

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ
KATEDRA APLIKOVANÉ GEOINFORMATIKY A
ÚZEMNÍHO PLÁNOVÁNÍ

GEOMORFOMETRICKÁ CHARAKTERISTIKA REKULTIVOVANÝCH A
NEREKULTIVOVANÝCH VÝSYPEK
DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vedoucí práce: Ing. Vítězslav Moudrý, Ph.D.

Diplomant: Bc. Tomáš Svárovský

2018

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Geomorfometrická charakteristika rekultivovaných a nerektivovaných výsypek“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Vítězslava Moudrého, Ph.D. a že jsem uvedl všechny literární prameny, ze kterých jsem čerpal.

Prohlašuji, že tištěná verze se shoduje s verzí odevzdanou přes Univerzitní informační systém.

V Praze 10. 12. 2018

.....

Poděkování:

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Vítězslavu Moudrému, Ph.D. za vedení diplomové práce a za poskytnuté odborné rady a pomoc.

V Praze 10. 12. 2018

.....

Abstrakt

Přestože má těžební činnost klesající trend, stále se můžeme setkat se změnami, které tato činnost zanechává v naší krajině. V České republice jde zejména o oblast Mostecké pánve v severních Čechách. Na vytěženém území jsou prováděny různé způsoby rekultivace, jež mají dopad na jeho budoucí, zejména biologickou kvalitu. Zásadní vliv má zejména úprava terénu. Aby bylo možné tato území adekvátně posoudit, je třeba umět identifikovat a rozlišit terénní útvary vyskytující se na rekultivovaných a nerekulitovaných územích. K tomu mohou být využity technologie GIS a DPZ. V této práci je popsán způsob jejich konkrétního využití, zahrnující klasifikaci lidarových dat, nalezení vhodných geomorfometrických charakteristik včetně měřítka a identifikaci typických útvarů nerekulitovaných výsypek. Klasifikace lidarových dat byla provedena v softwaru LAStools. Pomocí geomorfometrických charakteristik aspect, slope, curvature, SDE, TPI, TRI a TWI v měřítku 2 a 5 metrů byla provedena neřízená klasifikace a bylo zjištěno, že tímto postupem není možné jednoznačně identifikovat typické útvary nerekulitovaných výsypek.

Klíčová slova: LiDAR, digitální výškové modely, terénní analýzy, výsypky, rekultivace

Abstract

Although the mining activity has downhill trend, we can still meet the changes in our landscape caused by it. In the Czech Republic especially in the area of Mostecka basin in the north of Bohemia. Different reclamation methods are carried out in worked-out area which have an impact on its future, mainly biological quality. Particularly terrain modification is of crucial importance. In order to adequately assess these areas, it is necessary to identify and distinguish terrain features occurring in reclaimed and non-reclaimed sites. GIS and remote sensing technologies can be used with this purpose. This diploma thesis describes the method of their specific use, covering LiDAR data classification, suitable geomorphometric attributes including scale length finding and typical landforms of non-reclaimed spoil-heaps identification. The LiDAR data was classified via LAStools. Unsupervised classification was performed with 5 and 20 m scale length geomorphometric attributes aspect, slope, curvature, SDE, TPI, TRI, TWI and was found that typical landforms of non-reclaimed spoil-heaps is not possible to identify clearly.

Keywords: LiDAR, digital elevation models, terrain analysis, spoil heaps, reclamation

Obsah

1. Úvod	1
2. Literární rešerše	2
2.1. <i>Metody získávání dat pro tvorbu digitálních výškových modelů.....</i>	<i>2</i>
2.1.1. Fotogrammetrie	2
2.1.2. Radarová interferometrie	3
2.1.3. LiDAR	3
2.2. <i>Bodová mračna</i>	<i>6</i>
2.2.1. Příprava dat	6
2.2.2. Klasifikace ground bodů	7
2.3. <i>Digitální výškové modely.....</i>	<i>7</i>
2.4. <i>Datové formáty</i>	<i>8</i>
2.5. <i>Geomorfometrické analýzy</i>	<i>11</i>
2.5.1. Slope.....	11
2.5.2. Aspect	12
2.5.3. Curvature	13
2.5.4. Flow direction.....	14
2.5.5. Flow accumulation.....	16
2.5.6. TPI.....	16
2.5.7. TWI.....	16
2.5.8. TRI.....	17
2.5.9. SDE.....	17
2.5.10. Land cover, land use, landforms	18
2.6. <i>Datové analýzy</i>	<i>18</i>
2.6.1. Principal component analysis	18
2.6.2. Neřízená klasifikace.....	19
2.7. <i>LAStools.....</i>	<i>19</i>
3. Metodika	21
3.1. <i>Charakteristika území</i>	<i>22</i>
3.2. <i>Data</i>	<i>23</i>
3.3. <i>Postup</i>	<i>24</i>
3.4. <i>Zpracování lidarových dat</i>	<i>24</i>

3.4.1. Příprava dat pro vytvoření DEM.....	24
3.4.2. Klasifikace vegetace	25
3.5. <i>Vytvoření DEM</i>	26
3.6. <i>Výpočty geomorfometrických charakteristik</i>	26
3.6.1. Slope a aspect	26
3.6.2. Curvature	26
3.6.3. Flow direction	27
3.6.4. Flow accumulation.....	27
3.6.5. TPI.....	27
3.6.6. TRI.....	28
3.6.7. SDE.....	28
3.6.8. TWI.....	28
3.7. <i>Analýzy dat</i>	29
4. Výsledky	30
5. Diskuze	35
6. Závěr.....	36
7. Přehled literatury	37
8. Seznam obrázků.....	43
9. Seznam tabulek	44

1. Úvod

Hnědé uhlí bylo po mnoho desetiletí využíváno primárně v hnědouhelných elektrárnách. V současné době má tento způsob využití klesající trend a se snižováním spotřeby hnědého uhlí k výrobě elektřiny a tepla počítá i aktuální Státní energetická koncepce České republiky. I přes tyto skutečnosti je povrchová těžba hnědého uhlí v České republice prvkem, který výrazně ovlivňuje vzhled a funkci krajiny. Těžební činností v oblasti Mostecké pánve bylo zasaženo a pozměněno území s rozlohou přibližně 250 km² (Vráblíková et Vráblík 2012).

Přestože je v České republice obnova vytěžených území stanovena zákonem (Zákon č. 44/1988 Sb.), který udává povinnost vytvářet v průběhu důlních činností finanční rezervy, které budou použity na sanaci a rekultivaci těžbou ovlivněného území, ne vždy jsou tyto prostředky využity vhodným způsobem. Tradiční, ve většině případů technické způsoby rekultivace používané plošně, bez zohlednění všech souvisejících aspektů, jsou často ekonomicky a ekologicky kontraproduktivní (Sádlo et Tichý 2002). V ideálním případě by péče o vytěžená území měla zahrnovat nejen zákonem ukládanou povinnost rekultivace, ale měla by zohledňovat i další důležité aspekty, mezi něž patří budoucí funkční ale i biologické využití (Vojar et al. 2012).

Vztahy mezi heterogenitou prostředí, rychlostí sukcese a mírou biodiverzity jsou obecně známé. Zatímco uniformní prostředí technicky rekultivovaných oblastí nenabízí mnoho příležitostí k vývoji druhově bohatých společenstev, území ponechaná samovolnému vývoji, případně území, jejichž sukcese je vhodným způsobem řízena a usměrňována, vykazují mnohem větší pestrost a stabilitu. To, jestli existují nějaké interakce mezi výskytem konkrétních druhů a geomorfologií terénu zatím nevíme. V dnešní době je však k dispozici mnoho technologií, které nám mohou pomoci geomorfologické vlastnosti terénu nejen popsat, ale i odhalit rozdíly mezi oblastmi s různými způsoby provedené rekultivace a v budoucnu těchto znalostí využít, například k predikci vzniku určitých biotopů.

Hlavním cílem práce je s pomocí technologií GIS a DPZ nalézt takové geomorfometrické charakteristiky, které by umožnily rozlišit terénní prvky vyskytující se na bývalých těžebních územích, jakými jsou například typické vlnovité útvary vznikající při sypání zeminy a identifikovat tak způsob provedené rekultivace.

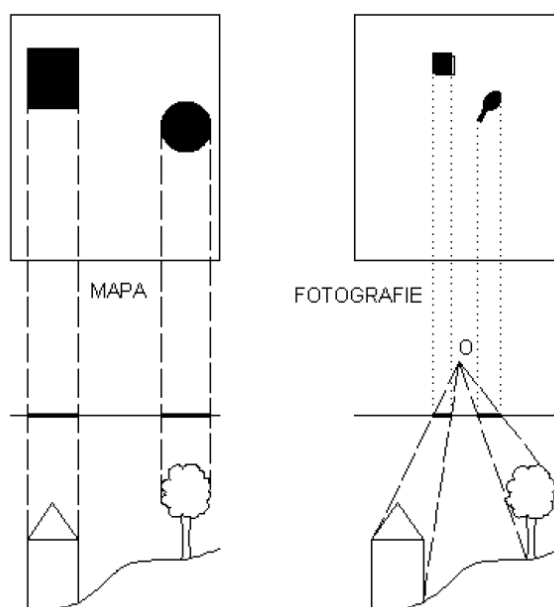
Mezi dílčí cíle patří: (i) přesná klasifikace bodového mračka z leteckého laserového skenování; (ii) nalezení vhodných charakteristik pro neřízenou klasifikaci terénních útvarů; a (iii) nalezení vhodného měřítka pro výpočet těchto charakteristik.

2. Literární rešerše

2.1. Metody získávání dat pro tvorbu digitálních výškových modelů

2.1.1. Fotogrammetrie

Fotogrammetrie je pasivní metoda DPZ, při níž jsou postupně pořizovány částečně se překrývající snímky povrchu Země, z nichž jsou poté získávány potřebné prostorové informace. Zpracovávání tzv. měřických snímků a získávání těchto informací se v dnešní době provádí většinou digitálně. Měřický snímek je středovým průmětem



Obrázek 1 Ortogonální a centrální projekce (Pavelka 2009)

(centrální projekcí) fotografované oblasti. Kvůli vzniklému zkreslení, danému centrální projekcí, nelze snímky měřit přímo, ale je nutné je převést na pravouhlý průmět (ortogonální projekci). Ortogonální projekce = snímek, centrální projekce = mapa OBRÁZEK 1. Georeferencování je zajištěno pomocí vlíčovacích bodů. Vlícovací body jsou objekty ve fotografovaném terénu, se známými polohovými i výškovými souřadnicemi, které lze na pořízených měřických snímcích jednoznačně rozpoznat (VUGTK ©2018).

2.1.2. Radarová interferometrie

Dostupnost a využití digitálních výškových modelů je na vzestupu již po mnoho let. Zatímco v minulosti byly tyto modely vytvářeny především z topografických map, případně fotogrammetricky, v dnešní době se pro jejich tvorbu hojně využívá radarová interferometrie (Köthe et Bock 2009). Radarové interferometrie je aktivní metodou DPZ, při níž jsou vstupní data získávána pomocí družic pohybujících se na oběžné dráze. Na rozdíl od optických systémů, jsou vysílány a vyhodnocovány radiové vlny, které dokáží pronikat oblačností a srážkami, výhodou je rovněž nezávislost na přítomnosti denního světla (Chen et al. 2014). Základem metody je princip RADAR (Radio Detection and Ranging), v případě použití na družicích, se jedná o SAR (Synthetic Aperture Radar) (Dobrovolný 1998). SAR je konzistentní zobrazovací metoda využívaná k mapování povrchu Země. InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) využívá fázových rozdílů minimálně dvou SAR snímků, pořízených z oběžné dráhy Země, za mírně odlišných podmínek (pozice a čas). Z těchto snímků je dále možné získávat rozličné geofyzikální informace (Bamler et Hartl 1998). InSAR a DInSAR (Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar) jsou metody využívané ke snímání zemského povrchu a tvorbě digitálních modelů terénu (Baselice et al. 2009) nebo sledování změn terénu v průběhu času (Zebker et Villasenor 1992). Přesnost výsledných modelů je závislá zejména na vlastnostech použitého radaru, množství vstupních dat a časové dekorelaci (Wegmüller et al. 2009). Za pomoci InSAR technologie byl v roce 2000 vytvořen digitální výškový model Země označovaný jako SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) DEM. Model má rozlišení od 1 do 3 úhlových vteřin a zahrnuje území mezi 60° severní a 57° jižní zeměpisné šířky (Rabus et al. 2002).

2.1.3. LiDAR

Další metodou s úspěchem používanou zejména v oblastech s vegetačním pokryvem, kde není možné využít klasických technik jako je již zmiňovaná fotogrammetrie, je metoda LiDAR (Light Detection and Ranging), také nazývaná ALS (Airborne Laser Scanning) (Liu 2008). LiDAR je aktivní metoda DPZ, využívající pro snímání povrchu vlastní zdroj elektromagnetické energie, kterým je jednotka, vysílající laserový paprsek (Vosselman et Mass 2010). Termínem LiDAR se velmi často nazývá samotná technologie snímání zemského povrchu, ale i zařízení, pomocí něhož je snímání prováděno (Gallay 2013). Ve většině případů je zařízení pro snímání povrchu

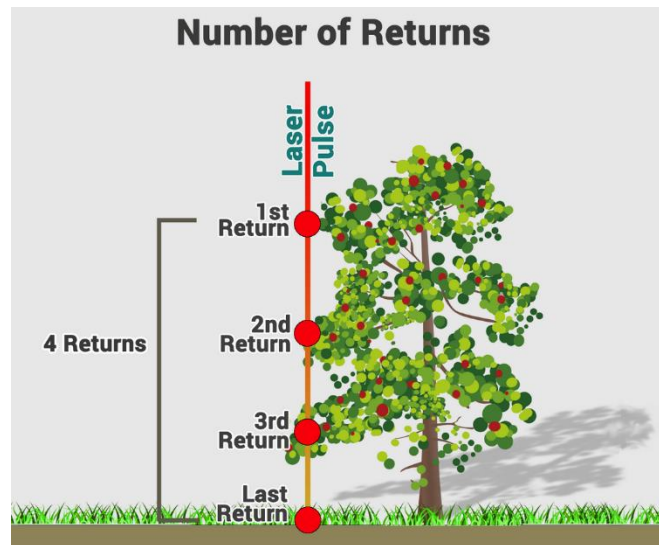
přípevněno na pohyblivém nosiči, jako je letadlo, automobil apod. (Lim et al. 2003). Podle použitého nosiče laserového skeneru, můžeme rozlišovat více druhů laserového skenování. ALS (Airborne Laser Scanning) v případě použití létajícího nosiče, obvykle letadla, vrtulníku, ale stále častěji i bezobslužných létajících zařízení – dronů. Tento druh skenování je nejčastěji používán pro mapování menších, až středně velkých území. TLS (Terrestrial laser Scanning) v případě použití stacionárního skeneru umístěného na stativu. Nejčastější je použití pro malá území, stavby, nebo průmyslové objekty. MLS (Mobile Laser Scanning) v případě použití automobilů, případně jiných pozemních prostředků. Obvyklé využití je při mapování měst a dopravní infrastruktury (Demantke et al. 2011).

