

UNIVERZITA KARLOVA

Přírodovědecká fakulta

Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie

Studijní program: Geografie (navazující magisterské studium)

Studijní obor: Kartografie a geoinformatika



**KLASIFIKACE DAT LETECKÉHO LASEROVÉHO
SKENOVÁNÍ V PÍSKOVCOVÝCH SKALNÍCH MĚSTECH**

**CLASSIFICATION OF AIRBORNE LASER SCANNING DATA
IN SANDSTONE LANDSCAPES**

Diplomová práce

Bc. Michaela TOMKOVÁ

Praha 2018

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Jakub Lysák, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne 14. 4. 2018

Michaela Tomková

Poděkování

Na tomto místě bych ráda velmi poděkovala RNDr. Jakubu Lysákovi, Ph.D. za užitečné rady, věnovaný čas, ochotu i všestrannou pomoc mimo jiné i při terénním průzkumu. Dále bych chtěla poděkovat Zeměměřickému úřadu za zapůjčení dat ke zpracování této práce. Můj dík patří také Lucii Beranové za pomoc s manuální filtrací dat. V neposlední řadě děkuji svým blízkým za podporu a trpělivost v průběhu celého studia.

Klasifikace dat leteckého laserového skenování v pískovcových skalních městech

Abstrakt

Práce se zabývá návrhem metody ke klasifikaci dat leteckého laserového skenování v pískovcových skalních městech. Kvůli extrémní členitosti tohoto území a pokrytí hustou vegetací zde běžné filtry nefungují spolehlivě a skalní útvary často shlazují nebo zcela odstraňují z terénních bodů. Návrh metody uvedené v této práci byl inspirován postupem při manuální filtraci dat. Při pohledu na dostatečně husté bodové mračno ve 3D prostoru je člověk schopen od sebe skalní útvary a stromy rozlišit, ačkoliv se jejich vnější tvar příliš neliší. Skalní věž je totiž tvořena body jen z jejího povrchu, takže vytváří „dutou“ elevaci vystupující z okolního terénu, kdežto odrazy od stromu pochází z povrchu jeho koruny, větví a listů uvnitř i z povrchu pod ním. Metoda rozdělí bodové mračno na objekty, jejichž hranice se nachází v lokálních minimech aproximovaného povrchu. Tyto objekty jsou zařazeny do tříd skála, strom nebo mix podle vnitřního uspořádání bodů v rámci objektu. U třídy strom a mix poté následuje filtrace funkcí lasground z nástrojů LAStools. Metoda byla aplikována na data vzniklá spojením bodového mračna ze standardního skenování území ČR a podrobnějšího experimentálního z oblasti Adršpašsko-teplických skal. Výsledky metody byly porovnány s manuálně i automaticky filtrovaným bodovým mračnem. Celková shoda s manuální filtrací dosahuje 85 %, což je zhruba o 10 % více, než se manuální filtrace shoduje s výsledky stávajících automatických metod.

Klíčová slova

letecké laserové skenování, filtrace dat, extrakce a rozpoznávání objektů, skalní útvary, pískovcová skalní města

Classification of Airborne Laser Scanning Data in Sandstone Landscapes

Abstract

This work is concerned with the classification of airborne laser scanning data in sandstone landscapes called "rock cities". Standard filters do not work reliably in such a rugged terrain covered with dense vegetation and in the results the rock formations are smoothed or even removed from the terrain. The method of classification suggested in this work is based on the procedure used in manual filtration. When exploring a sufficiently dense point cloud in 3D, one is able to distinguish rock formations from trees even though their shapes are similar. In contrast to trees, rock pillars are modeled only by points reflected off the surface and therefore they make concave elevations in the ground. Because of penetration of trees, there are points reflected off a treetop, branches, leaves and also ground under the tree. The proposed method segments a point cloud according to local minima in approximated surface and classifies these objects into classes rock, tree, and mix by inner point distribution. Objects in classes tree and mix are then filtered by lasground function from LAStools. The method was tested with merged point cloud consisted of data from the standard airborne laser scanning of the Czech Republic and experimental detailed scanning of the Adršpach-Teplice rocks. The results were compared with manually and automatically filtered point clouds. The overall agreement with manual filtration achieves 85 % whereas other automatically filtered point clouds correspond with it less reliably (the difference is approximately 10 %).

