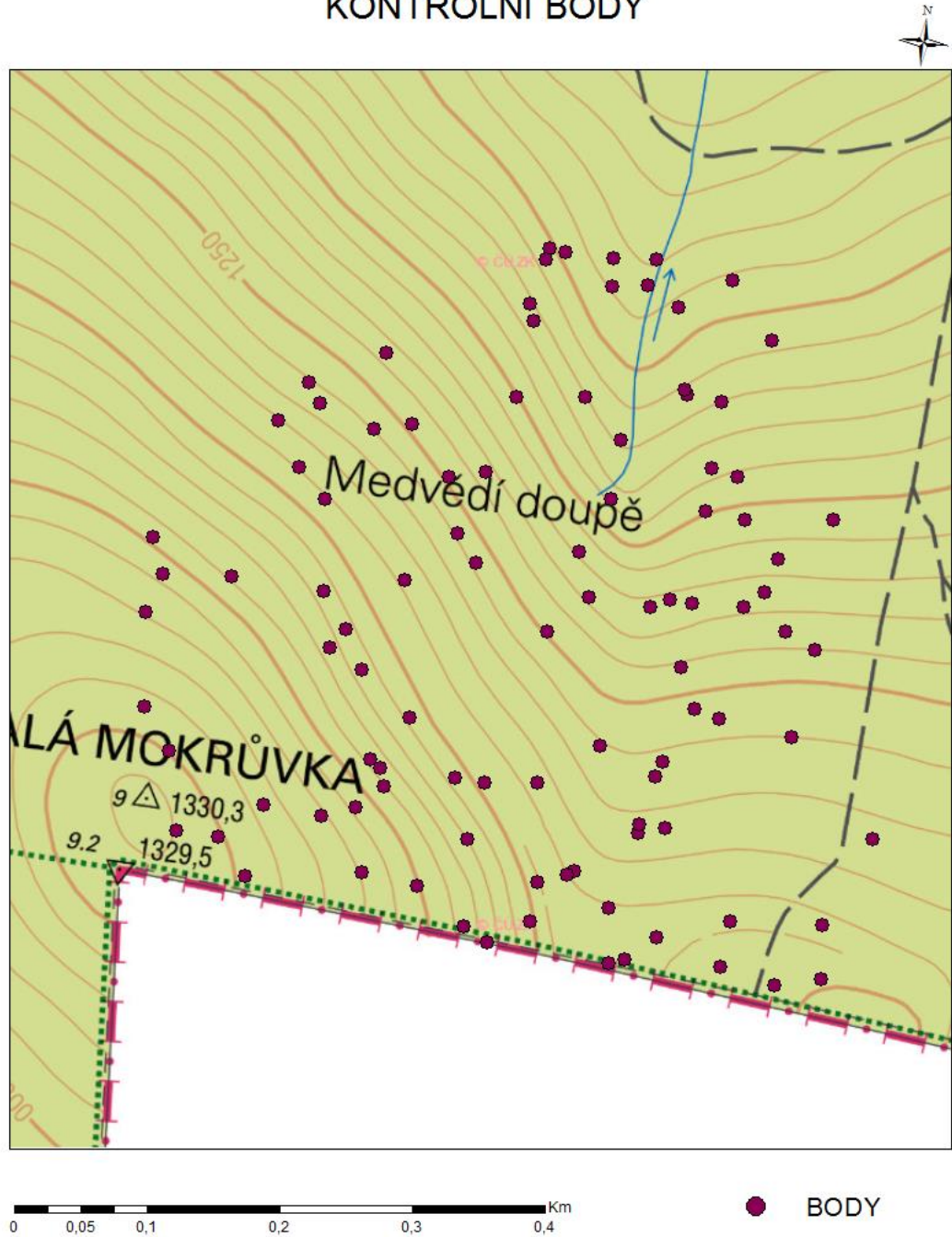
- GISAT: SRTM DEM: [online]. <http://www.gisat.cz/content/cz/produkty/digitalni-model-terenu/srtm-dem>, cit. 12.3.2016
- HOWELL E., 2013: *Navstar: GPS Satellite Network*, [online]: <http://www.space.com/19794-navstar.html>, cit: 22.1.2016
- CHILDS C., 2004: *Interpolating Surfaces in ArcGIS Analyst*. [online]: <https://www.esri.com/news/arcuser/0704/files/interpolating.pdf>, cit. 15.3.2016
- KLIMÁNEK M., 2006: *Digitální modely terénu*. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, Brno, [online]: http://uhulag.mendelu.cz/files/pagesdata/cz/DTM/DTM_02.pdf, cit. 15.1.2016
- LEMMENS M., 2011: *Airborn LiDAR Scanners*. [online] <http://www.gim-international.com/content/article/airborne-LiDAR-scanners>, cit. 2.3.2016
- NASA: Aster's Global Digital Elevation Model, 2009: [online]. <http://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=PIA12090> cit. 12.3.2016
- NASA: SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION, 2000: [online]. <http://www.nasa.gov/home/hqnews/presskit/2000/STS-99.pdf> cit. 14.3.2016
- S
- PAVELKOVÁ CHMELOVÁ R, FRAJER J. A GELETIČ J., 2009: *Vybrané kapitoly z hydrologie*, online: <http://hydro.upol.cz> cit: 12.3.2016
- RAPANT P., 2002: *Družicové polohové systémy*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Ostrava: 202 p. [online] http://gis.vsb.cz/vojtek/content/gnps/files/_source/RAP02.pdf, cit. 24.1.2016 ISBN 80-248-0124-8
- SNAY R. A., SOLER T., 2000: *Modern Terrestrial Reference Systems PART 3: WGS 84 and ITRS*, [online]: <http://www.ngs.noaa.gov/CORS/Articles/Reference-Systems-Part-3.pdf>, cit: 25.1.2016
- VANÍČEK T., 2009: *Triangulace*. Fakulta stavební ČVUT v Praze [online]. http://kix.fsv.cvut.cz/~vanicek/vyuka_z09/Triangulace.ppt cit. 15.3.2016

10. SEZNAM PŘÍLOH

- 1) Kontrolní body
- 2) Body GPS
- 3) Body totální stanice
- 4) Rastry – DTM
- 5) Rastry – Sklonitosti
- 6) Rastry – Směrů odtoků
- 7) Rastry – akumulace vody
- 8) Rastry - soustředěného povrchového odtoku a akumulace
- 9) Rastry - rozvodnice
- 10) LIDAR – DTM
- 11) LIDAR – rastr sklonitosti
- 12) LIDAR – rastr směrů odtoku
- 13) LIDAR – rastr akumulace vody
- 14) LIDAR – rastr vodního toku