Předností laserového skenování je jeho vysoká přesnost, která je vyšší ve vertikálním než v horizontálním směru. Je ovlivněna zejména použitým GNSS zařízením, úhlem snímání a samozřejmě také typem snímaného povrchu (Vosselman et Maas 2010). Technologie laserového skenování způsobila revoluci v získávání 3D dat. Jde o metodu s rychlým rozvojem a širokým uplatněním. Může být použita pro získávání dat z velmi rozlehlých území o velikostech stovek tisíců km², kdy se vytváří rozličné modely znázorňující vlastnosti povrchu Země, ale i v případech, kdy je třeba získat modely různých antropogenních prvků, nebo dalších objektů o velikosti menší než 1 m³ (Pfeifer et Briese 2007). Na rozdíl od zpracovávání obrazových dat, není v případě LiDARu nutné provádět geometrické, atmosférické a jiné korekce (Chen 2007) a použití není vzhledem k charakteru laserových paprsků limitováno přítomností slunečního světla, takže ho lze úspěšně provádět i v noci. Problémy může naopak způsobovat oblačnost a znečištění vzduchu různými aerosoly (Young 2011).

Metoda je založena na podobném principu jako RADAR, s tím rozdílem, že namísto radiových vln, jsou vysílány a měřeny vlny světelné (Young 2011). Laserový paprsek je v pulsech vysílán tzv. laserovým skenerem směrem ke snímanému povrchu, od něhož se postupně odráží, je přijímán zpět a každý jednotlivý odraz je zaznamenán jako bod **OBRÁZEK 2**. Obecně je výšková poloha každého bodu, určena dobou potřebnou k jeho návratu zpět, georeferencování je dosaženo pomocí IMU (Internal Measurement Unit) a GNSS (Global Navigation Satellite System) (Lim et al. 2003). V současné době existují dva druhy skenerů, lišící se způsobem záznamu odraženého paprsku. Konvenční, v anglické literatuře nazývaný jako discrete a full-waveform. Full-waveform skener dokáže na rozdíl od konvenčního, zaznamenat nejen jednotlivé

odrazy, ale i vlnovou křivku odraženého paprsku (Gojda et al. 2013). Výsledkem skenování je georeferencované 3D mračno bodů (point clouds), definovaných jednotlivými odrazy laserového paprsku (Baltsavias 1999). Každý bod má určenou šířku, délku a elipsoidickou výšku v referenčním systému WGS84. Tyto údaje mohou být převedeny do požadovaného místního referenčního systému (Liu et al. 2007).

Ačkoliv se způsob využití lidarových může lišit, většinou se provádí za účelem získávání různých výškových modelů. Většina technik rovněž obsahuje stejné



Obrázek 2 LiDAR – Odrazy laserových paprsků (GISGeography ©2018)

základní postupy, které však mohou být vykonávány v jiném pořadí. Mezi tyto techniky patří příprava dat před vlastním zpracováním, filtrace a interpolace bodů představujících terén (Chen et al. 2017). Rozdělení na body představující terén a body představující ostatní prvky, je jedním z kritických kroků činnosti, nazývané klasifikace lidarových dat. Automatické rozdělení těchto bodů je nečekaně složité, zejména pro velké oblasti s různorodými terénními charakteristikami (Silván-Cardenas et Wang 2006). Pro to, aby bylo možné rozlišit, co jednotlivé body představují neboli od kterých objektů se při snímání odrazily, bylo vypracováno mnoho klasifikačních technik a algoritmů (Zhang et al. 2013). Zatímco v případě diskrétních dat, klasifikujeme většinou vícenásobné odrazy jednotlivých laserových pulsů, v případě full-waveform dat, máme navíc k dispozici kompletní průběh odraženého pulsu, včetně jeho tvaru, což nám může poskytnout další užitečné informace (Jutzi et Stilla 2005). Přestože full-wave form data poskytují oproti diskrétním mnohem více informací, většinou se v případě vytváření digitálních výškových modelů setkáváme s jejich převodem do diskrétní formy a využitím větší hustoty bodů ke zpřesnění výsledného modelu (Chen

at al. 2017). Klasifikace diskrétního lidarů se provádí zejména podle počtu a pořadí odrazů paprsků laserového pulsu, označovaných jako echo a return, nebo česky návrat, či odraz. Z každého vyslaného laserového pulsu je zaznamenán minimálně jeden odraz, přičemž ve většině případů platí, že poslední odraz představuje terén, případně větší antropogenní objekty nad ním, první a další odrazy se využívají ke klasifikaci vegetace (Gojda et al. 2013). V případě, že potřebujeme rozlišit konkrétní druhy terénních prvků, nebo jejich pokryv (vodní plochy, plochy pokryté sněhem apod.), je možné využít intenzity laserového paprsku, ovlivněné zejména odrazovou schopností konkrétního povrchu (Song et al. 2002). Pomocí klasifikace full-waveform dat a vztahů mezi sousedními vlnami, je kupříkladu možné provádět analýzy struktury lesních porostů (Reitberger et al. 2006), nebo díky rozdílnému průřezu vln vytvářet 3D modely zastavěných území (Mallet et al. 2008).

2.2. Bodová mračna

2.2.1. Příprava dat

Využívání lidarových dat nahradilo v řadě zemí tradiční fotogrammetrii a stalo se tak primární technikou využívanou ke tvorbě digitálních výškových modelů (Vosselman 2000). Klíčovým předpokladem k vytvoření přesného digitálního výškového modelu je příprava dat. Některé body lidarového mračna, tzv. outliers, jsou ze systémových i jiných příčin mnohem níže, nebo výše než body ostatní. Tyto body jsou jedním z častých důvodů selhávání algoritmů pro určování ground bodů, založených na předpokladu, že jako ground je označen vždy nejnižší bod v buňce (Zhang et Lin 2013, Lin et Zhang 2014, Chen et al. 2017). Rozlišujeme dva základní druhy outliers – globální, jejichž výška je mimo rozsah výšky všech bodů a lokální, kdy je výška bodů mimo rozsah výšky sousedních bodů (Chen et al. 2017). Automatické odstranění těchto bodů není z důvodu jejich rozdílnosti jednoduché a většinou je nutný lidský zásah (Lin et Zhang 2014). Možnou technikou, vedoucí k jejich odstranění je použití histogramů a Delaunayho triangulace (Silván-Cárdenas et Wang 2006). Pomocí histogramů je definován výškový rozsah všech bodů a body, které leží mimo, jsou většinou globální outliers. Lokální outliers jsou identifikovány jako body s rozdílnou výškou oproti sousedním bodům, definovaných Delaunayho triangulací (Meng et al. 2009).

2.2.2. Klasifikace ground bodů

Zcela zásadním krokem při tvorbě digitálních výškových modelů je určení ground bodů. Třebaže bylo na toto téma provedeno velké množství studií, základní techniky a principy se většinou příliš neliší. Nejdříve bývají stanoveny základní ground body, většina metod používá již zmiňované nejnižší body v buňce. Zbylé body jsou určeny pomocí analýzy prostorové korelace mezi přednastavenými ground body a ostatními neklasifikovanými body. Na rozdíl od non-ground bodů, v případě ground bodů obvykle platí, že čím jsou dva body od sebe vzdálené méně, tím je mezi nimi menší výškový rozdíl. Na základě tohoto pravidla je možné nastavit přípustnou hranici sklonu mezi dvěma body a porovnat sklon přednastavených ground bodů vůči všem ostatním. Pokud je sklon menší, je to pravděpodobně způsobeno změnou terénu a body jsou označeny jako ground. Pokud je naopak sklon větší, dá se obvykle předpokládat, že ho způsobil nějaký objekt na terénu a bod je označen jako non-ground.

Toto značně zjednodušené pravidlo bylo již mnohokrát rozšířeno a upraveno, nicméně lze říci, že použití hranic určitých geomorfometrických charakteristik je základem všech algoritmů filtrujících ground a non ground body (Chen et al. 2017). Použití algoritmů využívajících sklonu mezi body může být vhodné u jednodušších typů terénu a v urbanizovaných oblastech, bohužel pro silně zalesněné a proměnlivé typy terénu neposkytuje příliš dobré výsledky (Evans et Hudak 2007). Pro zalesněné a rozsáhlé oblasti se naopak ukazují jako úspěšné algoritmy vyhodnocující zakřivení (Haugerud et Harding 2001, Evans et Hudak 2007).

2.3. Digitální výškové modely

DEM (Digital Elevation Model) jsou digitální výškové modely, reprezentují povrch Země v různých měřítcích (Guth 2006) a v dnešní době představují nejběžnější metodou poskytování topografických informací (Singh et al. 2007). Pro znázornění povrchu Země pomocí těchto modelů existuje mnoho metodických pokynů a současně i nepřehledné množství geomorfometrických nástrojů obsažených v GIS aplikacích (Malvić et al. 2009). Metody vytváření digitálních výškových modelů se ve většině případů liší podle typu krajiny. Rozdílné algoritmy jsou používány v zalesněných nebo obydlených oblastech (Chen et al. 2017).

Termínem DEM označujeme modely obsahující geoprostorové informace popisující převýšení zemského povrchu v rovině. Pokud modely obsahují pouze spodní část dat,

náležících k terénním prvkům a charakteru krajiny používá se označení DTM (Digital Terrain Model) (Desmet and Govers 1996, Kamp et al. 2005, Singh et al. 2007). V případě, že jsou modely získávány pomocí převodu z lidarových dat, je možné je vytvářet ve vysokém rozlišení a vykazují vysokou přesnost (Evans et al. 2011). Lidarová data obsahují body, reprezentující terén a všechny ostatní prvky. Interpolací celého souboru těchto dat, je možné získat DSM (Digital Surface Model), digitální model povrchu. Pokud využijeme pouze body reprezentující terén, získáme DTM, digitální model terénu. Často se můžeme setkat s používáním termínu DEM pro modely vzniklé použitím terénních bodů, což může být matoucí. Zatímco DTM je vytvořen za pomoci bodů představujících „holý“ povrch Země, DSM je výškový model povrchu obsahující informace o antropogenních prvcích, nebo vegetačním pokryvu (Chen et al. 2017). V této souvislosti představuje DEM obecný termín, který může představovat jak DTM, tak DSM, nebo jakýkoliv jiný výškový model (Köthe et Bock 2009, Chen et al. 2017). V této práci je pro obecné výškové modely používán termín DEM, nebo digitální výškový model, v případě konkrétních modelů představujících terén, nebo jiné prvky, je toto upřesněno.

Využití digitálních výškových modelů je velmi široké, od vojenských a vědeckých analýz až po videohry (Guth 2006). Obsahují zásadní informace potřebné v mnoha odvětvích, zabývajících se zemským povrchem a krajinou a stále častěji nahrazují doposud používané topografické mapy. Pro analýzy zemského povrchu jsou používány v mnoha vědních disciplínách, např. jako základ pro modelování záplavových oblastí, výpočet solárního potenciálu, v archeologických výzkumech apod. (Gallant et al. 2011).

Z digitálních výškových modelů je možné vytvářet mnoho dalších geomorfometrických charakteristik, jako je sklon a aspect (Bobstad et Stove 1994), planform a profile curvature, nebo topography wetness index (Gessler et al. 2000). V případě, že jsou modely používány v hydrologických analýzách je většinou nutné provést další speciální úpravy, spočívající ve vyplnění propadů terénu (Wang et Liu 2006).

2.4. Datové formáty

Formát LAS se stal standardem používaným při zpracování dat (bodových mračen) získaných z laserového skenování, ale i z fotogrammetrických metod. Standard

popisující tento formát vytvořila a spravuje ASPRS (The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing). První verze označovaná jako LAS 1.0 byla vydána již v roce 2003. Poslední platnou verzí je LAS 1.4 - R13 z července roku 2013. Již od verze 1.2 je povinnou součástí souboru vždy i způsob klasifikace OBRÁZEK 4 a také způsob záznamu dat, označovaný jako PDRF (Point Data Record Format) OBRÁZEK 3. Způsob klasifikace určuje číselné hodnoty, které se přiřazují k bodům reprezentujícím určité druhy povrchů, nebo objektů. Můžou představovat terén, vegetaci, vodní plochy, různé antropologické prvky, ale i chybně zaznamenané nebo neklasifikované body. Způsob klasifikace se v jednotlivých verzích LAS více méně neměnil, pouze se rozrůstal o další klasifikační kategorie, a proto je platný pro více druhů PDRF najednou. Způsob záznamu dat, PDRF, se s jednotlivými verzemi LAS vyvíjel a měnil a v současné době je formátem LAS 1.4 podporováno 11 různých verzí, z nichž poslední je verze 10. PDRF popisuje datové typy a velikost proměnných používaných pro zápis důležitých informací, jimiž jsou souřadnice, intenzita pulzu, GPS čas, nebo hodnoty RGB (RedGreenBlue) a NIR (Near Infrared Reflectance). (ASPRS ©2018).