Key words

airborne laser scanning, data filtering, object extraction and recognition, rock formations, sandstone landscapes

OBSAH

1 ÚVOD.....	7
2 LETECKÉ LASEROVÉ SKENOVÁNÍ.....	9
2.1 Filtrační metody.....	10
2.2 Další zpracování bodového mračna.....	13
2.2.1 Segmentace.....	13
2.2.2 Rekonstrukce povrchu.....	14
2.2.3 Klasifikace.....	16
2.3 LLS v pískovcových skalních městech.....	17
3 DATA A ZÁJMOVÉ LOKALITY.....	20
3.1 Popis dat.....	21
3.1.1 Filtrace k porovnání s navrhovanou metodou.....	22
3.2 Zájmové lokality.....	25
4 METODIKA.....	32
4.1 Segmentace.....	33
4.2 Klasifikace objektů.....	34
4.2.1 Řezy.....	34
4.2.2 Klasifikační pravidla.....	35
4.3 Filtrace bodového mračna s využitím objektů.....	36
5 VÝSLEDKY.....	38
5.1 Porovnání filtrací.....	38
5.1.1 Porovnání výsledků s manuální filtrací.....	39
5.1.2 Porovnání výsledků s ostatními metodami filtrace.....	45
6 DISKUZE.....	48
7 ZÁVĚR.....	51
POUŽITÉ ZDROJE.....	53
Seznam literatury.....	53
SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK.....	55
Seznam obrázků.....	55
Seznam tabulek.....	55
PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK.....	56
SEZNAM PŘÍLOH.....	57

1 ÚVOD

Pískovcové skály jsou jedinečné přírodní útvary demonstrující nekonečnou rozmanitost přírody. Na území České republiky je jejich vznik spojen s ukládáním sedimentů během mořské transgrese ve svrchní křídě v oblastech České křídové pánve. Již kompaktní sedimenty byly během alpínsko-himalájské orogeneze následkem tlaku rozlámány v kry, z nichž některé byly vyzdviženy a vystaveny tak erozi. Ta se soustředí do puklin, jež podle Cílka a kol. (2007) vznikly ještě v době před obnažením horniny. Podél těchto puklin se oddělují typické kvádrové skalní útvary s plochou vrcholovou plošinou a prakticky kolmými stěnami. Právě uskupení těchto útvarů v podobě skalních věží, jehel, stěn apod. oddělených od sebe úzkými puklinami a roklinami nazýváme pískovcovým skalním městem (obr. 1).



Obr. 1 – Ukázka rozdílného charakteru terénu ve skalním městě a jeho okolí
Snímek nabízí výhled z okraje Adršpašského skalního města směrem na Dolní Adršpach.
Na horizontu lze vidět Křížový vrch.

Zdroj: vlastní fotografie

Největším celistvým skalním městem na území České republiky jsou Adršpašsko-teplické skály. Z důvodů, které budou popsány v kapitole 3, byla v práci použita data právě z této oblasti, a proto jí je věnována zvýšená pozornost. Adršpašsko-teplické skály jsou součástí Broumovské vrchoviny, kde se nachází i další skalní oblasti (Broumovské stěny, Křížový vrch, Ostaš a další). Silněji působily erozní procesy na Adršpašské skály, ve kterých nenajdeme již žádné výrazné zbytky původního zarovnaného povrchu. Na rozdíl od toho Teplické skály jsou tvořeny spíše relativně kompaktními skalními masivy,

kteře jsou protkány velkým množstvím puklin. Detailnější popis některých oblastí skalního města, které byly vybrány pro testování navržené metody v této práci, je uveden v podkapitole 3.2.

Ročně navštíví Adršpašské skály okolo 300 tisíc návštěvníků, Teplické skály jen zhruba 60 tisíc. Počet turistů především během hlavní sezóny začíná být alarmující, protože tím ztrácí kouzlo nejen samotná prohlídka skal, ale trpí jím hlavně zdejší příroda. Její unikátnost a zranitelnost se lidé snaží již od roku 1933 chránit. Dnes má statut národní přírodní rezervace uvnitř chráněné krajinné oblasti Broumovsko.