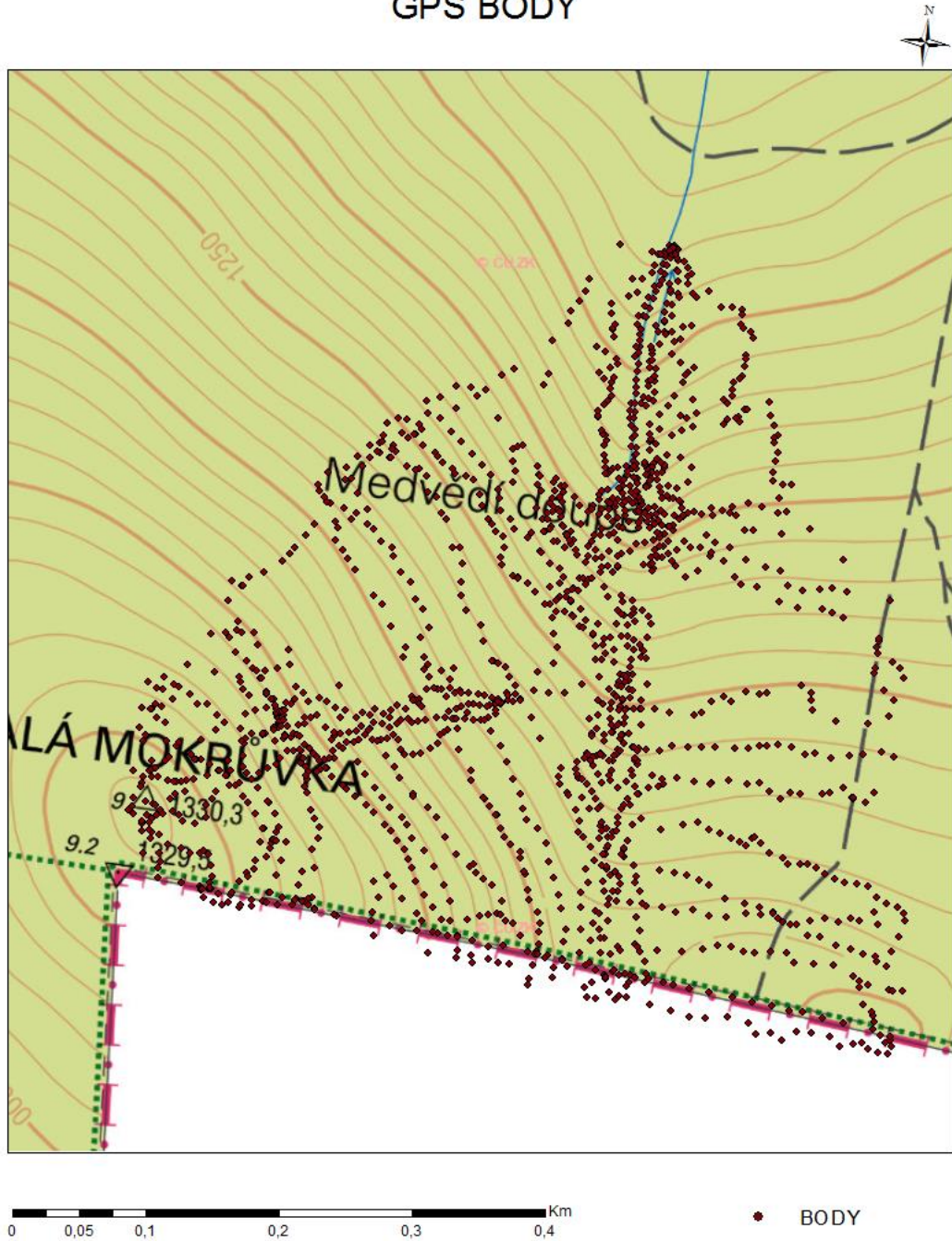
Příloha č. 1

KONTROLNÍ BODY



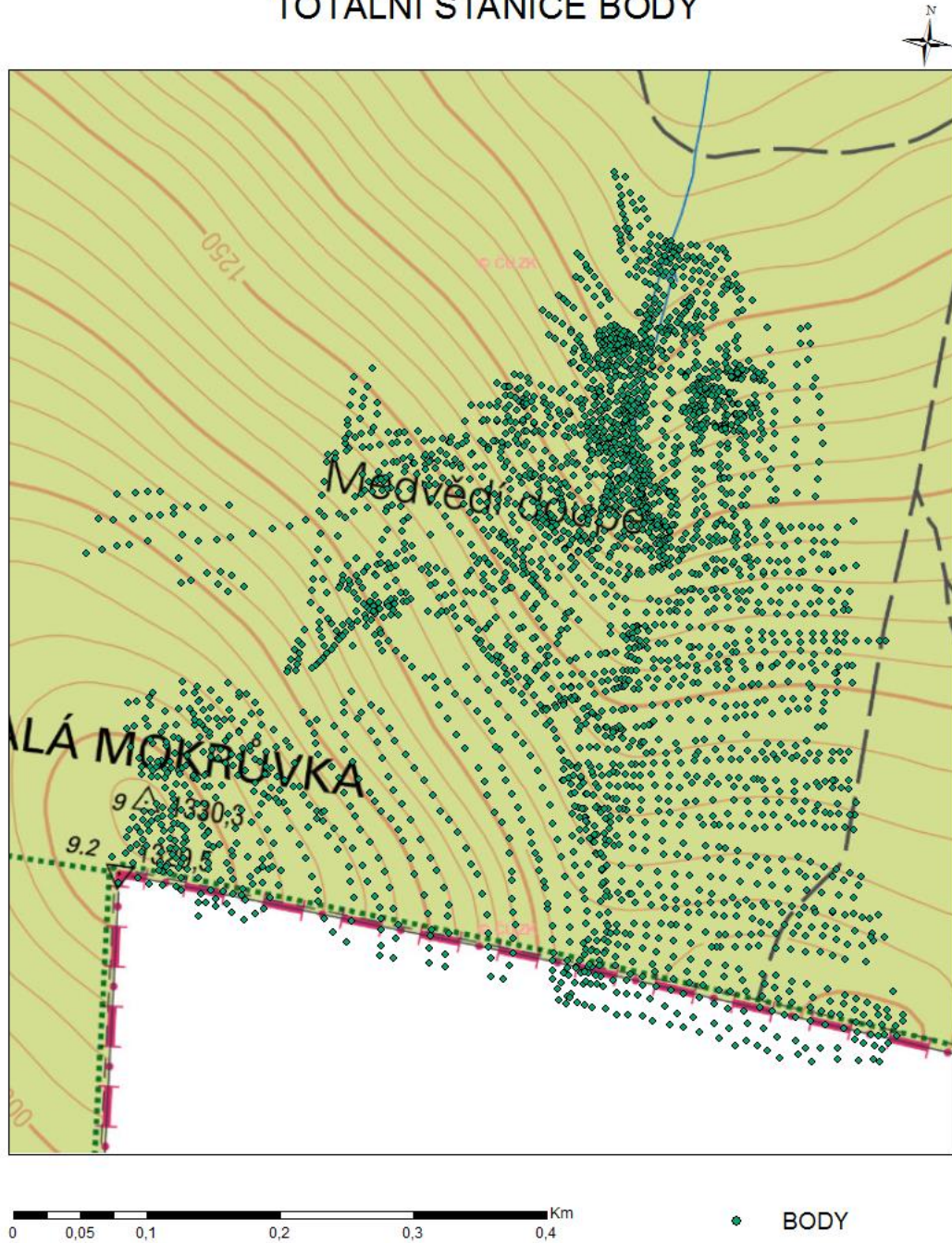
Příloha č. 2

GPS BODY



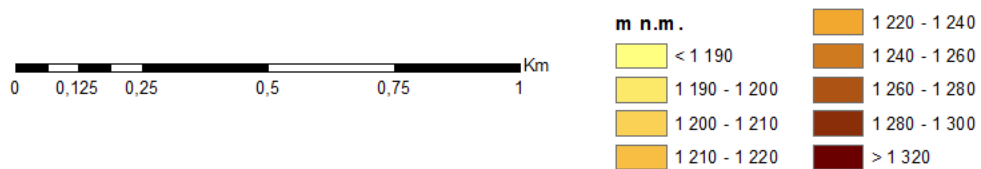