Table 17: ASPRS Standard LIDAR Point Classes (Point Data Record Formats 6-10)

Classification Value	Meaning
0	Created, never classified
1	Unclassified ³
2	Ground
3	Low Vegetation
4	Medium Vegetation
5	High Vegetation
6	Building
7	Low Point (noise)
8	Reserved
9	Water
10	Rail
11	Road Surface
12	Reserved
13	Wire – Guard (Shield)
14	Wire – Conductor (Phase)
15	Transmission Tower
16	Wire-structure Connector (e.g. Insulator)
17	Bridge Deck
18	High Noise
19-63	Reserved
64-255	User definable

Obrázek 3 Záznam dat – PDRF (Point Data Record Format)

Table 17: ASPRS Standard LIDAR Point Classes (Point Data Record Formats 6-10)

Classification Value	Meaning
0	Created, never classified
1	Unclassified ³
2	Ground
3	Low Vegetation
4	Medium Vegetation
5	High Vegetation
6	Building
7	Low Point (noise)
8	Reserved
9	Water
10	Rail
11	Road Surface
12	Reserved
13	Wire – Guard (Shield)
14	Wire – Conductor (Phase)
15	Transmission Tower
16	Wire-structure Connector (e.g. Insulator)
17	Bridge Deck
18	High Noise
19-63	Reserved
64-255	User definable

Obrázek 4 Klasifikační třídy LAS, verze 1.4 – R13

Formát LAZ je souborový formát vzniklý komprimací souboru ve formátu LAS, jehož výhodou je výrazně menší velikost vzhledem k původnímu souboru, bez ztráty informací. Velikost komprimovaného souboru je mezi 7 a 25 procenty velikosti souboru původního. Komprese je proveditelná pomocí nástroje LASzip, který je součástí softwarového balíku LAStools. Zdrojový kód nástroje je dostupný s open source copyleftovou licencí LGPL (Lesser General Public License).

Formát ASCII je textový binární formát, který v případě využití pro záznam lidarových dat je uspořádán tak, že každá řádka představuje výpis atributů jednotlivých odrazů laserového pulsu. I když je tento formát lehce přizpůsobitelný a snadný pro porozumění, pro uchování obrovského množství dat o odrazech laserových pulsů je poměrně nešikovný. Velikost značně narůstá a práce s ním se stává neefektivní. Právě kvůli těmto skutečnostem byl ASPRS vytvořen jednoduchý binární souborový formát LAS, který je podrobněji popisován v jedné z předchozích kapitol (Isenburg 2013).

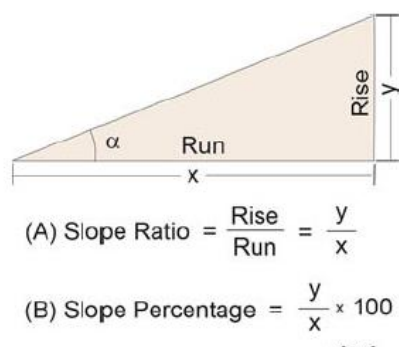
2.5. Geomorfometrické analýzy

Geomorfometrie je moderní analyticko-kartografický přístup, jak znázornit vlastnosti zemského reliéfu za pomoci počítačem zpracovaných informací (Tobler 2000). Je to mezioborová disciplína, jež se postupně vyvinula z matematiky, přírodních věd a informatiky. Třebaže je geomorfometrie považována za činnost v rámci jiných, dříve zavedených vědních disciplín, jako je geografie, geomorfologie, nebo geologie, už to v současné době není pouhá sbírka numerických technik, ale samostatná vědní disciplína (Pike 1999). Geomorfometrická analýza povrchu poskytuje kvantitativní popis tvaru a charakteristik terénu a je odvozena použitím a kombinací matematických a počítačových vědních disciplín. (Blaszczynski 1997, Pike 2000, Yong et al. 2008, Tagil et Jenness 2008, Thomas et al. 2009). Geomorfometrické parametry byly desítky let měřeny ručně z topografických map, za účelem vyhodnocení a posouzení terénních charakteristik oblasti. Topografie měla velký vliv na hydrologii, mikroklimatické charakteristiky, geologickou strukturu, uložení nerostných surovin, dynamiku terénu a vlastnosti vegetačního pokryvu (Pike 2000)

V dnešní době jsou téměř veškeré Geomorfometrické analýzy prováděny v GIS. To je dáno zejména zvyšující se dostupností vhodných vstupních dat, tak i existencí potřebných analytických nástrojů. Ve většině případů odpovídá název nástroje názvu geomorfometrické charakteristiky, kterou počítá.

2.5.1. Slope

Sklon nebo také svažitost, je řídicím faktorem v procesech probíhajících na zemském povrchu, ovlivňuje odtok a zadržování vody, půdní vlastnosti i erozní potenciál oblasti (Prasannakumar et al. 2011). Obecně je k vyjádření sklonu mezi dvěma body možné využít tří možností. OBRÁZEK 5. Konkrétně to jsou poměr, procenta, nebo úhel. Vždy



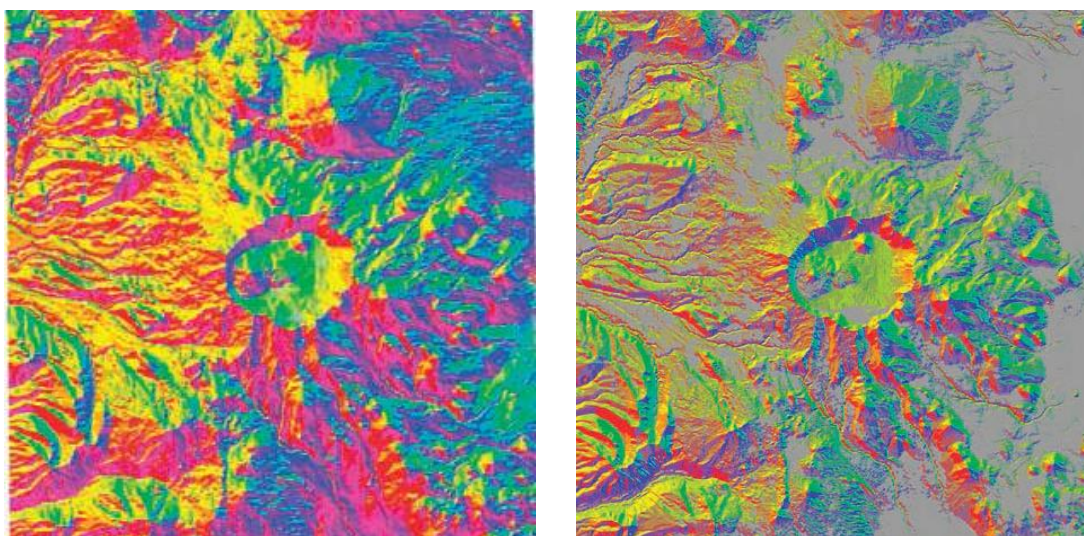
Obrázek 5 Vyjádření sklonu (Kimerling et al. 2017)

platí, že vyšší hodnota znamená vyšší sklon. Nejjednodušším způsobem, jak lze sklon vyjádřit, je poměr mezi výškou a vzdáleností dvou bodů. Procentuální vyjádření sklonu získáme vynásobením poměru mezi výškou a vzdáleností číslem 100. Třetí možností, jak sklon vyjádřit, je pomocí úhlu.

Sklon je jednou z nejčastěji počítaných charakteristik, přičemž je nejčastěji vyjadřován ve stupních, kdy nabývá hodnot od 0 do 90 a kde hodnota 0 reprezentuje rovné povrchy. Alternativně je možné, v závislosti na předpokládaném použití počítat sklon v radiánech. Vstupní vrstvou pro výpočet sklonu jsou digitální výškové modely terénu. Rastrové vrstvy sklonu jsou velmi často využívány v hydrologii, jako základ pro výpočet dalších charakteristik povrchu, kterými mohou být odtok, proudění, nebo zadržování vody v určité oblasti. Existuje několik algoritmů výpočtu hodnoty sklonu, obvykle založených na kombinaci hodnot 8 buněk obklopujících jednu střední buňku v rastru po devíti (Jenness 2007)

2.5.2. Aspect

Aspect vyjadřuje orientaci povrchu ke světovým stranám pomocí úhlu ve stupních od 0 – 359,9 stupňů po směru hodinových ručiček, kdy 0 stupňů je sever. Rovné povrchy bez sklonu, a tudíž i orientace, jsou značeny hodnotou -1 stupňů. Stejně jako mapy sklonu, jsou mapy orientace ke světovým stranám OBRÁZEK 6 (vlevo) generovány pomocí GIS aplikací většinou z rastrových digitálních modelů terénu a jsou zobrazovány pomocí barevných kategorií.



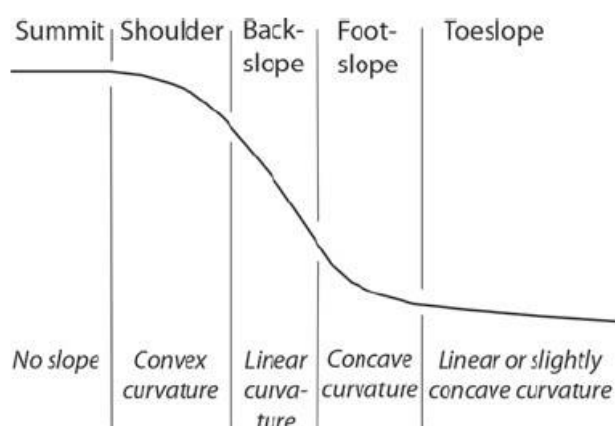
Obrázek 6 Aspect – vlevo, aspect a slope – vpravo (Kimerling et al. 2017)

V některých případech je sklon a orientace ke světovým stranám zobrazována v jednom společném výstupu – mapě OBRÁZEK 6 (vpravo). V takových případech jsou jednotlivé barvy použity pro znázornění orientace ke světovým stranám a jejich sytostí je definován sklon (Kimerling et al. 2017)

Aspect lze použít k popisu množství dopadajícího slunečního záření. V závislosti na orientaci ke světovým stranám a sklonu dochází k rozdílnému rozložení energie a vlhkosti, což má za následek celou řadu procesů, jež mohou probíhat s různou intenzitou a dobou trvání. Sluneční záření, jež je hlavním faktorem povrchové energetické rovnováhy, ovlivňuje důležité mikroklimatické podmínky, jako je povrchová teplota, evaporace a vlhkost půdy. Aspect je užitečnou charakteristikou, využívanou v různých odvětvích. Může být využíván při hledání oblastí, kde taje sníh později, osluněných oblastí vhodných pro výstavbu apod.

2.5.3. Curvature

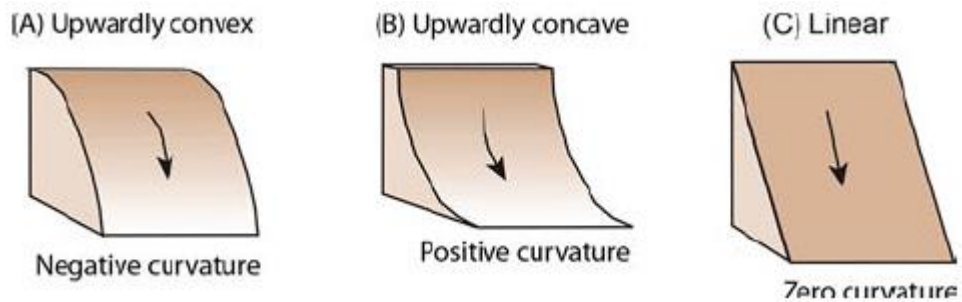
Téměř nikde na Zemi se přirozeně nevyskytuje žádný prostor, který by měl lineární povrch. Většinou je mezi dvěma body nějak zakřivený. Curvature (zakřivení) vyjadřuje míru, kterou se povrch liší od stavu kdy je plochý. Čím větší je vzdálenost, pro kterou zakřivení počítáme, tím může být potenciální zakřivení větší. Pokud se zaměříme na sklon nějakého svahu, zjistíme, že zakřivení sklonu tohoto svahu, má v jednotlivých částech různý průběh – lineární, konvexní i konkávní OBRÁZEK 7.



Obrázek 7 Rozdělení svahu a tvar zakřivení (Kimerling et al. 2017)

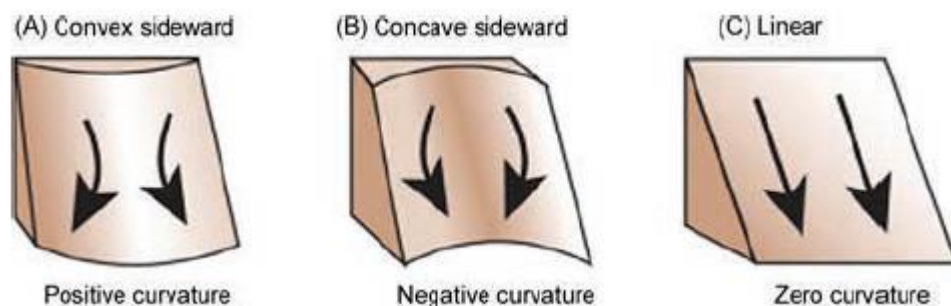
Vzhledem ke směru zakřivení, rozeznáváme profile curvature a planform curvature.

Profile curvature je zakřivení rovnoběžné se sklonem svahu OBRÁZEK 8. Negativních hodnot dosahuje, pokud je tvar povrchu konvexní, pozitivních, pokud je konkávní. Nulové hodnoty značí lineární průběh.



Obrázek 8 Profile curvature (Kimerling et al. 2017)

Planform curvature, obvykle nazývané zkráceně plan curvature, je zakřivení kolmé ke sklonu svahu a může být sbíhavé (konvergentní), či rozbíhavé (divergentní) OBRÁZEK 9. Pozitivních hodnot je dosaženo, pokud je zakřivení bočně konvexní, negativních, pokud je bočně konkávní a nulových, pokud je povrch bez bočního zakřivení – lineární.

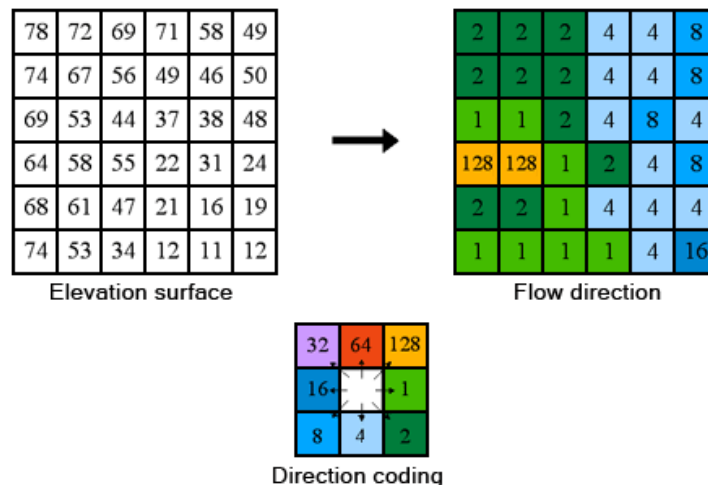


Obrázek 9 Planform curvature (Kimerling et al. 2017)

Oba druhy zakřivení – profile curvature i planform curvature, se většinou v terénu vyskytují současně a výrazně ovlivňují směr a rychlost pohybu vody a dalšího materiálu.