Zcela specifickým využitím skalních útvarů je horolezectví. Právě v Adršpašsko-teplických skalách byly položeny základy tradičnímu pískovcovému lezení. Ve 20. letech 20. století sem začali přicházet saští horolezci, kterým náleží velké množství prvovýstupů. Až v poválečné době se do popředí dostali českoslovenští horolezci, nazývaní také „pískáři“.

Turisty, horolezce, vědce, správce a strážce, ale také záchranné složky zasahující v oblasti skalních měst spojuje jedna společná potřeba, a to orientace a navigace v tomto extrémně členitém terénu. Tvorbu map zobrazujících skály označil R. Čapek (1973) za jeden z nejtěžších úkolů kartografa, protože vedle složitého mapování v terénu způsobuje obtíže znázornění skal především jejich převažující vertikální rozměr nad tím horizontálním. Nutno podotknout, že s příchodem digitální kartografie se mnohé činnosti v oblasti kartografie zjednodušily, v případě skalních útvarů tomu tak ale není. Do jejich zákresu promlouvala praxe a nejspíš také talent kreslíře, které naprogramovat nelze. Na druhou stranu polohová přesnost i tvar skalních útvarů na dřívějších mapách často nebyly opřeny o měření v terénu, protože to je v některých částech skalních měst prakticky nemožné.

Rozvoj geoinformatiky s sebou přinesl i digitální model reliéfu (DMR), který obsahuje informace o terénu a tedy i o skalních útvarech. Průlom v možnosti jeho tvorby ve skalních městech způsobila technologie leteckého laserového skenování (LLS), která zjednodušeně řečeno dokáže nahlédnout na povrch i pod vegetací. Z dostatečně podrobného DMR lze vytvořit reprezentaci skalních útvarů vhodnou do digitálních topografických databází (Tomková, 2015) a tu následně pomocí vhodných metod zobrazit v mapě velkého měřítka. V takové mapě by měl být uživatel schopen nalézt odpovědi na základní otázky týkající se pohybu v terénu. Ve skalních městech je důležitá především průchodnost terénem, tedy zajímá nás, zda se například v rokli nachází skalní stupeň, který znemožňuje průchod. Spolehlivost těchto údajů ovšem závisí na správnosti a úplnosti DMR.

Kapitola 2 se zabývá tím, jakým způsobem jsou v současné době data LLS zpracovávána i proč toto zpracování neposkytuje uspokojivé výsledky v oblastech skalních měst. Nejedná se jen o tvorbu DMR, ale především o kroky, které tomu předchází – filtrace a klasifikace dat. Hlavním cílem této práce je navržení nové metody klasifikace, která je šitá na míru podmínkám v pískovcových skalách a opírá se o přístup, který využívá člověk při manuální filtraci. Nezbytným předpokladem pro vznik takové metody je dostatečně husté bodové mračno. Autorka předpokládá, že tuto podmínku splňují data LLS dostupná právě z Adršpašsko-teplických skal. Popisem vstupních dat a zájmových lokalit, kde byla navržená metoda testována, se zabývá kapitola 3. Vlastní metoda je popsána v kapitole 4. Dále v kapitole 5 a 6 následuje popis dosažených výsledků a zhodnocení úspěšnosti navržené metody.

2 LETECKÉ LASEROVÉ SKENOVÁNÍ

Letecké laserové skenování (LLS) je moderní metodou rychlého sběru velkého množství prostorových dat s vysokou přesností. Jeho počátky se datují již do 60. let, na svůj rozmach ovšem čekalo až do konce 20. století kvůli nedostatečným podpůrným technologiím. Shan & Toth (2009) LLS považují za nejdůležitější technologii sběru prostorových dat od přelomu tisíciletí. Ačkoliv ještě tato metoda nedosáhla tak bohaté historie jako například letecká fotogrammetrie, díky velkému zájmu o ní se velmi rychle rozvíjí. Jedním z posledních trendů v této oblasti je vývoj menších a lehčích laserových skenerů, které je možné upevnit na bezpilotní letoun. I díky tomu se tato technologie stává finančně dostupnější a nalézá uplatnění v mnoha odvětvích.