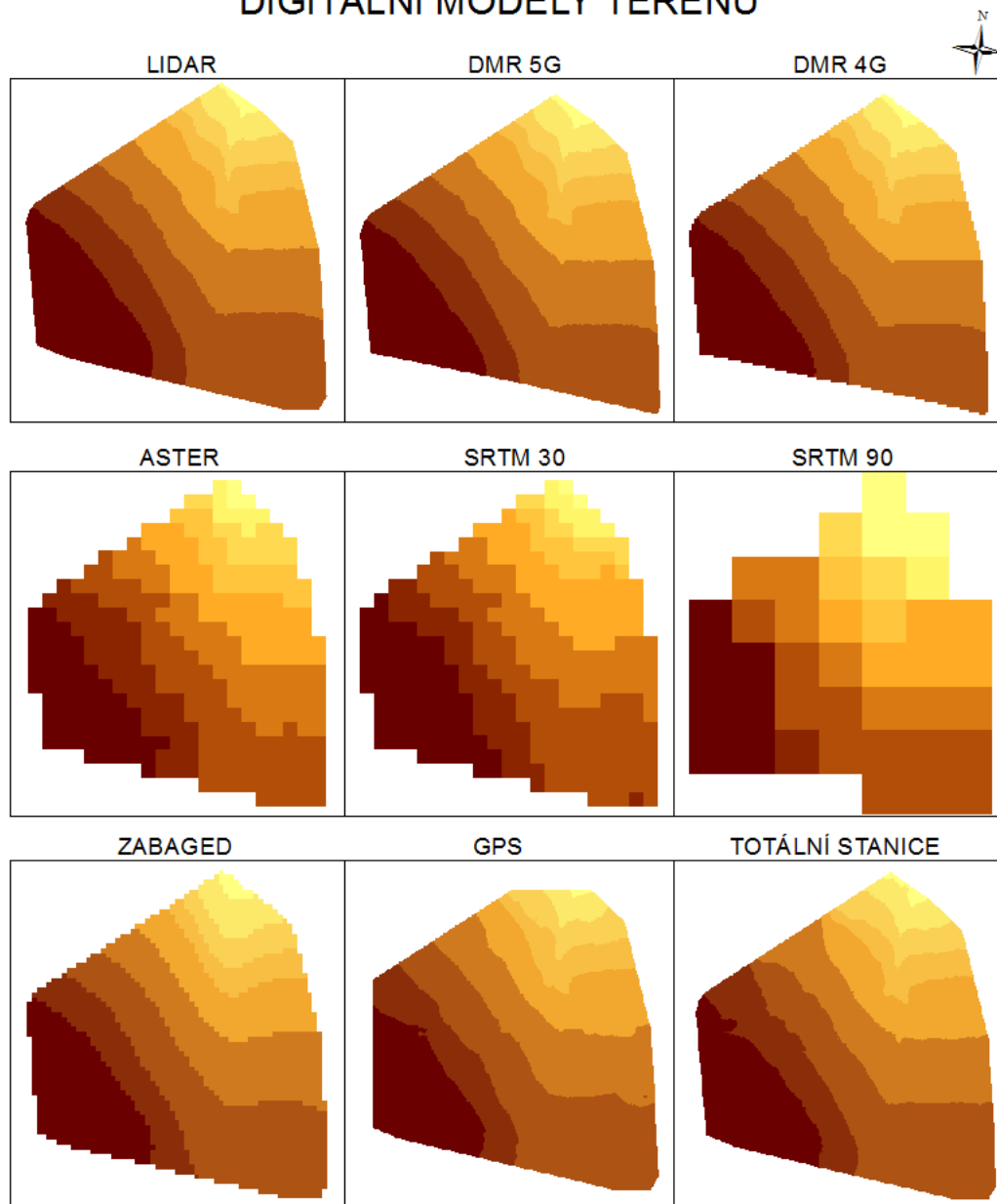
Příloha č. 3

TOTÁLNÍ STANICE BODY



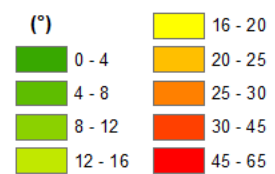
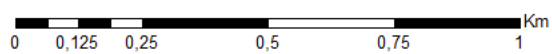
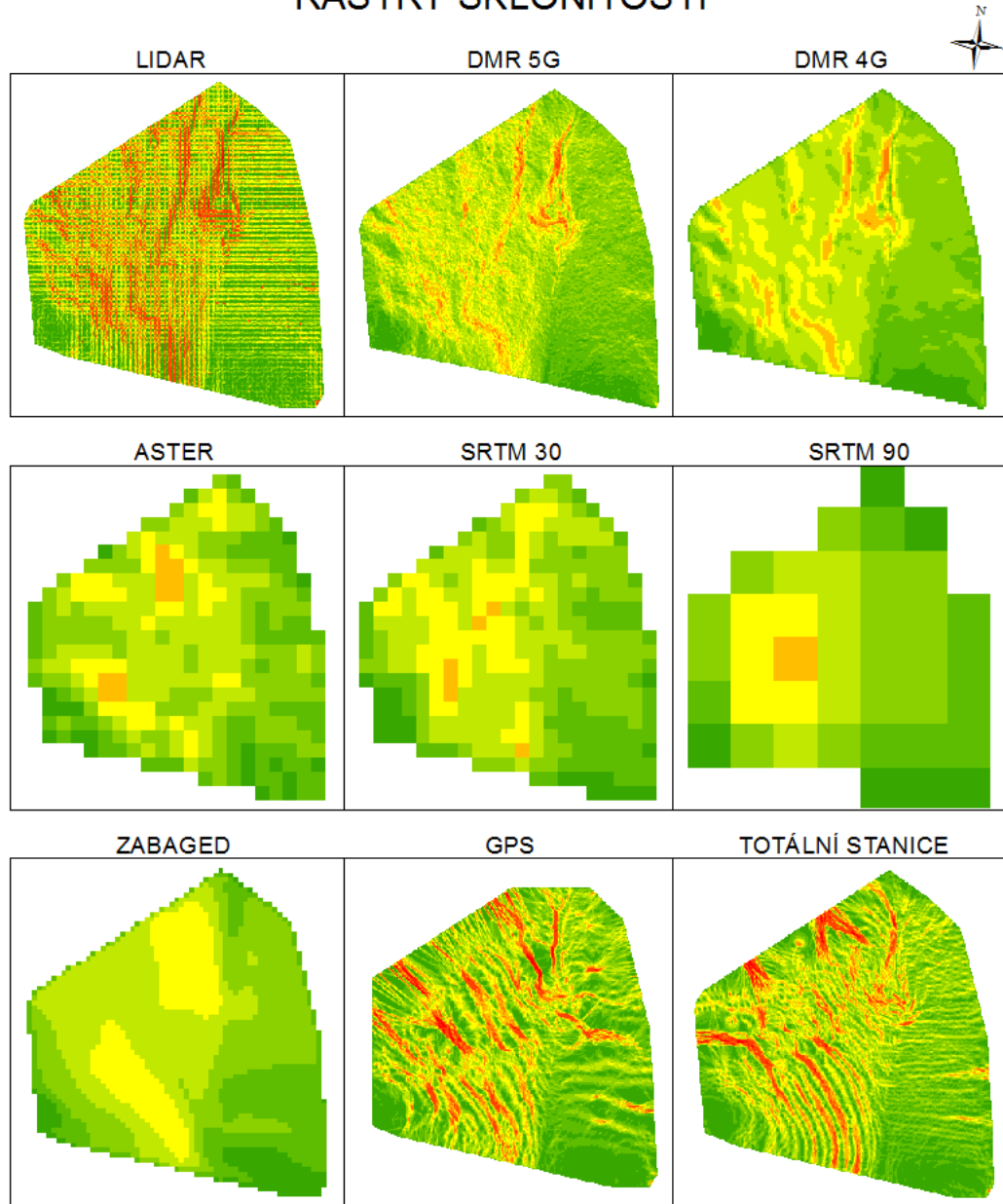
Příloha č. 4