2.5.4. Flow direction

Pro potřeby hydrologických analýz je často nutné vypočítat vícero dílčích charakteristik povrchu, které potom slouží jako vstupní data vrstvy pro další modely. Tyto charakteristiky mají většinou rastrový formát a základem pro jejich výpočet jsou DEM. Jednou z často počítaných charakteristik je Flow direction neboli směr odtoku. Jedná se o rastr, kde je pro každou buňku vypočten směr odtoku ve směru největšího sklonu buněk sousedních. Směr odtoku je vyjádřen číselně a z každé buňky může vést osmi různými směry, k osmi sousedním buňkám OBRÁZEK 10 (Jenson et Domingue



Obrázek 10 Značení a směry odtoku D8 v ArcMap (ArcGIS ©2018)

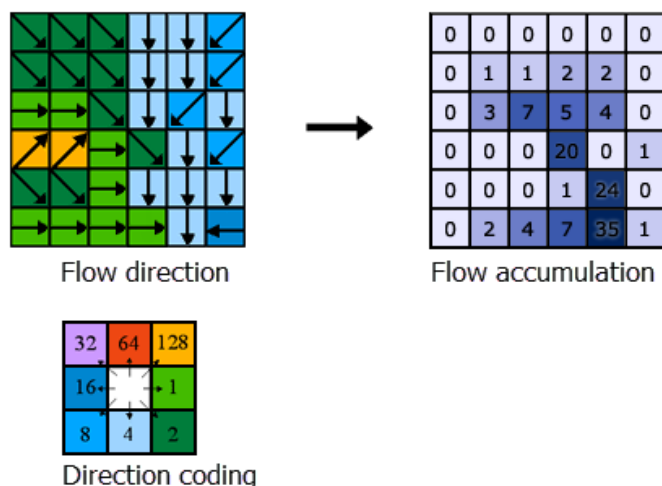
1988). Pro tento způsob výpočtu, který je zřejmě nejčastější, nicméně je pouze jedním z mnoha existujících algoritmů, se vžilo označení D8 algoritmus.

Jak již bylo naznačeno, existuje více způsobů, jak počítat směr odtoku. U algoritmu D8, označovaném jako single flow direction, se předpokládá, že voda teče pouze jedním směrem, a to přes buňku s největším sklonem. Naproti tomu algoritmy nazývané multiple flow direction počítají odtok přes všechny níže položené sousední buňky (Wolock 1995).

Zatímco Algoritmus D8 často způsobuje, že výsledné modely jsou příliš napřímené a neodpovídají skutečnosti, multiple flow direction algoritmy, mezi něž patří například MD8, jsou mnohem robustnější a tímto problémem netrpí. Konkrétně algoritmus MD8, který rozděluje množství odtoku do všech sousedních buněk podle velikosti jejich sklonu (Quinn et al. 1991), má však jiný nedostatek, jímž je přílišný rozliv na svazích s negativním (konvergentním) zakřivením, k němuž dochází vlivem odtoku do všech níže položených buněk (Seibert et McGlynn 2007).

2.5.5. Flow accumulation

Je rastrová vrstva představující akumulaci vody. Každá buňka rastru obsahuje informaci o tom, z kolika buněk do ní voda přitéká OBRÁZEK 11. Základem je vrstva směru odtoku, flow direction, vypočítaná některým ze zmiňovaných algoritmů.



Obrázek 11 Způsob výpočtu akumulace vody (ArcGIS ©2018)

2.5.6. TPI

TPI (Topographic Position Index) představuje rozdíl výšky jednotlivých bodů reprezentovaných buňkami v DEM, s průměrnou výškou jejich sousedních buněk. V případě, že má index zápornou hodnotu, znamená to, že je buňka níže než její okolí, pokud je hodnota kladná, okolí převyšuje. Pokud se hodnoty blíží nule, jedná se o ploché oblasti bez převýšení. V závislosti na zvoleném měřítku DEM je pomocí tohoto indexu možné rozlišovat velké množství landforms. Od kaňonů a horských hřbetů v případě velkého měřítka až po prolákliny a vyvýšeniny pro měřítka malá (Weiss 2001).

2.5.7. TWI

TWI (Topographic Wetness index) je index, který vyjadřuje rozložení vlhkosti v půdě. Je založen na myšlence, že terénní profil významně ovlivňuje pohyb i akumulaci vody (Kirkby et Beven 1979). Vyjadřuje teoretickou míru akumulace vody v každém bodě určitého povodí. V literatuře se můžeme setkat i s označením CTI (Compound Topographic Index).

Rastrová vrstva s hodnotami indexu se počítá za pomoci vrstev flow direction, flow accumulation a slope. Výsledný model znázorňuje oblasti s terénními prohlubněmi, kde bude docházet k zvýšené akumulaci vody. Vypočtené hodnoty jsou vždy vztažené ke konkrétní lokalitě a nejde je porovnávat s jinými oblastmi. Algoritmus pro výpočet je následující:

$$TWI = \ln \frac{\alpha}{\tan \beta}$$

Kde α je flow accumulation a β představuje sklon terénu, slope. Nižší hodnoty indexu značí oblasti s menším potenciálem k zadržování vody, větší hodnoty ukazují na místa s malým sklonem a velkou spádovou oblastí, ze které přitéká a akumuluje se voda (Wolock 1995). Topography wetness index je založen na předpokladu, že tvar terénu ovlivňuje pohyb a prostorové rozložení vody v půdě (Pradhan et al. 2006)

2.5.8. TRI

Heterogenita terénu je důležitým ukazatelem, často využívaným k odhadování biodiverzity ekosystémů a výskytu určitých druhů. TRI (Topography ruggedness index) vyjadřuje míru topografické heterogenity. Hodnoty v rastrové vrstvě představují rozdíly výškových hodnot jednotlivých buněk vzhledem k osmi sousedním buňkám. Hodnoty mohou být rozděleny do 7 kategorií TABULKA 1 (Riley 1999).

Kategorie terénu	Hodnoty TRI v m
Level	0-80
Nearly level	81-116
Slightly rugged	117-161
Intermediately rugged	162-239*
Moderately rugged	240-497
Highly rugged	498-958
Extremely rugged	959-4367

Tabulka 1 Kategorizace nerovností terénu podle Rileyho

2.5.9. SDE

Existuje mnoho způsobů, jak charakterizovat terénu. Velmi často se tak děje pomocí jeho nerovností. Kromě již popisovaného indexu TRI to může být i SDE (Standard deviation of elevation), která stejně jako TRI vyjadřuje míru nerovnosti terénu (Ascione et al. 2008) avšak vypočítaná rozdílným způsobem.

2.5.10. Land cover, land use, landforms

Termíny Land cover a land use jsou další termíny, které jsou v GIS používány ke klasifikaci zemského povrchu. Přestože oba termíny popisují odlišné charakteristiky, může být jejich rozlišení matoucí a použití nesprávné.

Land cover představuje konkrétní pokrytí povrchu, jako je les, pole, vodní plochy, nebo třeba silniční sítě, které je možné za pomoci vhodných algoritmů klasifikovat z dat získávaných různými metodami DPZ.

Land use popisuje povrch Země z hlediska lidského využívání, tedy to, jak člověk přeměnil původní krajinu, aby ji mohl využívat zamýšleným způsobem. Příkladem mohou být lesní školky, zahrady, vinice.

Landforms můžeme definovat jako specifické krajinné prvky, jimiž v rámci velkého rozlišení/měřítku mohou být kupříkladu horské hřbety, kaňony, nebo planiny. V menším měřítku můžeme pak můžeme rozeznávat jednotlivé kopce, údolí, roviny. (Blaszczynski 1997). Charakteristika landforms založená na specifických morfometrických znacích má zásadní význam v teorii geomorfometrie (Florinsky 2012).

2.6. Datové analýzy

2.6.1. Principal component analysis

PCA (Principal Component analysis), neboli analýza hlavních komponent, prováděná pomocí nástrojů v GIS, je vícerozměrná analýza, která se používá pro zjednodušení a redukci množství dat, potřebných pro další analýzy a operace. Data vstupující do této analýzy jsou na sobě většinou lineárně závislá. Je to tedy lineární transformace původních dat na nekorelovaná nová data – hlavní komponenty. Tyto hlavní komponenty obsahují dostatečné množství informací a vyjadřují většinu variability vstupních dat, potřebných ke správnému průběhu dalších analýz a operací. Použitím těchto komponent namísto původních dat, lze výrazným způsobem ušetřit výpočetní kapacity a čas.

Nástroj Principal component v ArcGIS je používán k transformaci dat vstupních vrstev, jež tvoří osy (znaky), ve vícerozměrném prostoru, do nových znaků v prostoru, jehož osy jsou vzhledem k původnímu prostoru pootočené. Osy v novém prostoru jsou nekorelované. Hlavním důvodem je komprese a odstranění nadbytečných dat.

Nadbytečná data jsou dobře patrná na příkladu vícevrstvého rastru obsahujícího převýšení, sklon a aspect. Je to proto, že sklon i aspect je vždy získáván z výškových hodnot, tudíž k vysvětlení téměř veškerých rozdílů ve zkoumané oblasti jsou tyto výškové hodnoty dostatečné.

Výsledkem PCA analýzy je multiband raster (více vrstvý rastr) s počtem vrstev rovnajícím se počtu komponent. Každá komponenta tvoří jednu osu v novém vícerozměrném prostoru. První komponentou je popsáno nejvíce variability dat obsažených v původních vstupních vrstvách, druhá popisuje data nepopsaná první a tak dále. Obvykle první tři komponenty dokáží popsat více než 95% variability původních dat, tudíž je možné zbylé informace zanedbat a komponenty vypustit – nezahrnovat do dalších výpočtů. Tím dojde ke zkrácení výpočetních časů a zároveň zůstane zachována i přesnost. (ArcGIS ©2018)

2.6.2. Neřízená klasifikace

Podstatou klasifikace je rozdělení dat do tříd podle zvolených znaků a pravidel (Anderson et al. 1976). Neřízená klasifikace je založena na principu rozdělení obrazových dat do tříd se společnými charakteristikami. Výsledkem je nová rastrová vrstva obsahující pixely roztríděné podle těchto barevně odlišených tříd (Talich et al. 2010). Toho lze využít například k automatické klasifikaci landformů z digitálních výškových modelů (Irvin et al. 1997). Výhodou neřízené klasifikace je zejména skutečnosti, že nevyžaduje znalost klasifikovaného prostředí (Kolář et al. 1997). Mezi často používané algoritmy patří například ISODATA, či K-means. V prostředí ArcGIS je neřízená klasifikace zastoupena nástrojem Iso Cluster Unsupervised Classification.

2.7. LAStools

LAStools je softwarový balík specializovaný na práci s daty pořízenými technologií LiDAR. Osahuje sadu nástrojů umožňujících prohlížení, editaci a klasifikaci dat, získaných z laserového skenování povrchu. Některé z nástrojů lze bez omezení používat jako open source software, u jiných je plné funkčnosti třeba zakoupit komerční licenci. Lze s ním provádět různé druhy operací, jako je klasifikace, převod, filtrování, triangulace, nebo tvorba digitálních modelů. Software se vyznačuje vysokou rychlostí a nízkými nároky na paměť, k čemuž přispívá možnost provádění výpočtů s volitelným počtem jader procesoru. Všechny nástroje je možné ovládat pomocí GUI (Graphic User Interface) nebo příkazové řádky. Dostupná je rovněž

integrace jednotlivých nástrojů jako toolboxů do ArcGIS, QGIS, nebo ERDAS IMAGINE. V případě, že je třeba zpracovávat obzvláště rozsáhlé datové soubory, je doporučeno využít rozšíření LAStools – BLAST, které obsahuje nástroje pro bežešvé zpracování lidarových dat a vytváření různých digitálních modelů, jenž jsou taktéž použitelné v prostředí výše zmiňovaných GIS aplikací. Datové formáty, se kterými softwarový balík dokáže pracovat jsou LAS, LAZ a ASCII (rapidlasso GmbH, 2018). Nástrojů v softwarovém balíku LAStools a BLAST je velké množství a umožňují komplexní práci s pořízenými daty, pro potřeby této práce jsou však popsány pouze nástroje použité ke klasifikaci dat zájmového území.

lasview – prohlížeč s funkcemi, které umožňují zobrazování, filtrování a editaci bodů na základě různých kritérií, jako je klasifikace, odraz, výška, intenzita, flight line, RGB a dalších.

lasnoise – označení a klasifikace izolovaných bodů nad a pod obvyklou výškou ostatních bodů. Parametry izolovanosti a výšky jsou uživatelsky volitelné. Body označené jako noise jsou klasifikovány a při dalším zpracování dat je možné je z výpočtů vyloučit.

lasheight – nástroj, který vypočítá výšku bodů nad povrchem, předpokladem je, že body představující povrch byly již klasifikovány. Pomocí tohoto nástroje je rovněž možné klasifikovat body nad nebo pod určitou výškou, nebo převádět geoidální výšku na elipsoidickou. Na základě výšky od ground bodů, lze provádět i klasifikaci nízké a střední vegetace.

lasground – slouží k rozlišení bodů představujících povrch Země od ostatních bodů. Ve výchozím nastavení klasifikuje ground body podle ASPRS standardu, tedy jako 2, ostatní jako 1. Nástroj má předdefinovaná nastavení pro různé druhy prostředí, ke kterým klasifikovaná data náleží (wilderness, nature, town or flats, city or warehouses, metropolis, custom). Toto rozlišení má zásadní vliv na klasifikaci bodů, které budou označeny jako ground.

lasclassify – nástroj pro klasifikaci budov a vysoké vegetace, předpokladem pro jeho použití je dřívější klasifikace bodů představujících povrch Země, což může být provedeno pomocí *lasground* a provedení výpočtu výšky všech bodů nad povrchem nástrojem *lasheight*.

las2dem – nástroj, který za pomoci triangulace bodů vytvoří rastrovou vrstvu povrchu. V závislosti na konkrétním nastavení to může být model terénu, model povrchu apod. Pokud je vstupní soubor v podporovaném souřadnicovém systému, automaticky se vytváří kml soubor, čímž je možné výsledek zobrazit v aplikaci Google Earth.

las2las – umožňuje pokročilé změny v klasifikaci bodů, přidání nebo změny georeferencování apod.

lascanopy – díky tomuto nástroji je možné jednoduše vytvářet modely vegetace, jako je canopy height model, canopy cover a canopy density.