LLS se řadí mezi tzv. *time-of-flight based optical 3D measurement systems* (Vosselman & Maas, 2010), protože principem sběru prostorových dat pomocí této technologie je měření času, který uplyne od vyslání pulzu po jeho návrat zpět do skeneru. Díky známé rychlosti šíření tohoto pulzu je možné dopočítat vzdálenost skeneru od bodu, jenž způsobil odraz paprsku. Vlnová délka paprsku bývá z blízké infračervené části spektra při běžném skenování zemského povrchu, pro batymetrické účely se používá kratší vlnová délka náležící do modro-zelené části spektra.

Pro výpočet geografických souřadnic odrazu je kromě samotné vzdálenosti nutné znát směr, ve kterém byl paprsek vyslán ze skeneru, úhly natočení skenovacího zařízení a polohu tohoto zařízení v požadovaných souřadnicích. Změnu směru skenování v rovině kolmé na směr letu nosiče nejčastěji zajišťuje rotující zrcadlo nebo hranol, ale lze využít i jiného než mechanického zařízení – například optických vláken. V závislosti na použitém mechanismu se liší výsledná stopa bodů na zemském povrchu (Dolanský, 2004). Úhly rotace skenovacího zařízení ve třech osách měří inerciální měřicí soustava (IMU - *inertial measurement unit*), která je součástí inerciálního navigačního systému (INS), a polohu celé soustavy získává zařízení přijímající signál globálního navigačního satelitního systému (GNSS).

Vyslaný paprsek má určitou divergenci, která definuje okamžité zorné pole senzoru (IFOV – *instant field of view*). Z tohoto důvodu nevznikne z každého pulzu právě jeden odraz od objektu na zemském povrchu, ale signál se postupně odrazí zpět od všeho, na co dopadne a co ho plně nepohlčí. S tím souvisí jedna ze zásadních výhod této technologie oproti fotogrammetrii, a to je možnost získání odrazů i od vnitřních částí stromu a hlavně terénu nacházejícím se pod vegetací. Jak hluboko paprsek projde, záleží na hustotě koruny stromu a olistění, ale také na energii samotného paprsku. Strategie

zaznamenání jednotlivých odrazů se vyvíjejí směrem ke kontinuálnímu záznamu přijímané energie pulzu. Takto vytvořená data se nazývají *full-waveform*. Každý bod díky tomu může nést ještě doplňkové informace o amplitudě a šířce odrazu, jejichž praktická využitelnost je stále předmětem výzkumu (v souvislosti s pískovcovými skalními městy např. Poláková, 2016).

Výsledkem sběru dat pomocí LLS je tzv. bodové mračno, tedy nepravidelně rozmístěné body ve 3D prostoru. Jednou z vlastností tohoto bodového mračna je průměrná hustota bodů, která se odvíjí od zmíněného množství zaznamenaných odrazů paprsku, ale také od dalších parametrů skeneru i letového plánu, jako jsou frekvence vysílání pulzů, letová výška, překryt letových pásů apod. Se zvyšující se hustotou bodů se zvyšuje i množství informací o terénu a objektech na něm obsažené v bodovém mračnu a rozšiřují se možnosti uplatnění těchto informací, pokud jsme schopni je z dat získat. V souvislosti s tím přibývá počet algoritmů a nástrojů na zpracování dat.

Jedním z důležitých cílů sběru prostorových dat v oblasti geoinformatiky je vytvoření digitálního modelu reliéfu (DMR), jež je nezbytným vstupem do analýz terénu a má značný význam i při velkoměřítkovém mapování. Důležitým procesem při transformaci původních dat na DMR je filtrace, tedy odstranění takových bodů z bodového mračna, které nevznikly odrazem od terénu. Vedle manuální filtrace, která je velmi časově náročná, existuje množství filtračních algoritmů, jimiž se blíže zabývá podkapitola 2.1.