DIGITÁLNÍ MODELY TERÉNU



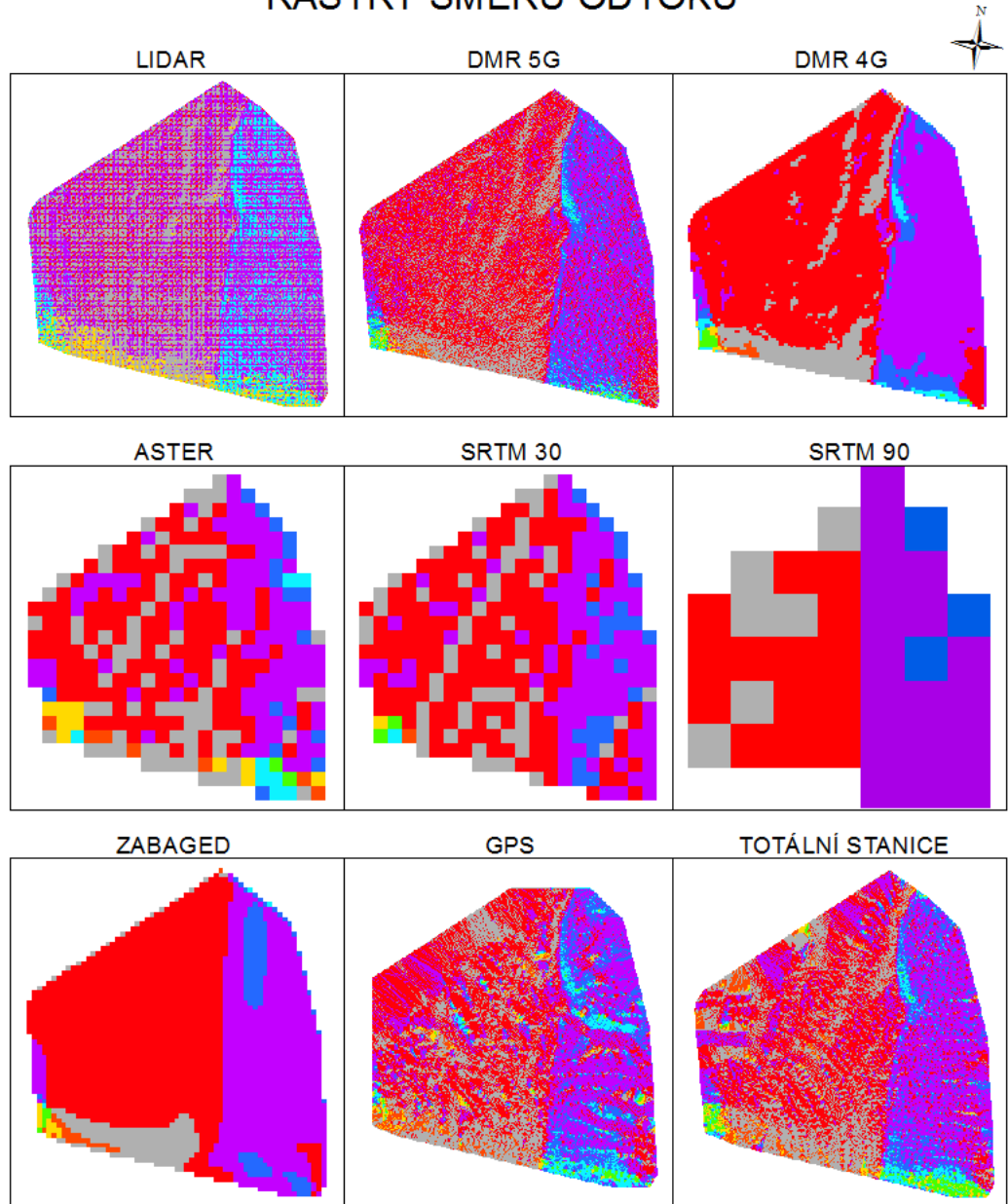
Příloha č. 5

RASTRY SKLONITOSTÍ



Příloha č. 6

RASTRY SMĚRU ODTOKU