3. Metodika

V oblasti zpracování geomorfologických dat pomocí GIS, existuje velká řada termínů, z nichž jsou mnohé vysvětlovány a označovány různými autory odlišně. V některých případech může být důvodem přirozený vývoj, v jiných neexistence terminologických standardů a v neposlední řadě použití počeštěných verzí termínů a zkratk používaných primárně v anglickém jazyce. To může být do značné míry matoucí, a proto je zde uveden přehled termínů, které jsou použity k popisu provedených operací a výpočtů TABULKA 2.

Pokud se v textu této práce nachází termíny psané kurzívou, jsou jimi označeny konkrétní nástroje a algoritmy použitých GIS aplikací, kapitálkami je zvýrazněno jejich nastavení. Názvy klasifikačních tříd podle ASPRS nejsou překládány, je použit jejich originální název.

Termín	Definice
First return	První odraz pulsu lidarového laseru
Last return	Poslední odraz pulsu lidarového laseru
Ground	Body lidarového mračna reprezentující terén
Non-ground	Body lidarového mračna reprezentující jiné než ground body
Noise/outliers	Body lidarového mračna označené jako chybně vyhodnocené
Klasifikace	Proces rozřídění bodů lidarového mračna do kategorií
Landform	Specifický krajinný prvek (hřbet, údolí apod.)

Tabulka 2 Termíny používané v metodice

3.1. Charakteristika území

Pro výpočet geomorfometrických parametrů, s jejichž pomocí by bylo možné porovnávat vlastnosti a vývoj nově vznikajících biotopů v oblastech poškozených těžební činností, byly vybrány dvě rozdílné oblasti v severních Čechách, u kterých byly použity naprosto odlišné způsoby rekultivace a lze u nich předpokládat značné rozdíly jak v geomorfologii, tak i ve stupních vývoje ekosystému, které na nich postupně samovolně vznikaly, nebo byly cíleně založeny OBRÁZEK 12. Jedná se o bývalé těžební oblasti, z nichž u jedné byly provedeny výrazné terénní úpravy s následnými technickými rekultivacemi, zatímco v druhé oblasti byl převážně použit lesnický rekultivační způsob, bez výrazných technických úprav terénu.



Obrázek 12 Hornjiřetínská a Radovesická výsypka

Hornjiřetínská výsypka se nachází mezi obcemi Horní Jiřetín a Litvínov, v oblasti bývalého hnědouhelného dolu Obránců míru. Po ukončení těžebních činností zde nebylo přistoupeno k celkové technické rekultivaci, ale byla rekultivována pouze částečně. Byla ponechána většina vodních ploch o rozloze cca 1,6 ha, přičemž na zbytku území bylo v průběhu 70. až 90. let provedeno zalesnění, většinou rychle rostoucími dřevinami. Zalesnění proběhlo bez předchozích terénních úprav, pouze na

40 ha, byla provedena tzv. zemědělská rekultivace. Celková rozloha výsypky činí 410 ha (Ekologické centrum Most ©2018).

Radovesická výsypka jež je největší výsypkou na Mostecku s rozlohou 1200 ha, vznikla na území lomu Maxim Gorkij, na území dnes již zaniklé obce Radovesice, Nedaleko obce Bílina. Rekultivace probíhaly od 90. let až do roku 2010 a bylo zde uplatněno více běžných rekultivačních způsobů (lesnická, zemědělská, hydrická rekultivace), včetně využití experimentálních způsobů založených například na využití slínů a slínovců, nebo ponechání ploch samovolné sukcesi (Fraštia et Řehoř 2018). Na převážné většině výsypky však byly provedeny výrazné terénní úpravy, a proto byla vybrána jako protiklad k výsypce Hornojřetínské.

3.2. Data

Pro potřeby porovnání byla poskytnuta data z laserového leteckého skenování dvou dříve zmiňovaných výsypek ve formátu LAS a LAZ, v souřadnicovém referenčním systému S-JTSK, rozdělená do tzv. tiles (dlaždic). U dat nebyla provedena žádná klasifikace. Rozdělení původního velkého souboru se většinou provádí kvůli snadnějšímu zpracování jednotlivých souborů a také kvůli možnosti klasifikovat jednotlivé tiles rozdílným způsobem, což je výhodné zejména v případě členitých různorodých území. Vzhledem ke skutečnosti, že lidarová data byla vytvořena pro větší území, než představují výsypky, byly k nim rovněž dodány vektorové vrstvy určující přesný rozsah jednotlivých lokalit. Pro práci se soubory LAS byl používán softwarový balík LAStools, všechny další charakteristiky byly počítány pomocí ArcGIS.

Data pro Hornojřetínskou výsypku tvořila skupina 16 LAS souborů o celkové velikosti 4 GB s počtem 123 292 346 bodů. Pro Radovesickou výsypku, byla poskytnutá data v 34 LAZ souborech o celkové velikosti 2,1 GB, s počtem 283 381 944 bodů.

Data pro obě výsypky byla pořízena v květnu 2017 s využitím platformy FLIS (The Flying Laboratory of Imagin) a full-waveform laserového skeneru Riegl LMS-Q780 avšak pouze s využitím diskretní části dat. Letová výška činila 1030 m nad zemí při rychlosti 110 uzlů. Překryv dat dosahoval 55 %, čímž byla dosažena průměrná hustota 7,7 bodů na m².

3.3. Postup

Jako kritéria k porovnání geomorfologie rekultivovaných a nerektivovaných oblastí byly vybrány geomorfometrické charakteristiky popisované v rešeršní části práce TABULKA 3. K jejich výpočtu bylo nejprve nutné klasifikovat data z lidarů a vytvořit digitální modely terénu. Po vytvoření těchto modelů mohlo být již přistoupeno k výpočtům zmiňovaných charakteristik. Za účelem rozpoznání landforms specifických pro rekultivované a nerektivované území, byly některé geomorfometrické charakteristiky podrobeny neřízené klasifikaci. Aby bylo možno zjistit, jestli je reálná šance uspořít výpočetní výkon a čas, byla pro stejná data provedena analýza hlavních komponent.

Charakteristika	Rozlišení rastru v m					Neřízená klasifikace, PCA
	5	10	20	50	100	
Aspect	x	x	x	x	x	x
Curvature	x	x	x	x	x	x
Planform curvature	x	x	x	x	x	
Profile curvature	x	x	x	x	x	
DEM	x	x	x	x	x	
Hillshade	x	x	x	x	x	
Flowaccumulation	x	x	x	x	x	
Flowdirection	x	x	x	x	x	
SDE	x	x	x	x	x	x
Slope	x	x	x	x	x	x
TPI	x	x	x	x	x	x
TRI	x	x	x	x	x	x
TWI	x	x	x	x	x	x

Tabulka 3 Geomorfometrické charakteristiky a zařazení do datových analýz

3.4. Zpracování lidarových dat

3.4.1. Příprava dat pro vytvoření DEM

K vytvoření digitálního výškového modelu terénu, který byl dále použit jako vstupní vrstva téměř u všech charakteristik terénu, bylo třeba mít klasifikované body, představující terén – ground. Tato základní klasifikace byla provedena u všech dodaných dat. Nicméně v případě Hornojřetínské výsypky, ji bylo vzhledem ke zmiňovanému chybnému určení ground bodů nutno provést znovu. Ještě předtím však bylo nutno odhalit a z klasifikace vyloučit nežádoucí body (outliers/noise), kterých se v souboru vyskytovalo velké množství.

Chybně provedená klasifikace ground bodů byla zrušena pomocí nástroje *las2las*, přesněji řečeno, všem bodům byla nastavena klasifikace 1 – Unclassified. Použitím *lasnoise* byly na základě izolovanosti a vzdálenosti od většiny ostatních označeny

lokální outliers. Bylo vyzkoušeno více nastavení ovlivňujících velikost oblasti a stupeň izolovanosti teoretických outliers, pro dodaná data se však jako nejlepší ukázalo nastavení výchozí, které prohledává okolí každé buňky v rastru o velikosti 3 x 3 x 3 a označuje jako outliers izolované body, jichž je pouze 5 a méně. Identifikované body byly klasifikovány kategorií 7 – Low point (noise). Body nebyly odstraněny, ale zůstaly součástí datového souboru. Globální outliers byly nalezeny nástrojem *lasheight*, na základě filtrování bodů podle souřadnic, kdy byly označeny a odstraněny všechny body s výškou přesahující výšku terénu o 30 m.

Jakmile bylo dokončeno očištění datového souboru od lokálních a globálních outliers, mohlo být přikročeno k definování bodů představujících terén – ground. K tomu byl využit nástroj *lasground*. Aby byly ground body správně určeny, bylo nutno zvolit vhodné nastavení, respektující geomorfologii terénu a prvků, které se na něm vyskytují. Jako nejdůležitější se v tomto směru ukázal parametr STEP, který definuje velikost oblasti pro vyhodnocení ground bodů. Protože se na zvoleném území nevyskytují žádné antropogenní prvky, které by mohly být chybně označeny jako ground, mohlo být zvoleno nastavení WILDERNESS s velikostí STEP 3 m, u kterého byl předpoklad, že bude dobře fungovat v členitém terénu vegetačním pokryvem. Zároveň byly z klasifikace vyloučeny body dříve označené kategorií 7. Po dokončení klasifikace se ukázalo, že bude nutné provést ještě ruční reklasifikaci některých bodů, klasifikovaných jako ground, ačkoliv se očividně jednalo o nízkou vegetaci, která znemožnila laserovým paprskům proniknout až na terén. Opravy byly provedeny jednotlivě pomocí *lasview*.

3.4.2. Klasifikace vegetace

Pro určení vegetace bylo nejprve nutné vypočítat výšku všech bodů nad terénem, označeným jako ground. K tomu byl využit nástroj *lasheight* v defaultním nastavení. Výška bodů nad terénem může být spočítána i pomocí *lasground*, toho však nebylo využito. Nástrojem *lasclassify* byla provedena klasifikace vysoké vegetace, kterou algoritmus určoval pomocí výšky bodů nad terénem. Implicitní hodnota je v tomto případě nastavena na 2 m. Vysoké vegetaci byla přiřazena kategorie 5. Vzhledem ke skutečnosti, že se na obou lokalitách dal předpokládat i výskyt jiné než vysoké vegetace, byla provedena dodatečná klasifikace s rozdělením na nízkou vegetaci s kategorií 3, pro body do výšky 0.5 m a střední vegetaci, označené kategorií 4

s výškou bodů 0.5–2 m. Toto rozdělení bylo provedeno pomocí *lasheight* na základě výšky bodů nad terénem.

3.5. Vytvoření DEM

Digitální výškové modely terénu byly vytvořeny jako dataset, pomocí ArcGIS a nástroje *LAS Dataset to Raster*. Bylo možné využít i nástrojů LAStools, nicméně vzhledem k dalšímu postupu se použití ArcGIS ukázalo jako výhodnější. Vytvořené modely byly oříznuty podle dodaných vektorových vrstev, reprezentujících obě porovnávané výsypky. Pro snadnější vizuální porovnání byly vytvořeny i stínované hillshade modely.

Pro výpočty některých dalších charakteristik byly z původního DEM terénu vytvořeny nástrojem *Focal statistic* nové DEM modely, obsahující hodnoty minimální, maximální a průměrné, nebo rozpětí hodnot DEM původního. Rozsah okolních buněk zahrnutých do výpočtu byl definovaný parametrem NEIGHBORHOOD. Výsledné modely byly podle typu obsažených hodnot pojmenovány jako min, max, mean a range DEM.

3.6. Výpočty geomorfometrických charakteristik

Všechny geomorfometrické charakteristiky byly vytvářeny v různých měřících, což představovalo více iterací stejných výpočtů, pouze s jinými proměnnými, pro každou jednotlivou charakteristiku. Proto byly pro většinu charakteristik vytvořeny modely, s jejichž pomocí byl výpočet do značné míry zjednodušen, urychlen a zautomatizován. Všechny výpočty byly prováděny v prostředí ArcGIS a pokud není uvedeno jinak, vstupní vrstvou byl rastrový DEM terénu.

3.6.1. Slope a aspect

Sklon a orientace terénu byly vypočítány pomocí nástrojů *Slope* a *Aspect*, s výslednými hodnotami ve stupních, planární metodou vhodnou pro menší území.

3.6.2. Curvature

Hodnoty zakřivení terénu byly zjištěny nástrojem *Curvature*, a to včetně rozdělení na planform a profile curvature.

3.6.3. Flow direction

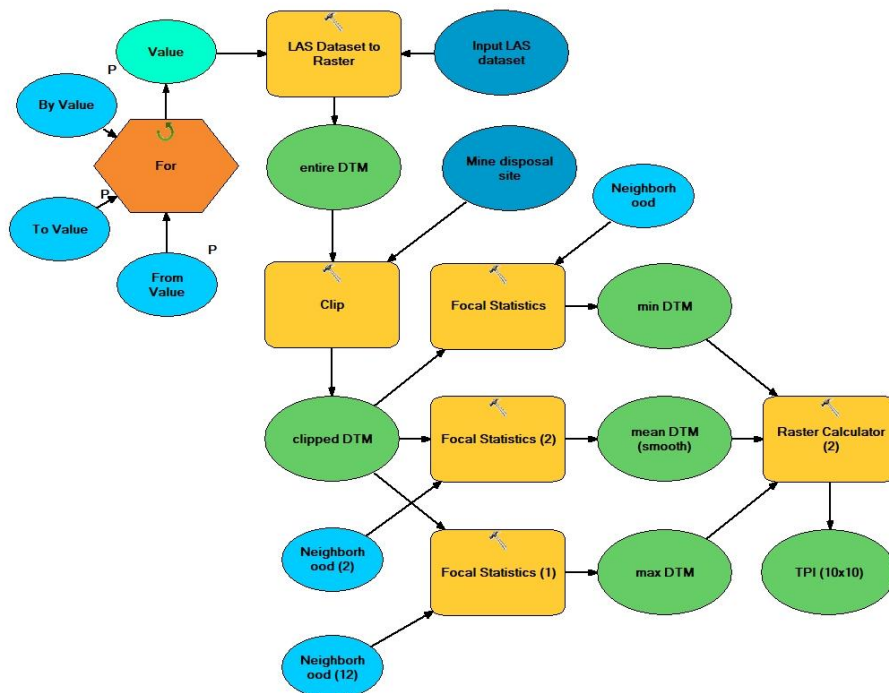
Pro zjištění směru odtoku, byl využit nástroj *Flow direction* a algoritmus single flow direction (D8). Jako vstupní rastrová vrstva byl použit DEM terénu, u něhož byly vyplněny propady nástrojem *Fill*.