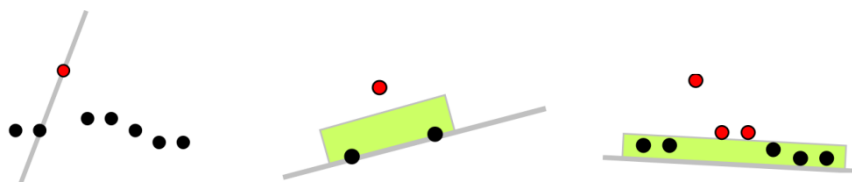
Protože bodové mračno neobsahuje jen informace o terénu, ale také o objektech na něm, jsou vyvíjeny metody i pro další zpracování těchto dat. Některé z nich jsou popsány v podkapitole 2.2. Podkapitola 2.3 se zaměřuje na specifika dat LLS v oblastech pískovcových skalních měst.

2.1 Filtrační metody

Filtrace dat LLS slouží k výběru bodů, jež pocházejí z odrazu od terénu. Algoritmů, které produkují filtrované bodové mračno, je celá řada a na jejich klasifikaci lze nahlížet z několika hledisek. Shan & Toth (2009) například zmiňují dva základní přístupy, a to zda se filtruje přímo bodové mračno nebo rastr vytvořený na základě naskenovaných bodů. Výpočetně poměrně nenáročné analýzy nad rastry tvořily dostatečnou protiváhu faktu, že při transformaci bodů na rastr dochází ke ztrátě informace. S dnešním stavem výpočetní techniky se argument kratšího výpočtu stal méně důležitým a převažují filtrační metody zpracovávající data v podobě bodového mračna.

Samostatná prostorová informace o jediném bodu nestačí k jeho úspěšnému zařazení mezi terénní nebo neterénní body, proto vždy potřebujeme znát body v jeho okolí. Rozsah tohoto okolí lze považovat za jedno z hledisek dělení filtračních algoritmů (Sithole & Vosselman, 2003) (obr. 2). Polohu bodu je možné porovnávat s polohou jiného bodu nebo s několika okolními body. Třetí kategorii v tomto dělení tvoří algoritmy, které zpracovávají více než jeden bod najednou.

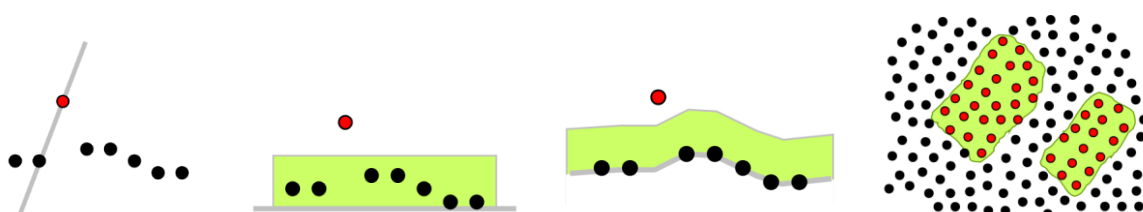
Podle základního konceptu filtru (obr. 3) lze hovořit o filtračních metodách založených na sklonu (*slope based*), vzdálenosti od roviny (*block-minimum*) a vzdálenosti od parametrizovaného povrchu (*surface based*) (Sithole & Vosselman, 2003). Všechny tyto kategorie pracují s danou mezí sklonu či vzdálenosti, od které jsou body považovány za mimoterénní. Vycházejí tedy z představy, že průběh terénu nevykazuje žádné náhlé výrazné změny. Jak bude blíže popsáno v podkapitole 2.3, právě tento předpoklad nebývá v pískovcových skalních městech splněn. Zcela odlišnou kategorii tvoří algoritmy pracující se segmenty či shluky bodů (*clustering, segmentation*). Stejný zdroj uvádí ještě další kategorizace, například dělení na jedнокrokové a iterativní filtrační metody.



Obr. 2 – Klasifikace filtračních metod podle počtu zpracovávaných bodů

Vlevo je ilustrace filtrace porovnávající bod s jiným bodem, uprostřed filtrace porovnávající bod s více body a vpravo filtrace porovnávající několik bodů najednou.