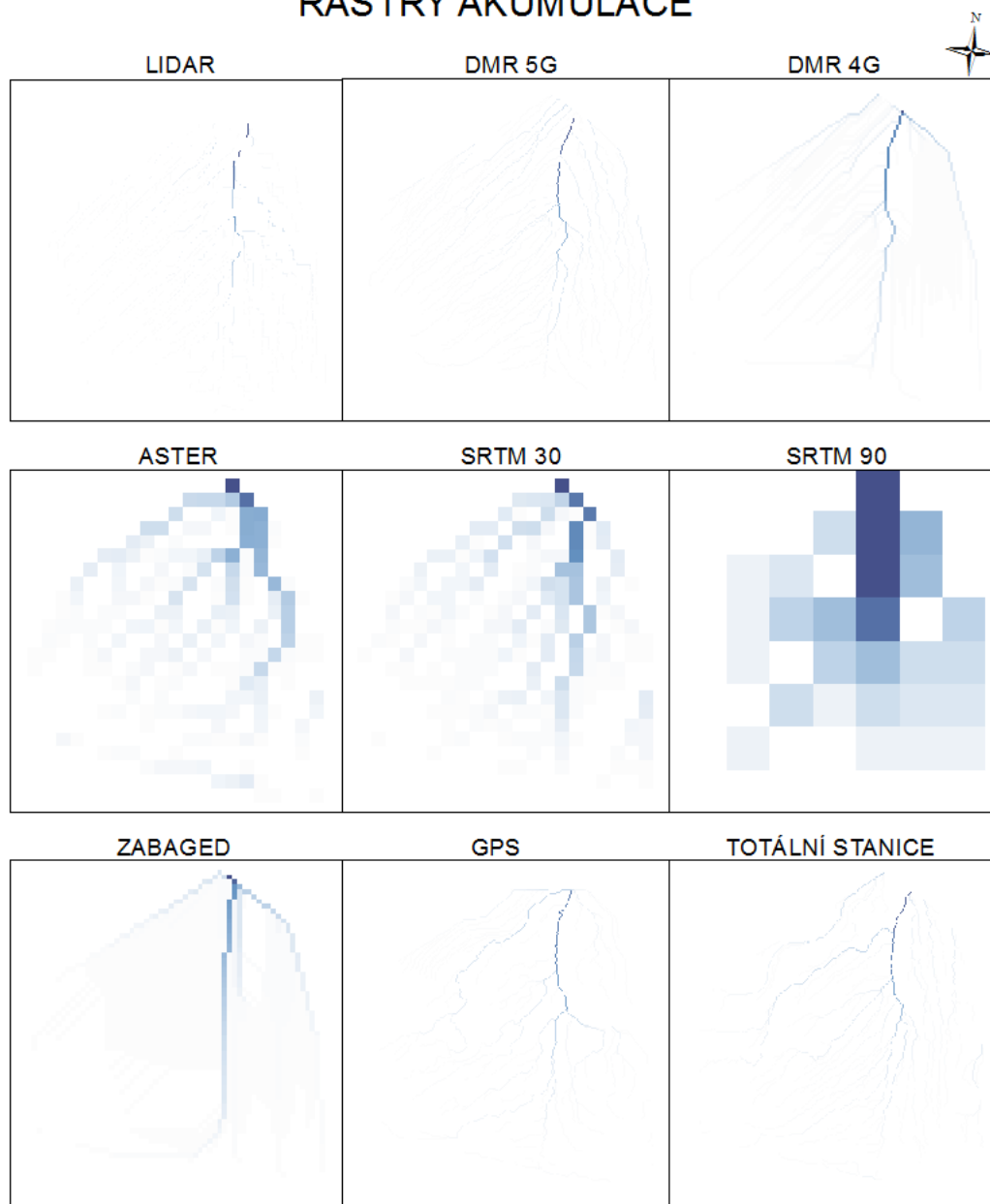


Odtok

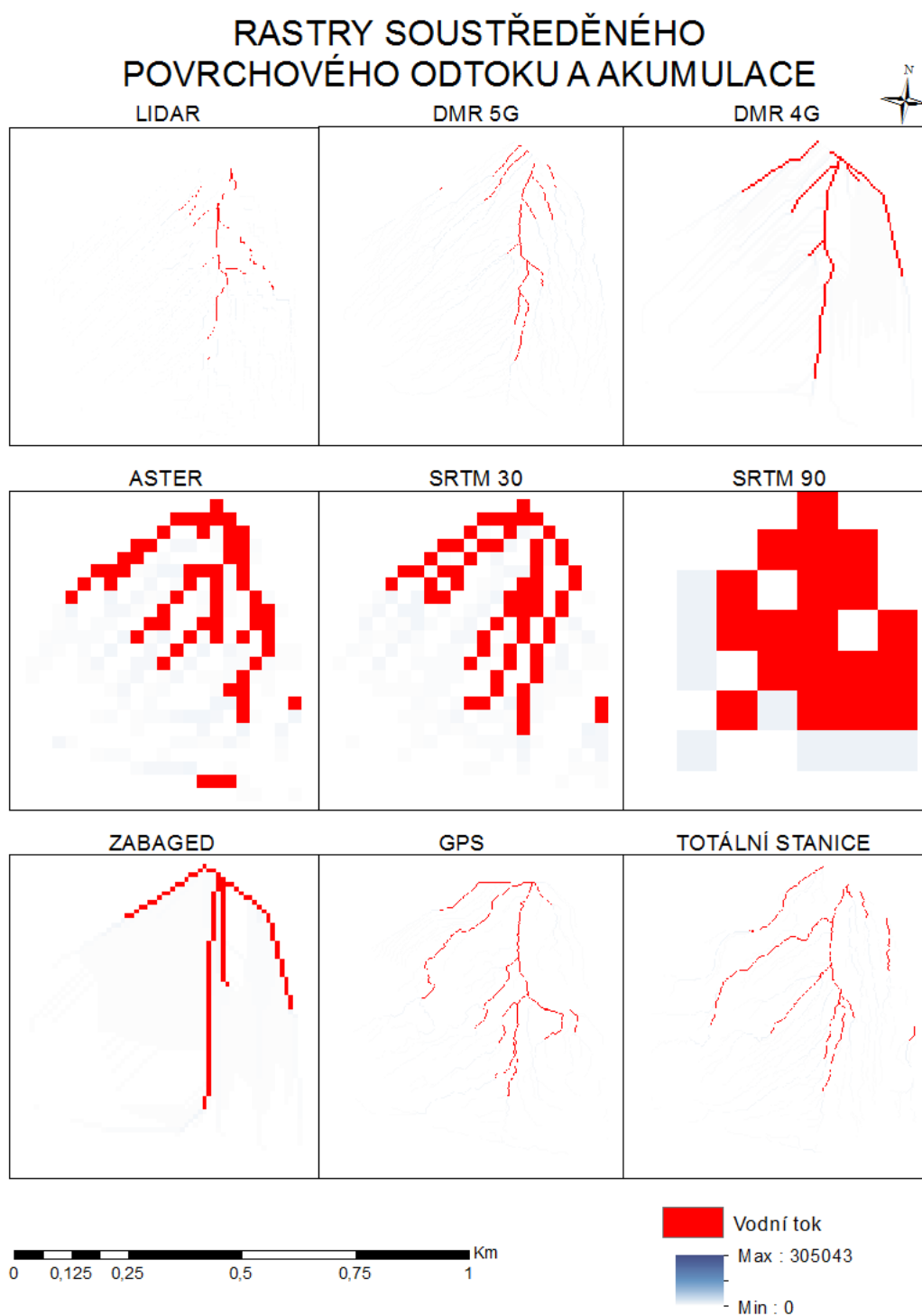
■ východ	■ západ
■ jihovýchod	■ severozápad
■ jih	■ sever
■ jhozápad	■ severovýchod