3.6.4. Flow accumulation

Hodnoty představující akumulaci vody byly spočítány za pomoci nástroje *Flow accumulation*.

3.6.5. TPI

Hodnoty byly získány porovnáním hodnot buněk vstupní vrstvy s průměrnou výškou specifikovaného okolí (Weiss 2001) OBRÁZEK 13. Pomocí *Focal statistic* byly vytvořeny DEM modely obsahující minimální, maximální a průměrné hodnoty původního DEM. Jako rozsah okolí NEIGHBORHOOD, byl použit čtverec o rozměru 10x10 buněk. Použitím vzorce $TPI = \frac{\max DEM - \min DEM}{\max DEM + \min DEM}$ byly v *Raster calculator* vypočteny konkrétní hodnoty indexu.



Obrázek 13 Model výpočtu TPI

3.6.6. TRI

Hodnoty indexu byly vypočteny jako rozdíl mezi hodnotou buňky a průměrnou hodnotou 8 sousedních buněk (Riley 1999). Pomocí *Focal statistic* byly vytvořeny DEM modely obsahující minimální a maximální hodnoty původního DEM. Jako rozsah okolí NEIGHBORHOOD, byl použit čtverec o rozměru 3x3 buňky a v *Raster calculator* byly vypočteny konkrétní hodnoty dosazením do vzorce

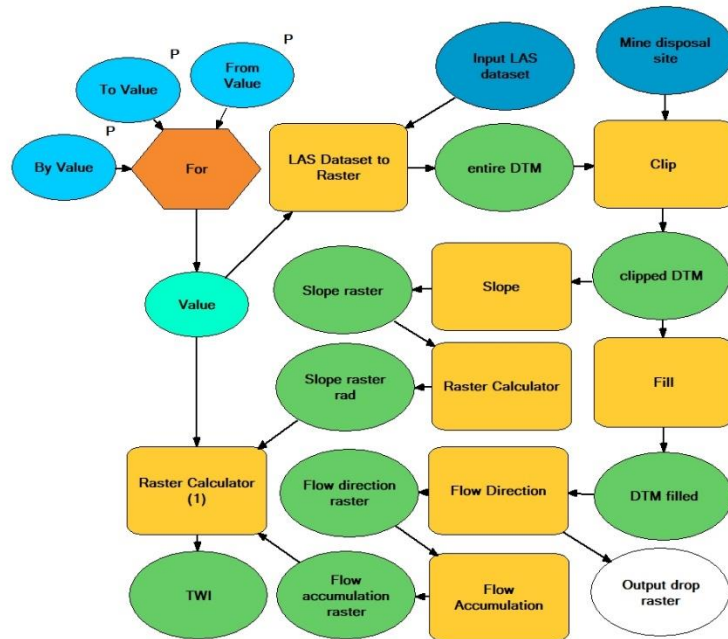
$$TRI = \sqrt[2]{|\max DEM - \min DEM|}$$

3.6.7. SDE

Použitím vzorce $SDE = \frac{\text{mean DEM} - \text{DEM}}{\text{range DEM}}$ (Ascione et al. 2008), byly dosazením původního DEM terénu a ve *Focal statistic* vytvořených mean a range DEM, s parametrem NEIGHBORHOOD 3x3 buňky za pomoci *Raster calculator* vypočteny konečné hodnoty.

3.6.8. TWI

Hodnoty indexu byly vypočteny dosazením vstupních vrstev slope a flow accumulation do vzorce $TWI = \ln \frac{\alpha}{\tan \beta}$ (Wolock 1995) OBRÁZEK 14, přičemž hodnoty sklonu byly převedeny ze stupňů na Radiány.

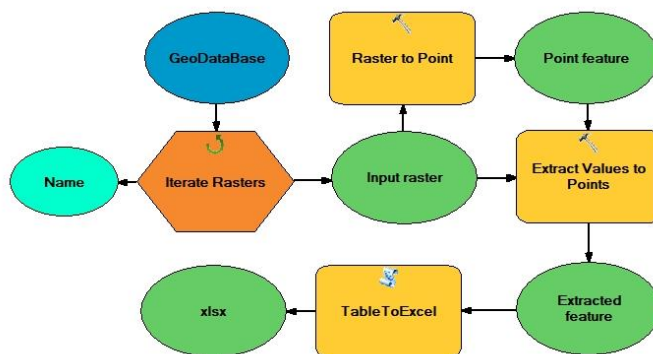


Obrázek 14 Model výpočtu TWI

3.7. Analýzy dat

Některými autory je pro geomorfologické analýzy doporučováno použití různých měřítek (Guisan et al. 1999, Winstral et Davis 2002). Na základě zkušeností z obdobných prací a vizuálního posouzení vytvořených vrstev, byla pro další posuzování geomorfologických rozdílů mezi rekultivovanými a nerektivovanými lokalitami, vybrána dvě rozdílná měřítka – 5 m a 20 m. V těchto měřítcích byl nástrojem *Composite bands* z vybraných geomorfometrických charakteristik TABULKA 3 vytvořen multiband rastr a na něm byla provedena neřízená klasifikace *Iso Cluster Unsupervised Classification* s rozdělením do 5 kategorií a analýza hlavních komponent *Principal Components*, se třemi hlavními komponentami.

Dále byla pro každou výsypku určena reprezentativní oblast nejlépe vystihující způsob provedené rekultivace o rozloze 200 x 200 m. V případě Hornojřetínské výsypky byla vybrána technicky nerektivovaná oblast s jasně viditelnou terénní strukturou, která vzniká vysypáváním přebytečného materiálu. Jako příklad technicky rekultivovaného terénu byla naopak vybrána upravená část Radovesické výsypky. Pro tyto dvě oblasti byly pro všechny vypočítané geomorfometrické charakteristiky vytvořeny bodové vrstvy *Raster to point*, z nich byly extrahovány hodnoty *Extract Values to Point* OBRÁZEK 15, které byly dále zpracovány pomocí vybraných statistických ukazatelů.



Obrázek 15 Model extrakce hodnot rastrových vrstev

4. Výsledky

Zpracováním 50 dodaných souborů lidarových dat nástroji softwarového balíku LAStools, byla provedena klasifikace celkem 406 674 290 zaznamenaných bodů do 7 tříd podle standardu ASPRS. Klasifikovaná data popisují terénní a povrchové prvky na území o rozloze 48,5 km² s průměrnou hustotou cca 8 bodů/m², přičemž terén a povrchové prvky jsou představovány třídami 2–6. Značné rozdíly jsou viditelné v případě prvků vegetačního pokryvu, a to zejména v případě nízké a vysoké vegetace. Zatímco na převážně technicky rekultivovaném terénu Radovesické výsypky je poměr nízké a vysoké vegetace, celkově pokrývající 53,22% rozlohy území víceméně vyrovnaný, v případě Hornojřetínské výsypky zcela převažuje vegetace vysoká, s pokryvem 42,01% území TABULKA 4.

	Hornojřetínská výsypka		Radovesická výsypka	
Tiles	16		34	
Point records	123 292 346	% of point records	283 381 944	% of point records
First returns	113 260 841	91,86	265 234 435	93,60
Intermediate returns	250 903	0,20	59 0 811	0,20
Last returns	113 261 882	91,86	265 234 701	93,60
Single returns	103 481 280	83,93	247 678 003	87,40
Covered area in km ²	15,34		33,16	
Point density/m ²	8,03		8,55	
Spacing in m	0,35		0,34	
Unclassified (1)	263 875	0,21	703 736	0,25
Ground (2)	611 14 280	49,57	115 799 676	40,86
Low vegetation (3)	4 558 424	3,70	71 431 401	25,21
Medium vegetation (4)	4 851 840	3,94	14 202 893	5,01
High vegetation (5)	51 796 212	42,01	79 385 001	28,01
Building (6)	674 202	0,55	1 804 166	0,64
Noise (7)	33 513	0,03	55 071	0,02

Tabulka 4 Přehled klasifikovaného lidarů

Byla provedena vizuální kontrola určení ground bodů na území obou výsypek. S ohledem na výskyt povrchových anomálií poukazujících na výskyt špatně klasifikované vegetace, byly prozkoumány stínované hillshade modely a bylo provedeno jejich porovnání s ortofoto snímky. V oblasti Radovesické výsypky nebyly zaznamenány žádné chybně určené body, jinak tomu bylo na území výsypky Hornojřetínské, kde v některých případech docházelo k chybnému určení ground bodů v místech s velmi hustou, středně vysokou vegetací.

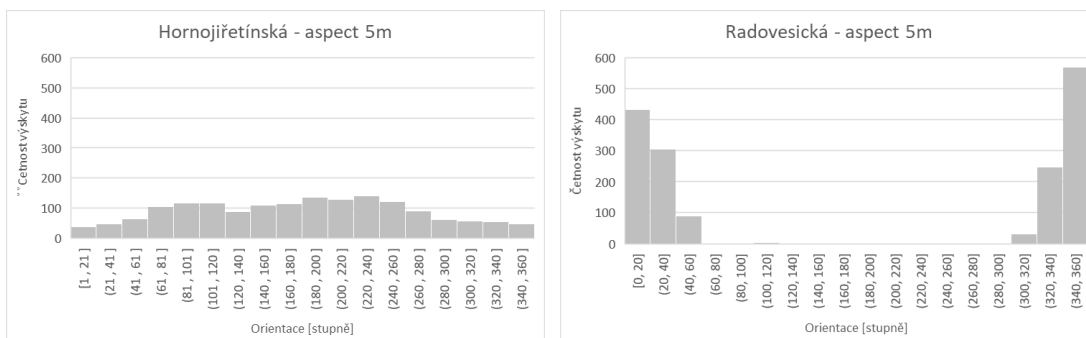
Pro každou z výsypek bylo pomocí aplikace ArcGIS v 5 různých měřítcích vytvořeno 5 digitálních výškových modelů, 5 hillshade modelů a 13 vrstev popisujících vybrané geomorfometrické charakteristiky, což představuje celkem 130 jednotlivých rastrových vrstev TABULKA 3. Pro všechny druhy těchto vrstev v měřítku 5 a 20 metrů, byly ve vybraných reprezentativní územích o rozloze 400 m² spočítány následující statistické ukazatele: minimum, maximum, průměr a směrodatná odchylka TABULKA 5. Rozdíly mezi hodnotami označeny u parametru směrodatná odchylka. Tučné číslice poukazují na rozdílné hodnoty mezi jednotlivými výsypkami, šedé podbarvení označuje parametr citlivý ke změně měřítka.

Nejcitlivěji na změnu měřítka reagoval parametr reprezentující akumulaci vody – flow accumulation a všechny složky celkového zakřivení – planform curvature a profile curvature, méně již parametr sklonu – slope a vlhkostní index – TWI. U ostatních parametrů k výrazným změnám při změně rozlišení vstupních dat téměř nedocházelo.

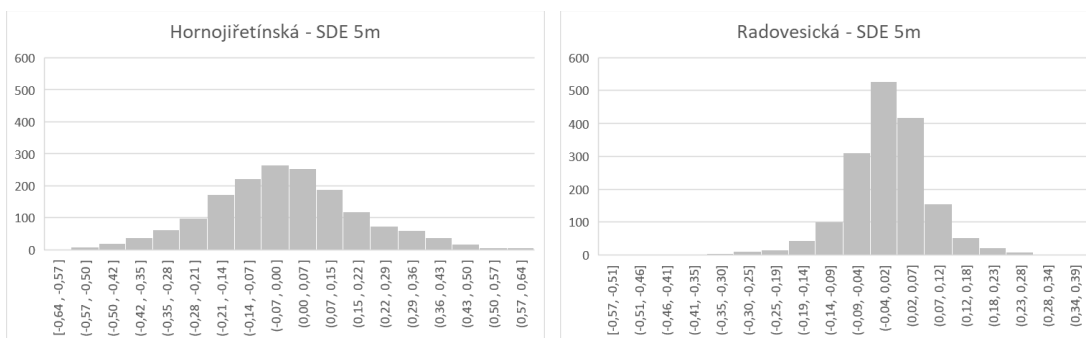
Největší rozdíly mezi technicky rekultivovaným a nerekulitovaným územím vykazují parametry aspect OBRÁZEK 16, SDE OBRÁZEK 17 a všechny druhy zakřivení OBRÁZEK 18. Z grafů je rovněž viditelné, že hodnoty SDE a curvature mají normální rozdělení, s častým výskytem extrémních hodnot v případě technicky nerekulitované Hornojřetínské výsypky, zatímco na upraveném terénu Radovesické výsypky tyto extrémy přítomny nejsou. V případě sklonu jsou viditelné rozdíly pouze v měřítku 5 m OBRÁZEK 19.