Zdroj: Sithole & Vosselman (2003)



Obr. 3 – Klasifikace filtračních metod podle základního konceptu filtru

Zleva ilustrace filtrace založené na sklonu, vzdálenosti od roviny, vzdálenosti od parametrizovaného povrchu a na segmentaci bodového mračna.

Zdroj: Sithole & Vosselman (2003)

Dále budou podrobněji popsány principy dvou běžných filtračních metod z důvodu jejich použití v této práci. Často se v literatuře uvádí mezi základními metodami filtrace i morfologické filtry založené na matematické morfologii, v praxi ovšem nalézají využití spíše ke zpracování obrazu než filtrování dat LLS. Kromě zmíněných metod existuje velké množství spíše experimentálních algoritmů, které kombinují různé přístupy a myšlenky. Z důvodu potřeby spolehlivého filtrování komplexních scén s budovami, vegetací, terénními hranami a svahy jsou například vyvíjeny filtry s lokálně proměnnými parametry, které se adaptují pomocí energetické funkce (*bending energy function*) (Hu a kol., 2014).

Algoritmus postupného zhušťování TIN

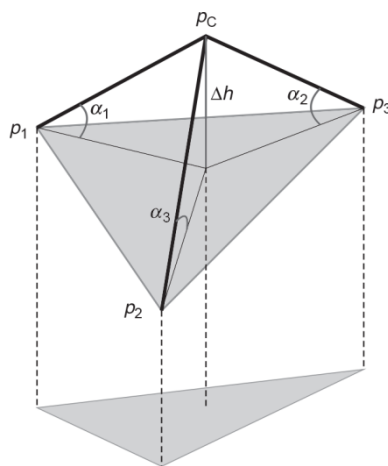
Algoritmus postupného zhušťování TIN (*progressive triangular irregular network densification*) byl poprvé prezentován P. Axelssonem v roce 2000. Jeho princip byl několikrát implementován, například v softwaru *TerraScan* nebo v nástrojích *LAStools* pod názvem *lasground* (rapidlasso GmbH, 2018).

Zhušťování TIN je iterační algoritmus. Při inicializaci procesu jsou všechny body považovány za mimoterénní kromě několika vybraných, které tvoří počáteční model terénu. Způsob výběru těchto terénních bodů se v jednotlivých implementacích mírně liší, vždy by se ale mělo jednat o lokálně nejnižší body, protože právě tyto body lze považovat téměř s jistotou za terénní. Axelsson (2000) vybírá nejnižší body v gridu o velikosti větší, než je největší budova na zpracovávaném území, což je sice výpočetně jednoduché, ale necitlivé k lokálním proměnám terénu. Funkce *lasground* v této souvislosti pracuje s parametrem *step*. U členitějšího terénu navíc nabízí intenzivnější hledání iničiálních bodů (*extra_fine*, *ultra_fine*, *hyper_fine*), naopak v rovinnatém prostředí pro urychlení výpočtu je možné použít zjednodušené hledání (*coarse*, *extra_coarse*). Podrobnější popis implementace této části funkce *lasground* ovšem není k dispozici.

Model terénu je tvořen trojúhelníkovou sítí s vrcholy v bodech, které již algoritmus označil za terénní. V každé iteraci jsou vypočítány určité vlastnosti neterénních bodů vůči nejbližší stěně trojúhelníkové sítě a dále jsou tyto vlastnosti porovnány s nastavenými mezemi pro zařazení mezi

terénní body. Těmito vlastnostmi jsou nejčastěji vzdálenost od stěny trojúhelníkové sítě a úhly mezi zkoumaným bodem a vrcholy stěny. V popisu algoritmu podle Axelssona jsou meze vypočítány přímo z dat při každé iteraci, v případě lasground je možné některé z nich ovlivnit. Parametr *offset* určuje maximální vzdálenost bodu od stěny sítě pro zařazení mezi terénní body. Meze pro úhly u vrcholů v této implementaci nastavit nelze. Navíc je ale možné parametrem *spike* určit horní hranici výšky bodu nad iniciální sítí. Body nacházející se výše, než je tato mez, jsou vyřazeny z výpočtů a označeny za neterénní již v první iteraci. Iterační proces končí, pokud žádný bod nesplňuje požadované podmínky pro přiřazení do terénu.