Příloha č. 7

RASTRY AKUMULACE

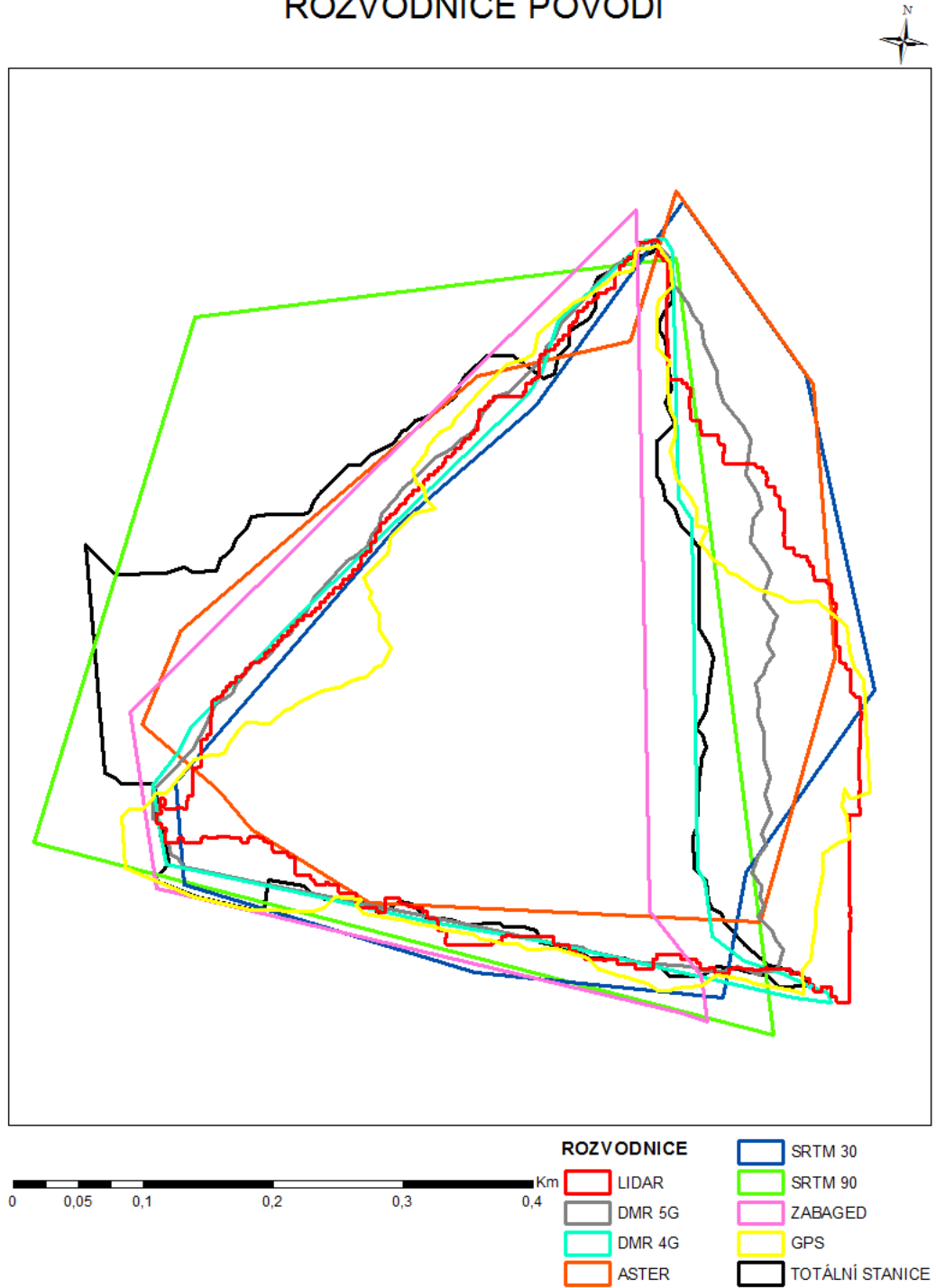


Příloha č. 8



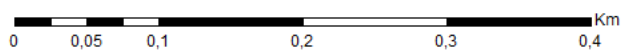
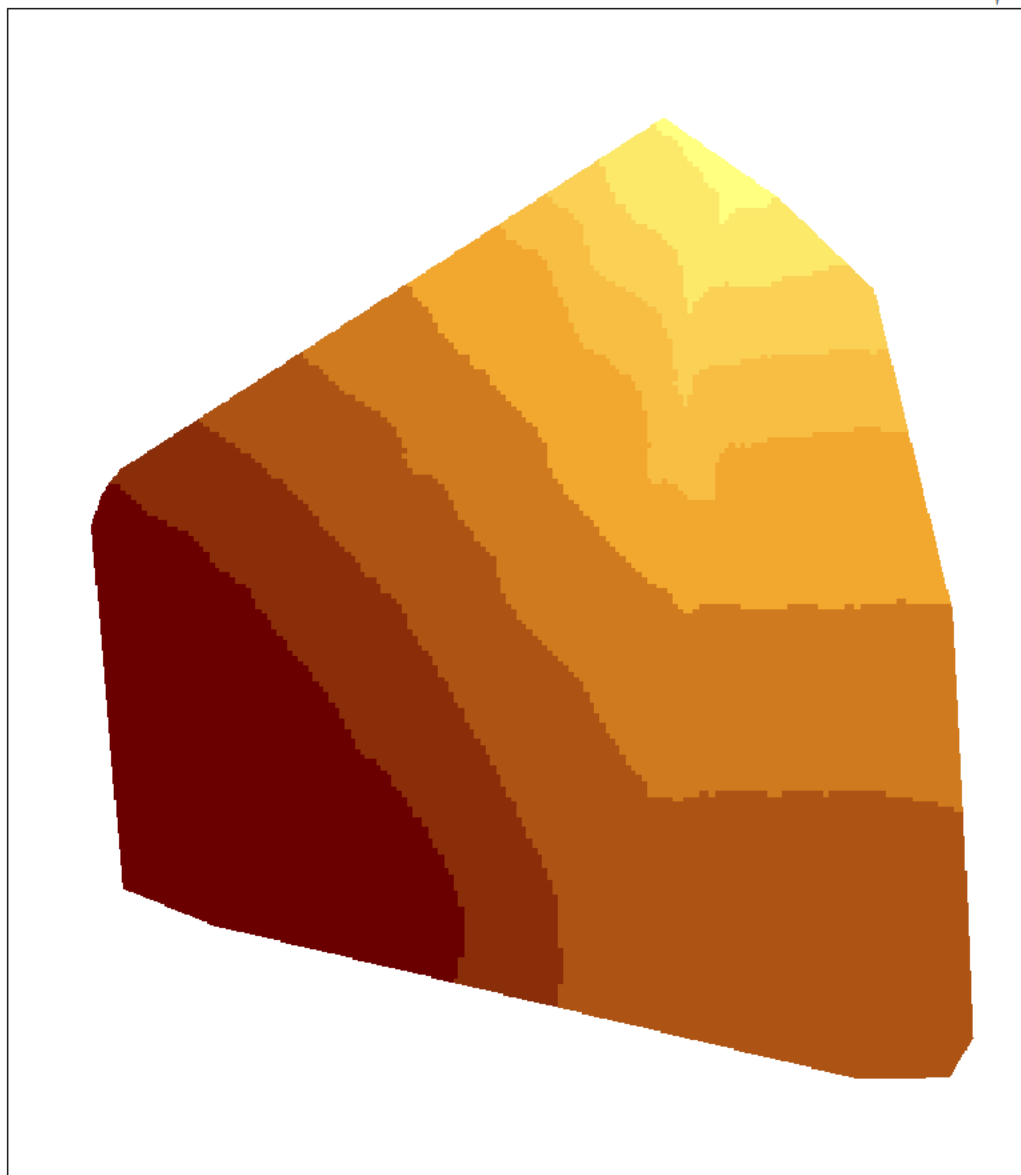
Příloha č. 9