	5 m				Výsypka	20 m			
	min.	max.	průměr	Std. Dev.		min.	max.	průměr	Std. Dev.
DEM	279,72	297,99	290,57	4,16	H	280,17	297,47	290,42	4,23
	312,62	342,41	331,16	8,14	R	313,56	341,15	331,13	7,89
Aspect	0,77	359,88	179,27	87,15	H	16,34	341,70	178,65	72,41
	0,03	359,95	183,82	161,85	R	0,28	358,74	186,32	164,43
Slope	0,11	27,02	9,67	5,32	H	0,48	11,90	5,55	2,67
	0,20	17,94	7,76	3,51	R	2,17	12,87	7,55	2,89
Flow direction	1,00	128,00	19,82	32,16	H	1,00	128,00	13,40	26,64
	1,00	128,00	73,15	33,32	R	32,00	128,00	74,76	30,60
Flow accumulation	0,10	1917,00	40,56	211,93	H	0,10	108,00	8,97	24,14
	0,10	1475,00	81,18	219,11	R	0,10	166,00	18,56	27,77
Curvature	-23,53	17,78	0,14	6,06	H	-2,40	2,28	0,12	0,99
	-11,70	13,78	0,00	2,34	R	-1,20	1,39	0,00	0,46
Planform curvature	-16,42	11,99	0,00	3,18	H	-1,15	1,01	0,04	0,48
	-5,06	5,65	-0,05	1,02	R	-0,80	0,54	-0,05	0,22
Profile curvature	-13,83	15,47	-0,15	3,74	H	-1,34	1,45	-0,08	0,60
	-8,13	7,09	-0,04	1,54	R	-0,92	0,60	-0,04	0,28
SDE	-0,64	0,64	-0,01	0,20	H	-0,51	0,49	-0,04	0,20
	-0,57	0,39	0,00	0,08	R	-0,17	0,14	0,00	0,07
TPI	0,30	0,76	0,52	0,09	H	0,39	0,66	0,53	0,06
	0,29	0,73	0,52	0,08	R	0,45	0,67	0,56	0,06
TRI	15,52	62,24	36,96	8,18	H	29,06	77,11	56,60	10,37
	8,85	51,08	32,85	8,39	R	34,86	89,16	64,58	14,29
TWI	2,39	13,88	4,67	1,76	H	4,74	10,83	6,35	1,48
	2,77	13,40	5,98	2,03	R	4,62	10,14	7,33	1,40

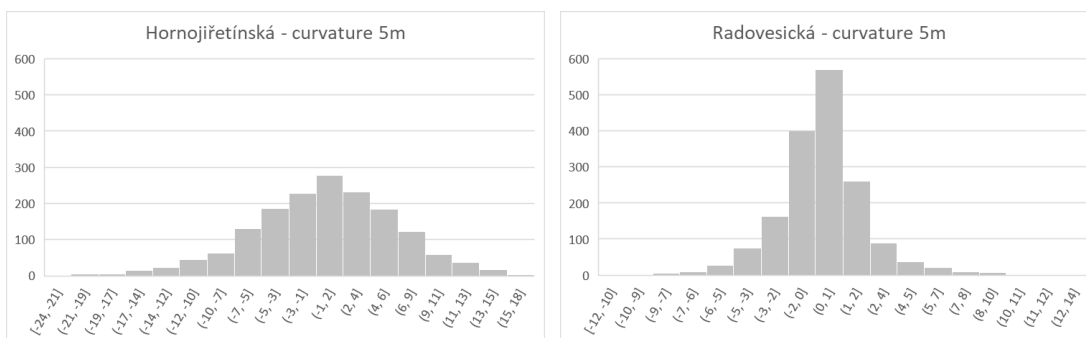
Tabulka 5 Statistické ukazatele pro reprezentativní oblasti



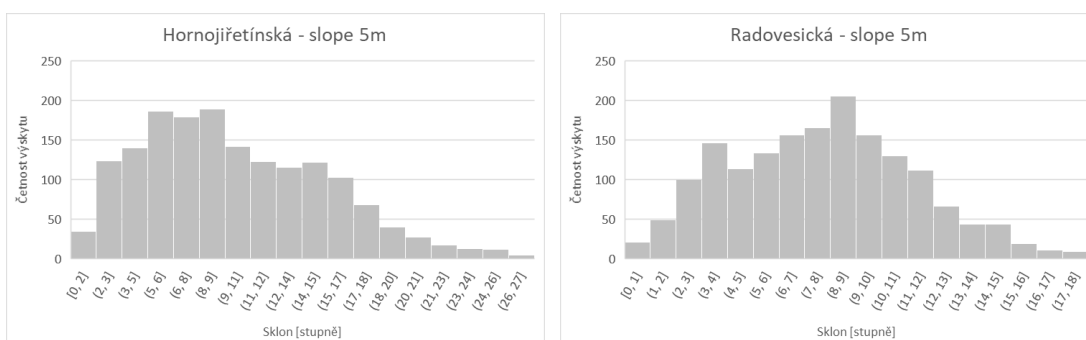
Obrázek 16 Reprezentativní území – histogram hodnot – aspect



Obrázek 17 Reprezentativní území – histogram hodnot – SDE



Obrázek 18 Reprezentativní území – histogram hodnot – curvature

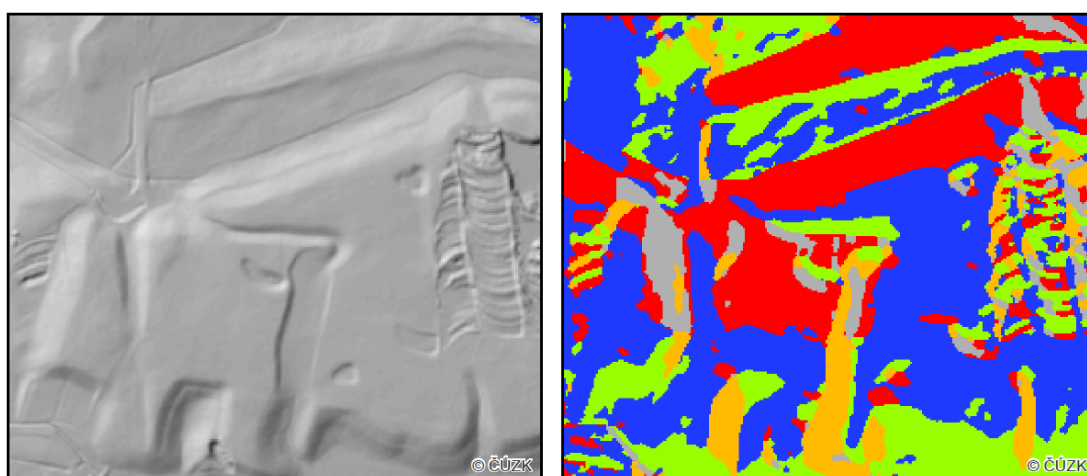


Obrázek 19 Reprezentativní území – histogram – slope

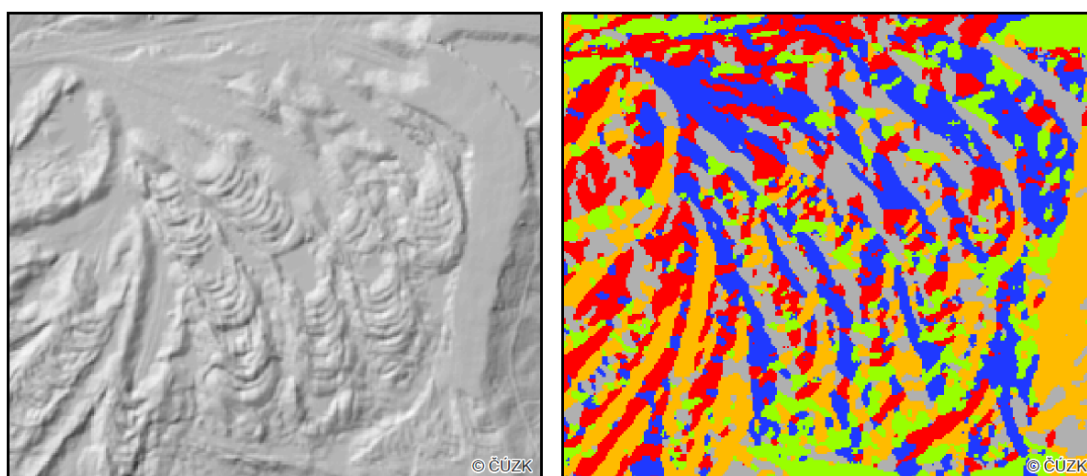
Byla provedena neřízená klasifikace se vstupní vrstvou vytvořenou z vybraných geomorfometrických charakteristik. Rovněž byla vyzkoušena teoretická možnost redukce dat použitím vstupní vrstvy získanou analýzou hlavních komponent, která

přinesla stejné výsledky, jako v případě použití jednotlivých charakteristik. Výsledkem neřízené klasifikace byly rastrové vrstvy s pěti novými kategoriemi.

Typické vlnovité útvary vznikající při sypání odtěžené zeminy a vyskytující se zejména v oblasti Hornojřetínské výsypky se neřízenou klasifikací nepodařilo identifikovat OBRÁZEK 21. Z dosažené klasifikace lze v případě Radovesické výsypky částečně odlišit rovný terén od svahů orientovaných do různých světových stran OBRÁZEK 20. Nicméně na Hornojřetínské výsypce vychází výsledky klasifikace zcela odlišně a jasně viditelný rovný útvar po terénních úpravách OBRÁZEK 21 vpravo, se rozpoznat nepodařilo.



Obrázek 20 Radovesická výsypka – porovnání hillshade a neřízená klasifikace



Obrázek 21 Hornojřetínská výsypka – porovnání hillshade a neřízené klasifikace

5. Diskuze

Klasifikace lidarových dat byla provedena pomocí algoritmů implementovaných v softwaru LAStools. Přesnost klasifikace ground bodů konkrétně provedených algoritmem PTIN (Progressive Triangulated Irregular Network) (Axelsson, 2000), se jeví jako velmi přesná, a to i v případě z hlediska klasifikace náročných vrcholů náspů. Ke špatnému určení ground bodů docházelo velmi zřídka a pouze u velmi husté středně vysoké vegetace, která musela být v několika případech reklasifikována ručně. Otázkou je, zda je tato chybná klasifikace problémem algoritmu, nebo je způsobena samotným principem laserového skenování a skutečností, že laserový paprsek není schopen takovými typem vegetace proniknout až na terén.

V minulosti bylo při výpočtu geomorfometrických charakteristik většinou používáno pouze jedno měřítko. Je známo, že většina těchto charakteristik je na jeho velikost citlivá. Příkladem může být Topography position index (Guisan et al. 1999). Rozdílná měřítka se používají rovněž při porovnávání oblastí s odlišnou rozlohou (Winstral et Davis 2002). Pro výpočet charakteristik použitých k porovnání Hornojřetínské a Radovesické výsypky byla zvolena manuálně 2 odlišná měřítka, a to na základě znalosti území. Existují ale i pokročilé metody k výběru měřítek, jimiž je například ESP (Drągut et al. 2010), které dokáží nalézt vhodné měřítko pomocí velikosti určených terénních prvků. Tato metoda byla kupříkladu použita při mapování mořského prostředí (Ismail et al. 2015).

V případě klasifikace různých terénních prvků (landforms) je k jejich identifikaci často využívána metoda neřízené klasifikace, obvykle v kombinaci s analýzou hlavních komponent (Ismail et al. 2015), která slouží k úspoře výpočetní náročnosti prováděných operací. Pomocí neřízené klasifikace byly pro Hornojřetínskou i Radovesickou výsypku vytvořeny rastrové vrstvy, obsahující 5 nových kategorií, od kterých se očekávala identifikace jednotlivých terénních útvarů výsypek, zejména pak typických vlnovitých útvarů. Tyto útvary nebyly klasifikací rozpoznány a je diskutabilní, zda to bylo způsobeno zvoleným měřítkem (5 m a 20 m), výraznou terénní odlišností obou výsypek, či geomorfometrickými charakteristikami vstupujícími do neřízené analýzy.

Řešením, jak správně identifikovat terénní útvary rekultivovaných výsypek, může být záměna pixelové klasifikace za objektovou. Zatímco tradiční pixelová klasifikace

vyhodnocuje pouze jednotlivé pixely bez ohledu na jejich rozmístění, klasifikace objektová, vyhodnocuje i jejich texturu (Halounová 2003). V případě správně zvoleného měřítka (Drąguł et al. 2010), by tato klasifikace mohla přinést očekávané výsledky.

6. Závěr

V práci byly popsány principy a postupy využívané při klasifikaci bodů lidarových mračen, vytváření digitálních výškových modelů terénu a výpočtu vybraných geomorfometrických parametrů. Byla provedena klasifikace lidarových dat pořízených pro území Hornojřetínské a Radovesické výsypky, z nichž byly vytvořeny digitální výškové modely.

Studiem dostupné literatury byly identifikovány a vybrány geomorfometrické charakteristiky pro rozlišení terénních prvků na bývalých těžebních územích a analýzou hlavních komponent byla prověřena možnost jejich redukce při vstupu do dalších analýz.

Provedením neřízené analýzy se vstupními parametry v podobě rastrových vrstev aspect, slope, curvature, SDE, TPI, TRI a TWI v manuálně zvolených měřících 5 a 20 metrů bylo zjištěno, že tímto postupem a pomocí klasické pixelové analýzy pravděpodobně není možné jednoznačně identifikovat terénní útvary rozlišující rekultivovaná a nereakultivovaná území.

I přes tuto skutečnost je možné popsané postupy v budoucnu využít a pokusit se pomocí sofistikovanějších metod nalezení měřítek, případně použitím objektové analýzy namísto pixelové, dosáhnout požadovaných výsledků.

7. Přehled literatury

- Anderson, J. R. (1976). *A land use and land cover classification system for use with remote sensor data* (Vol. 964). US Government Printing Office.
- ArcGIS (©2018). *ArcMAP Tool reference* (online) [cit.2018.09.01], dostupné z <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/main/a-quick-tour-of-geoprocessing-tool-references.htm>
- Ascione, A., Cinque, A., Miccadei, E., Villani, F., & Berti, C. (2008). *The Plio-Quaternary uplift of the Apennine chain: new data from the analysis of topography and river valleys in Central Italy*. *Geomorphology*, 102(1), 105-118.
- ASPRS (©2018). *What is ASPRS* (online) [cit.2018.09.20], dostupné z <https://www.asprs.org/organization/what-is-asprs.html>
- Axelsson, P. (2000). *DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models*. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33(4), 110-117.
- Baltsavias, E. P. (1999). *Airborne laser scanning: basic relations and formulas*. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 54(2), 199-214.
- Baselice, F., Ferraioli, G., & Pascazio, V. (2009). *DEM reconstruction in layover areas from SAR and auxiliary input data*. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 6(2), 253-257.
- Bamler, R., & Hartl, P. (1998). *Synthetic aperture radar interferometry. Inverse problems*, 14(4), R1.
- Blaszczynski, Jacek, S. (1997). *Landform characterization with geographic information systems*. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 63(2), 183-191.
- Bobtad, P. V., & Stowe, T. (1994). *An evaluation of DEM accuracy: elevation, slope, and aspect*. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 60(11), 7327-7332.
- Chen, Q. (2007). *Airborne lidar data processing and information extraction*. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 73(2), 109.
- Chen, F., Guo, H., Ishwaran, N., Zhou, W., Yang, R., Jing, L., ... & Zeng, H. (2014). *Synthetic aperture radar (SAR) interferometry for assessing Wenchuan earthquake (2008) deforestation in the Sichuan giant panda site*. *Remote Sensing*, 6(7), 6283-6299.
- Chen, Z., Gao, B., & Devereux, B. (2017). *State-of-the-art: DTM generation using airborne LIDAR data*. *Sensors*, 17(1), 150.
- Demantke, J., Mallet, C., David, N., & Vallet, B. (2011). *Dimensionality based scale selection in 3D lidar point clouds*. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(Part 5), W12.