Podle Sithole & Vosselman (2003) produkuje tento algoritmus nepřesnosti v místech výrazných terénních hran, kde ovšem selhává většina zkoumaných filtračních metod. Ve studii je navíc u postupného zhušťování TIN zmíněno, že terénní model vytvořený tímto algoritmem může být ovlivněn odlehlými nízkými body. Na druhou stranu se jedná o poměrně spolehlivou metodu z hlediska odfiltrování většiny typů budov a vzrostlé vegetace.



Obr. 4 – Vztah bodu a trojúhelníkové sítě při výpočtu algoritmu postupného zhušťování TIN

Obrázek ukazuje jednu ze stěn triangulační sítě s vrcholy v terénních bodech p_1 , p_2 a p_3 . Zkoumaný bod p_c se nachází ve výšce Δh nad touto stěnou a s jednotlivými vrcholy svírá úhly α_1 , α_2 a α_3 .

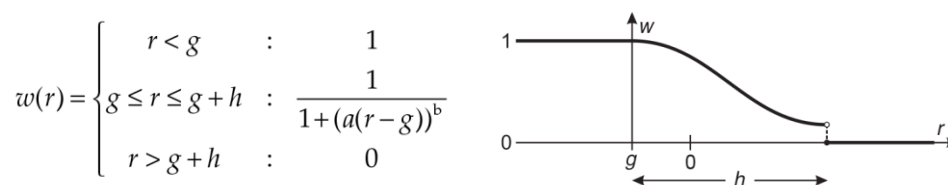
Zdroj: Shan & Toth (2009), upraveno

Robustní interpolace

Robustní interpolace je metoda patřící do kategorie filtrací, které rozhodují o příslušnosti bodu mezi terénní nebo neterénní body na základě jeho vzdálenosti od parametrizovaného povrchu (*surface based*). Algoritmus vyvinuli K. Kraus a N. Pfeifer na Technické univerzitě ve Vídni a publikovali ho v roce 1998. V této základní podobě bylo jeho účelem především odfiltrování vegetace v zalesněném terénu. V roce 2001 N. Pfeifer a kol. rozšířili tuto metodu o hierarchický přístup, který ji adaptoval na filtraci dat z urbánních oblastí. Hierarchický přístup spočívá ve využití několika stupňů přiblížení či rozlišení dat. Výpočet začíná na nejhrubším stupni a postupně přechází do většího detailu. Hierarchická robustní interpolace je implementována například v softwaru SCOP++, základní verzi bez hierarchického přístupu je možné nalézt v systému OPALS (*Orientation and Processing of Airborne Laser Scanning data*).

Na rozdíl od předchozí metody jsou na počátku iteračního cyklu všechny body bodového mračka považovány za terénní a během výpočtu jsou některé z nich odfiltrovány. Se stejnou vahou všech bodů je vypočítána první aproximace povrchu pomocí metody lineární predikce, označované také jako jednoduchý kriging (*simple kriging*). Na základě známé kovarianční matice je vytvořena funkce

aproximující povrch, která neprochází datovými body, nejedná se tedy o exaktní interpolaci. Pro každý bod lze vypočítat reziduum, které se rovná rozdílu výšky bodu a aproximovaného povrchu v bodě se stejnými souřadnicemi x a y . Podle velikosti rezidua je každému bodu přiřazena váha od 0 do 1, jak je ukázáno na obr. 5. S touto vahou bod vstupuje v následující iteraci do výpočtu nové aproximace povrchu. Body s váhou 0 jsou považovány za neterénní.



Obr. 5 – Váhová funkce pro robustní interpolaci

Váha w je závislá na velikosti rezidua r . Pro všechna r menší než daná dolní mez g je váha w rovna 1. Naopak pro r větší než horní mez $g + h$ je váha w rovna 0, jedná se tedy o neterénní body. Mezi těmito mezemi je váhová funkce počítána podle uvedeného předpisu, kde parametry a a b ovlivňují strmost funkce.