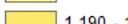


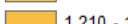

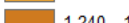


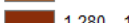
ROZVODNICE POVODÍ



Příloha č. 10

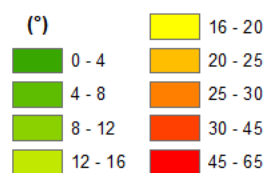
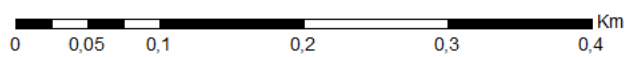
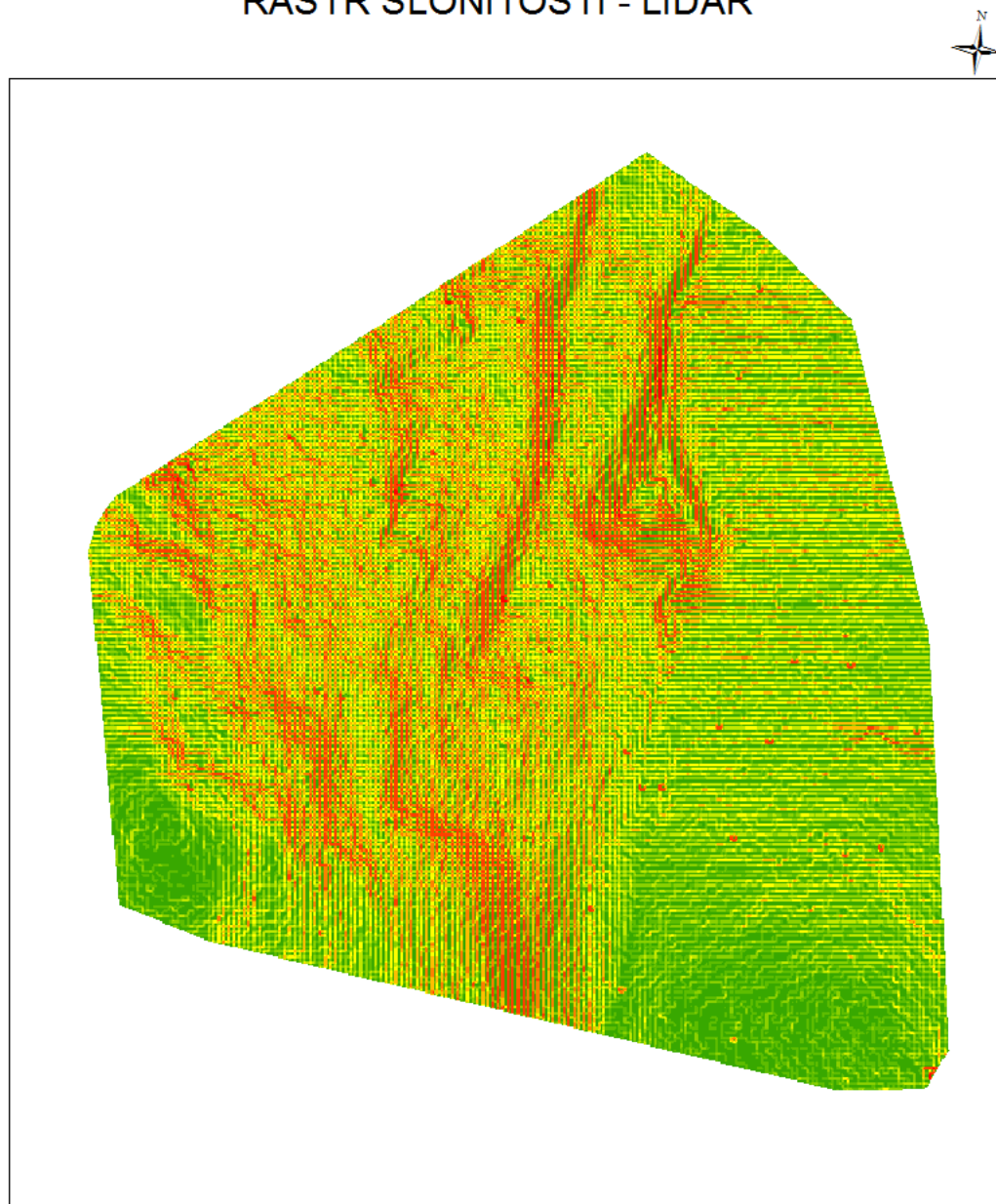
DIGITÁLNÍ MODEL TERÉNU - LIDAR



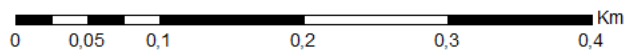
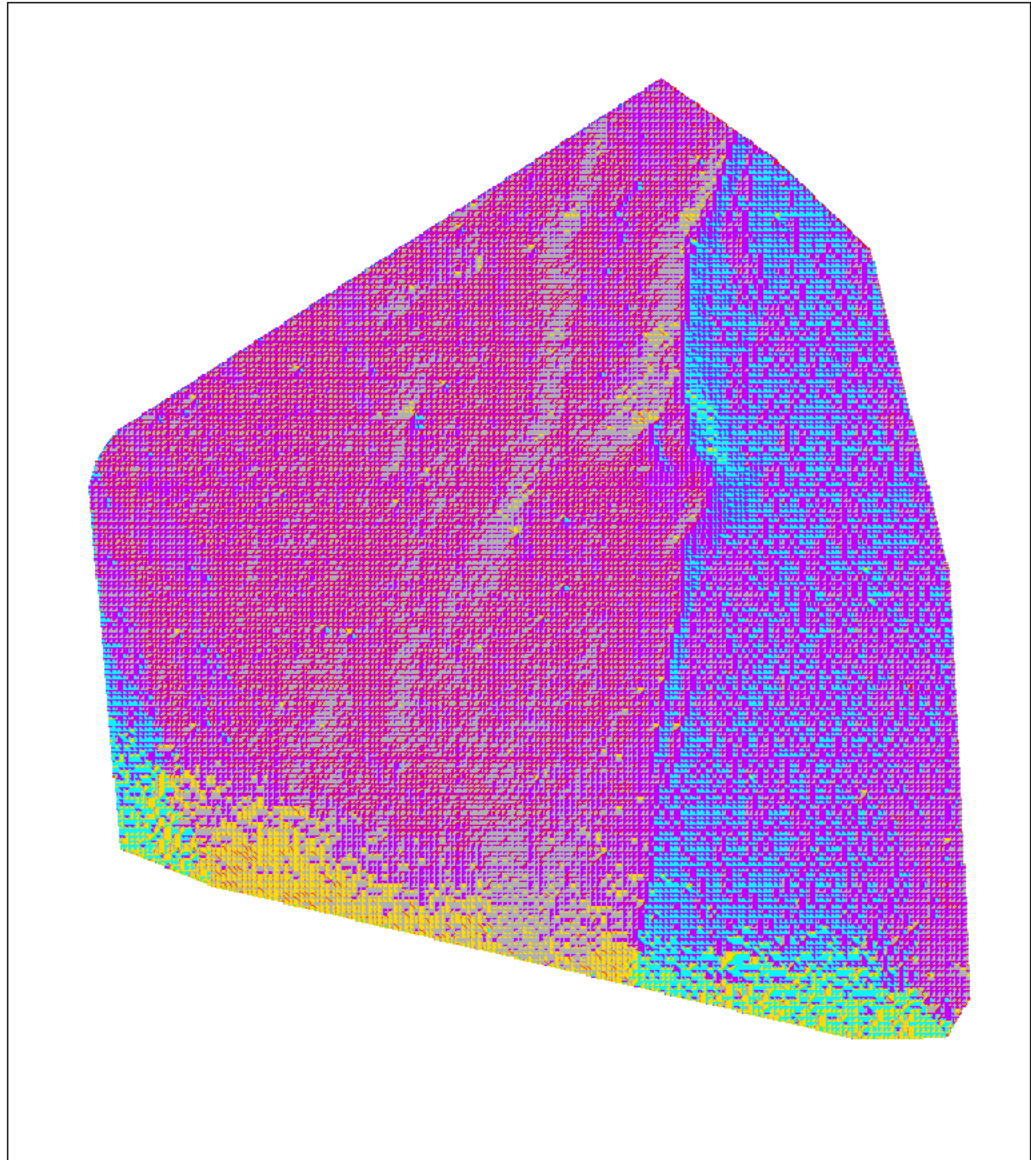
m n.m.	
	< 1 190
	1 190 - 1 200
	1 200 - 1 210
	1 210 - 1 220
	1 220 - 1 240
	1 240 - 1 260
	1 260 - 1 280
	1 280 - 1 300
	> 1 320