- Desmet, P. J. J., & Govers, G. (1996). Comparison of routing algorithms for digital elevation models and their implications for predicting ephemeral gullies. *International Journal of Geographical Information Science*, 10(3), 311-331.
- Dobrovolný, P. (1998). *Dálkový průzkum Země. Digitální zpracování obrazu*. 1. vyd. Brno: Masarykova univerzita, 1998. 208 s. ISBN 80-210-1812-7.
- Drąguł, L., Tiede, D., & Levick, S. R. (2010). ESP: a tool to estimate scale parameter for multiresolution image segmentation of remotely sensed data. *International Journal of Geographical Information Science*, 24(6), 859-871.
- Ekologické centrum Most (©2018). *Průvodce po rekultivacích na Mostecku* (online) [cit.2018.11.01], dostupné z http://www.ecmost.cz/rekultivace.php?page=pruvodce_shr
- Evans, D. L., Roberts, S. D., McCombs, J. W., & Harrington, R. L. (2001). Detection of regularly spaced targets in small-footprint LIDAR data: research issues for consideration. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 67(10), 1133-1136.
- Evans, J. S., & Hudak, A. T. (2007). A multiscale curvature algorithm for classifying discrete return LiDAR in forested environments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(4), 1029-1038.
- Florinsky, I. V. (2012). *Digital terrain analysis in soil science and geology*. Oxford ; Amsterdam ; Waltham, Mass. ; San Diego, Calif. : Elsevier Academic Press, 2012, 7-30.
- Fraštia, M., Řehoř, M. (2018) *Zahlazování následků hornické činnosti – rekultivace Radovesické výsypky* (online) [cit.2018.09.20], dostupné z <https://slon.diama.cz/hpvt/2014/Z/Z%2010.pdf>
- Gallant, J. C., Chan, F., Marinova, D., & Andersson, R. (2011, December). The ground beneath your feet: digital elevation data for today and tomorrow. In *Proceedings of the MODISM2011, 19th International Congress on Modelling and Simulation, Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand*. Perth, Australia (pp. 70-76).
- Gallay, M. (2013). Direct acquisition of data: airborne laser scanning. *Geomorphological techniques*, 2(1.4), 1-17.
- Gessler, P. E., Chadwick, O. A., Chamran, F., Althouse, L., & Holmes, K. (2000). Modeling soil-landscape and ecosystem properties using terrain attributes. *Soil Science Society of America Journal*, 64(6), 2046-2056.
- GISGeography (©2018). *A Complete Guide to LiDAR: Light Detection and Ranging* (online). [cit.2018.09.20], dostupné z <https://gisgeography.com/lidar-light-detection-and-ranging>
- Gojda, M., John, J., & Brejcha, R. (2013). *Archeologie a letecké laserové skenování krajiny*. Katedra archeologie, Západočeská univerzita v Plzni.
- Guisan, A., Weiss, S. B., & Weiss, A. D. (1999). GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution. *Plant Ecology*, 143(1), 107-122.

- Guth, P. L. (2006). *Geomorphometry from SRTM. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(3), 269-277.
- Haugerud, R. A., & Harding, D. J. (2001). Some algorithms for virtual deforestation (VDF) of LIDAR topographic survey data. *International archives of photogrammetry remote sensing and spatial information sciences*, 34(3/W4), 211-218.
- Halounová, L. (2003). *Textural classification of B&W aerial photos for the forest classification. EARSEL*, 3, 324-335.
- Irvin, B. J., Ventura, S. J., & Slater, B. K. (1997). *Fuzzy and isodata classification of landform elements from digital terrain data in Pleasant Valley, Wisconsin. Geoderma*, 77(2-4), 137-154.
- Isenburg, M. (2013). *LASzip: Lossless Compression of Lidar Data. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 79 (2), 209–217.
- Ismail, K., Huvenne, V. A., & Masson, D. G. (2015). *Objective automated classification technique for marine landscape mapping in submarine canyons. Marine Geology*, 362, 17-32.
- Jenness, J. (2007). *Some thoughts on analyzing topographic habitat characteristics. Jenness Enterprises, Flagstaff, AZ, USA*, 26.
- 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.
- Jutzi, B., & Stilla, U. (2005). *Waveform processing of laser pulses for reconstruction of surfaces in urban areas. Measurement Techniques*, 2(3.1), 2.
- Kamp, U., Bolch, T., & Olsenholler, J. (2005). *Geomorphometry of Cerro Sillajhuay (Andes, Chile/Bolivia): comparison of digital elevation models (DEMs) from ASTER remote sensing data and contour maps. Geocarto International*, 20(1), 23-33.
- Kimerling, A. J., Buckley, A. R., Muehrcke, P. C., & Muehrcke, J. O. (2017). *Map use: reading and analysis. Esri Press*.
- Kirkby, M. J., & Beven, K. J. (1979). *A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. Hydrological Sciences Journal*, 24(1), 43-69.
- Kolář, J., Pavelka, K., & Halounová, L. (1997). *Dálkový průzkum země 10. ČVUT*.
- Köthe, R., & Bock, M. (2009). *Preprocessing of digital elevation models—derived from laser scanning and radar interferometry—for terrain analysis in geosciences. Proceedings of Geomorphometry, Zurich, Switzerland*, 31.
- Lim, K., Treitz, P., Wulder, M., St-Onge, B., & Flood, M. (2003). *LiDAR remote sensing of forest structure. Progress in physical geography*, 27(1), 88-106.
- Lin, X., & Zhang, J. (2014). *Segmentation-based filtering of airborne LiDAR point clouds by progressive densification of terrain segments. Remote Sensing*, 6(2), 1294-1326.

- Liu, X., Zhang, Z., Peterson, J., & Chandra, S. (2007). LiDAR-derived high quality ground control information and DEM for image orthorectification. *GeoInformatica*, 11(1), 37-53.
- Liu, X. (2008). Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues. *Progress in Physical Geography*, 32(1), 31-49.
- Mallet, C., Bretar, F., & Soergel, U. (2008). Analysis of full-waveform lidar data for classification of urban areas. *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, 5, 337-349.
- Meng, X., Wang, L., Silván-Cárdenas, J. L., & Currit, N. (2009). A multi-directional ground filtering algorithm for airborne LIDAR. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(1), 117-124.
- Pavelka, K. *Fotogrammetrie. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2009, 200 s. ISBN 978-80-01-04249-6.*
- Pfeifer, N., & Briese, C. (2007, April). *Laser scanning—principles and applications. In GeoSiberia 2007-International Exhibition and Scientific Congress.*
- Pike, R. J. (1999). *A Bibliography of Geomorphometry, the Quantitative Representation of Topography: Supplement 3.0. US Department of the Interior, US Geological Survey.*
- Pike, R. J. (2000). *Geomorphometry-diversity in quantitative surface analysis. Progress in physical geography*, 24(1), 1-20.
- Pradhan, N. R., Tachikawa, Y., & Takara, K. (2006). A downscaling method of topographic index distribution for matching the scales of model application and parameter identification. *Hydrological Processes: An International Journal*, 20(6), 1385-1405.
- Seibert, J., & McGlynn, B. L. (2007). A new triangular multiple flow direction algorithm for computing upslope areas from gridded digital elevation models. *Water resources research*, 43(4).
- Singh, A. K., Parkash, B., & Choudhury, P. R. (2007). Integrated use of SRM, Landsat ETM+ data and 3D perspective views to identify the tectonic geomorphology of Dehradun valley, India. *International Journal of Remote Sensing*, 28(11), 2403-2414.
- Prasannakumar, V., Shiny, R., Geetha, N., & Vijith, H. (2011). Applicability of SRTM data for landform characterisation and geomorphometry: a comparison with contour-derived parameters. *International Journal of Digital Earth*, 4(5), 387-401.
- Rabus, B., Eineder, M., Roth, A., & Bamler, R. (2003). The shuttle radar topography mission—a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 57(4), 241-262.
- Reitberger, J., Krzystek, P., & Stilla, U. (2006). Analysis of full waveform lidar data for tree species classification. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(Part 3), 228-233.

- Riley, S. J. (1999). *Index that quantifies topographic heterogeneity. intermountain Journal of sciences*, 5(1-4), 23-27.
- Quinn, P. F. B. J., Beven, K., Chevallier, P., & Planchon, O. (1991). *The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. Hydrological processes*, 5(1), 59-79.
- Sádlo, J., & Tichý, L. (2002). *Sanace a rekultivace po lomové a důlní těžbě: tržné rány v krajině a jak je léčit. ZO ČSOP Pozemkový spolek Hády ve spolupráci s neziskovou organizací Rezekvítek.*
- Silván-Cardenás, J. L., & Wang, L. (2006). *A multi-resolution approach for filtering LiDAR altimetry data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 61(1), 11-22.
- Song, J. H., Han, S. H., Yu, K. Y., & Kim, Y. I. (2002). *Assessing the possibility of land-cover classification using lidar intensity data. International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(3/B), 259-262.
- Tagil, S., & Jenness, J. (2008). *GIS-based automated landform classification and topographic, landcover and geologic attributes of landforms around the Yazoren Polje, Turkey. Journal of Applied Sciences*, 8(6), 910-921.
- Talich, M., Böhm, O., & Soukup, L. (2010) *Bayesovská klasifikace rastrových obrazů pomocí webové aplikace. Praktické využití GIS v lesnictví a zemědělství.*
- Thomas, B. C., Kuriakose, S. L., & Jayadev, S. K. (2009). *A method for groundwater prospect zonation in data poor areas using remote sensing and GIS: a case study in Kalikavu Panchayath of Malappuram district, Kerala, India. International journal of digital earth*, 2(2), 155-170.
- Tobler, W. (2000). *The development of analytical cartography: A personal note. Cartography and Geographic Information Science*, 27(3), 189-194.
- Malvić, T. (2009). *Tomislav Hengl, Hannes I. Reuter: Geomorphometry-Concepts, Software, Applications. Kartografija i geoinformacije*, 8(11), 175-175.
- Vojar, J., Doležalová, J., & Solský, M. (2012). *Hnědouhelné výsypky–nová příležitost nejen pro obojživelníky. Ochrana přírody*, 67(3), 8-11.
- Vosselman, G. (2000). *Slope based filtering of laser altimetry data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33(B3/2; PART 3), 935-942.
- Vosselman, G., & Maas, H. G. (Eds.) (2010). *Airborne and terrestrial laser scanning. Boca Raton: CRC.*
- Vráblíková, J., Vráblík, P.(2012). *The Environmental Loads of the Podkrusnohori Region – Conditions and Possibilities of their Reduction. Životné prostredie*, 46 (2), 69–75.
- VUGTK (©2018). *Terminologický slovník zeměměřictví a katastru nemovitostí (online) [cit.2018.09.20], dostupné z <https://www.vugtk.cz/slovník/index.php>*

- Wang, L., & Liu, H. (2006). *An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling*. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(2), 193-213.
- Wegmüller, U., Santoro, M., Werner, C., Strozzi, T., Wiesmann, A., & Lengert, W. (2009). *DEM generation using ERS–ENVISAT interferometry*. *Journal of Applied Geophysics*, 69(1), 51-58.
- Weiss, A. (2001, July). *Topographic position and landforms analysis*. In *Poster presentation, ESRI user conference, San Diego, CA (Vol. 200)*.
- Winstral, A., Elder, K., & Davis, R. E. (2002). *Spatial snow modeling of wind-redistributed snow using terrain-based parameters*. *Journal of hydrometeorology*, 3(5), 524-538.
- Wolock, D. M., & McCabe Jr, G. J. (1995). *Comparison of single and multiple flow direction algorithms for computing topographic parameters in TOPMODEL*. *Water Resources Research*, 31(5), 1315-1324.
- Yong, A., Hough, S. E., Abrams, M. J., & Wills, C. J. (2008). *Preliminary results for a semi-automated quantification of site effects using geomorphometry and ASTER satellite data for Mozambique, Pakistan and Turkey*. *Journal of earth system science*, 117(2), 797.
- Young, J. (2011). *Lidar for dummies*. Autodesk and DLT Solutions Special Edition.
- Zebker, H. A., & Villasenor, J. (1992). *Decorrelation in interferometric radar echoes*. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 30(5), 950-959.
- Zhang, J., & Lin, X. (2013). *Filtering airborne LiDAR data by embedding smoothness-constrained segmentation in progressive TIN densification*. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 81, 44-59.
- Zhang, J., Lin, X., & Ning, X. (2013). *SVM-based classification of segmented airborne LiDAR point clouds in urban areas*. *Remote Sensing*, 5(8), 3749-3775.

8. Seznam obrázků

Obrázek 1 Ortogonální a centrální projekce (Pavelka 2009).....	2
Obrázek 2 LiDAR – Odrazy laserových paprsků (GISGeography ©2018)	5
Obrázek 3 Záznam dat – PDRF (Point Data Record Format).....	9
Obrázek 4 Klasifikační třídy LAS, verze 1.4 – R13	10
Obrázek 5 Vyjádření sklonu (Kimerling et al. 2017).....	11
Obrázek 6 Aspect – vlevo, aspect a slope – vpravo (Kimerling et al. 2017).....	12
Obrázek 7 Rozdělení svahu a tvar zakřivení (Kimerling et al. 2017).....	13
Obrázek 8 Profile curvature (Kimerling et al. 2017)	14
Obrázek 9 Planform curvature (Kimerling et al. 2017)	14
Obrázek 10 Značení a směry odtoku D8 v ArcMap (ArcGIS ©2018)	15
Obrázek 11 Způsob výpočtu akumulace vody (ArcGIS ©2018).....	16
Obrázek 12 Hornojřetínská a Radovesická výsypka.....	22
Obrázek 13 Model výpočtu TPI.....	27
Obrázek 14 Model výpočtu TWI	28
Obrázek 15 Model extrakce hodnot rastrových vrstev	29
Obrázek 16 Reprezentativní území – histogram hodnot – aspect	33
Obrázek 17 Reprezentativní území – histogram hodnot – SDE	33
Obrázek 18 Reprezentativní území – histogram hodnot – curvature.....	33
Obrázek 19 Reprezentativní území – histogram – slope.....	33
Obrázek 20 Radovesická výsypka – porovnání hillshade a neřízená klasifikace	34
Obrázek 21 Hornojřetínská výsypka – porovnání hillshade a neřízené klasifikace .	34

9. Seznam tabulek

Tabulka 1 Kategorizace nerovností terénu podle Rileyho	17
Tabulka 2 Termíny používané v metodice.....	21
Tabulka 3 Geomorfometrické charakteristiky a zařazení do datových analýz	24
Tabulka 4 Přehled klasifikovaného lidarů.....	30
Tabulka 5 Statistické ukazatele pro reprezentativní oblasti.....	32