Příloha č. 11

RASTR SLONITOSTÍ - LIDAR



RASTR SMĚRY ODTOKU - LIDAR

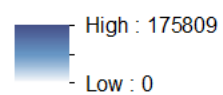
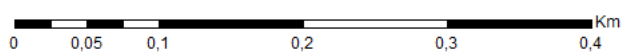
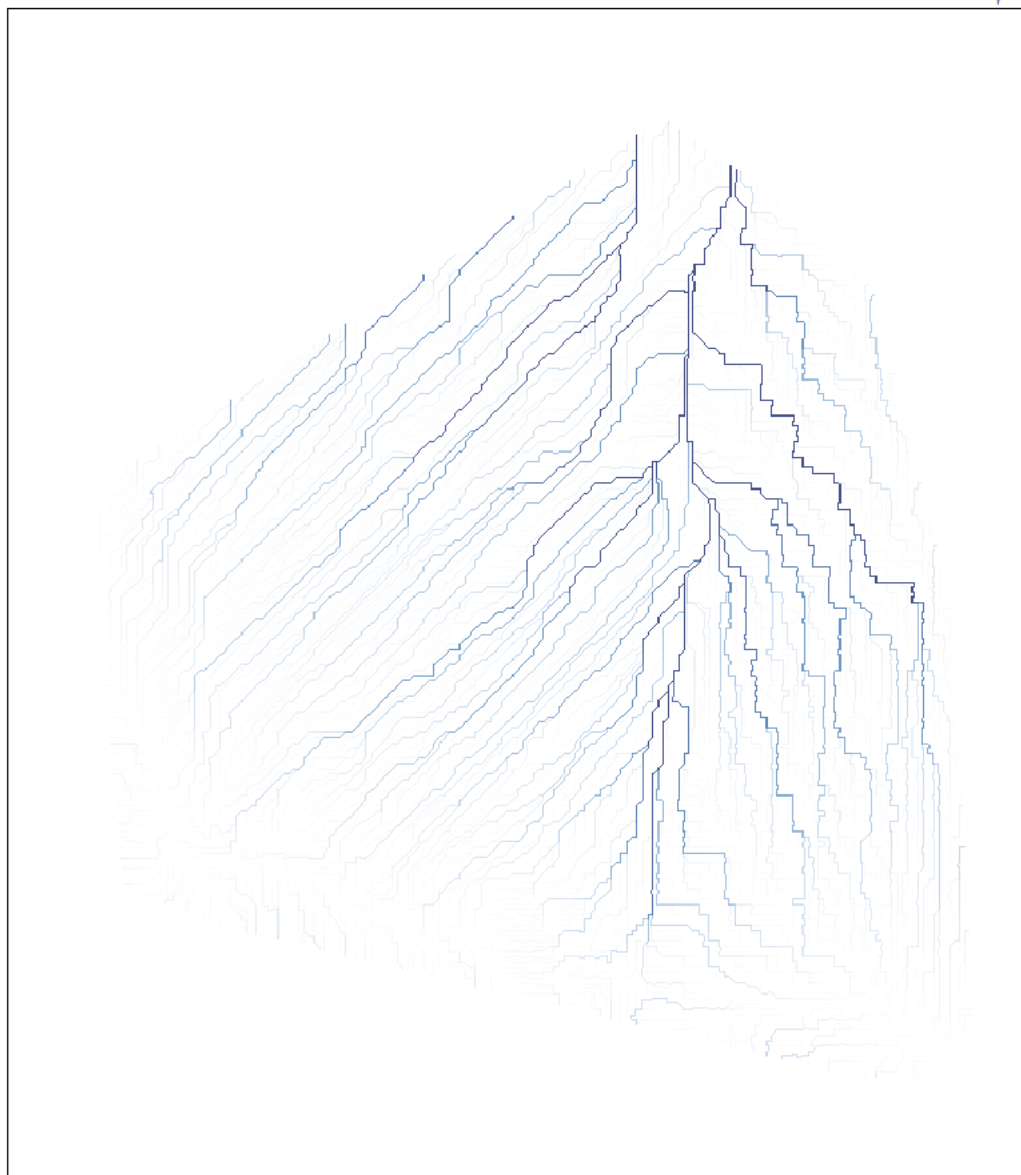


ODTOK

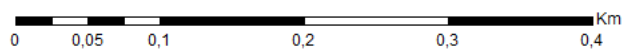
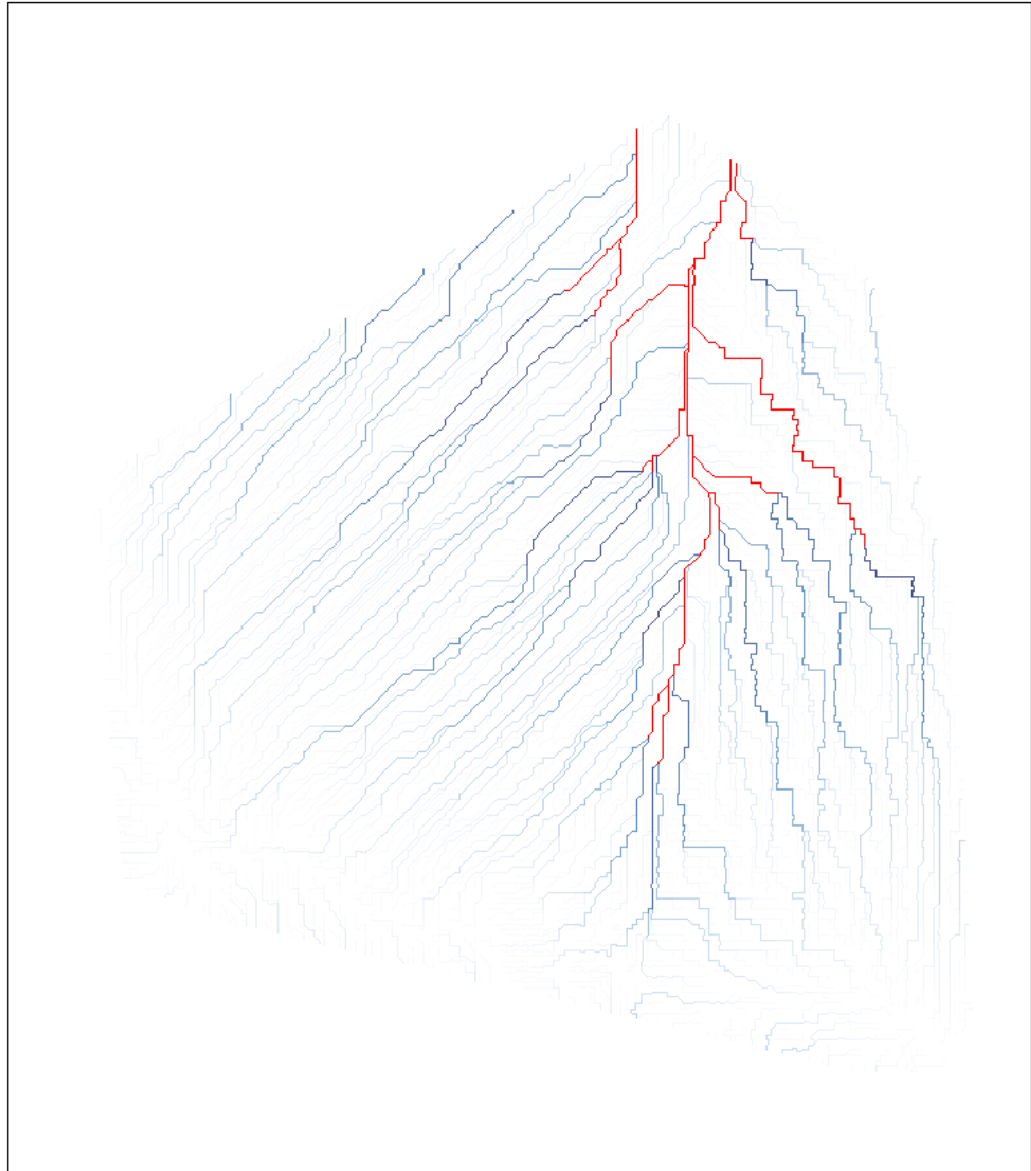
východ	západ
jhovýchod	severozápad
jh	sever
jhozápad	severovýchod


Příloha č. 13


RASTR AKUMULACE - LIDAR




Příloha č. 14

RASTR AKUMULACE A SOUSTŘEDĚNÉHO
POVRCHOVÉHO ODTOKU - LIDAR

 POVRCHOVÝ ODTOK

 Max : 175809

 - Min : 0