Zdroj: Shan & Toth (2009), upraveno

Sithole & Vosselman (2003) považují tuto metodu za spolehlivou v mnoha situacích, navíc v porovnání s předchozí metodou je robustnější i v případě odlehlých nízkých bodů. S terénními hranami si ovšem také uspokojivě neporadí. Přesto je využití této metody velmi časté, například s jejím využitím byla filtrována data z celého území České republiky v softwaru SCOP++ (ZÚ & VGHMÚř, 2016). Kombinaci robustní interpolace se segmentací představili Tóvári a Pfeifer (2005). Pomocí *region growing* algoritmu jsou v této metodě vytvořeny segmenty, jimž je následně jako celku připisována hodnota váhové funkce a samotná interpolace je počítána ze souřadnic středů jednotlivých segmentů.

2.2 Další zpracování bodového mračna

S přibývajícím hustotou bodového mračna v něm přibývají informace nejen o průběhu terénu, ale také o dalších objektech na zemském povrchu. Tyto informace lze využít při modelování objektů nebo k jejich mapování ve vektorové podobě následně použitelné v geoinformačních systémech. Značně rozvíjeným směrem v této oblasti je extrakce a modelování budov pomocí hledání liniových a rovinných prvků v bodovém mračnu. K modelaci jednotlivých stromů se používá spíše pozemní laserové skenování, protože zachytí korunu stromu lépe než při pohledu shora, nicméně k inventarizaci zapojeného porostu poslouží i data LLS. Lze z nich například vypočítat výšku stromů nebo odhadnout objem hmoty (Kauranne a kol., 2017). K těmto cílům často vedou kroky přes segmentaci a klasifikaci bodového mračna (viz oddíly 2.2.1 a 2.2.3). Při zpracování bodového mračna vzniklého pozemním laserovým skenováním, ale také jako vstup do některých segmentačních algoritmů může být potřeba vytvoření povrchu tělesa či skenovaného území, k čemuž slouží metody uvedené v oddílu 2.2.2.

2.2.1 Segmentace

Proces segmentace může být chápán jako mezikrok u některých algoritmů filtrace i klasifikace bodového mračna. Výsledkem segmentace jsou objekty, tedy určitým způsobem homogenní oblasti, které představují vyšší úroveň informace než samostatné body (Sithole, 2005). Účelem segmentace

většinou bývá nalezení reálných objektů, ale často v různé míře podrobnosti (např. budovu si lze představit jako jeden objekt, ale může se také skládat z objektů zdi a střechy, případně komínu, oken atd.). Situace, kdy se dva objekty v prostoru dotýkají (strom a budova) či se přímo prolínají (větve dvou stromů), uvádí Sithole (2005) jako typické potíže metod segmentace, protože takové objekty bývá složité oddělit.

Grilli a kol. (2017) dělí segmentační algoritmy do čtyř hlavních kategorií:

- Hranové detektory (*edge based*) fungují ve dvou krocích – nejdříve detekují hranice oblastí a následně shlukují body uvnitř těchto oblastí do výsledných objektů.
- Tvorba regionů (*region growing*) začíná v několika zvolených bodech (*seed points*), ze kterých se region rozšiřuje, dokud má jeho okolí podobné vlastnosti. Volba těchto počátečních bodů je stěžejní částí algoritmu při přístupu zespodu nahoru, tedy od několika málo bodů po zařazení všech. Opačný přístup shora dolů začíná jedním regionem, který zahrnuje všechny body a postupně je dělen na menší homogennější objekty.
- Hledání liniových a rovinných prvků (*model fitting*) v bodovém mračnu umožňuje segmentaci uměle vytvořených objektů. Mezi běžně používané algoritmy k detekci střech domů nebo k nalezení půdorysů budov patří Houghova transformace a *Random Sample Consensus* (RANSAC).
- Poslední kategorii segmentací tvoří *machine learning* metody, kam patří hierarchické shlukování, *K-means*, neurální sítě apod. Ty je dále možné rozdělit na řízené a neřízené algoritmy, přičemž první zmíněné vyžadují vytvoření trénovacích dat, na kterých se algoritmus naučí objekty rozpoznávat.

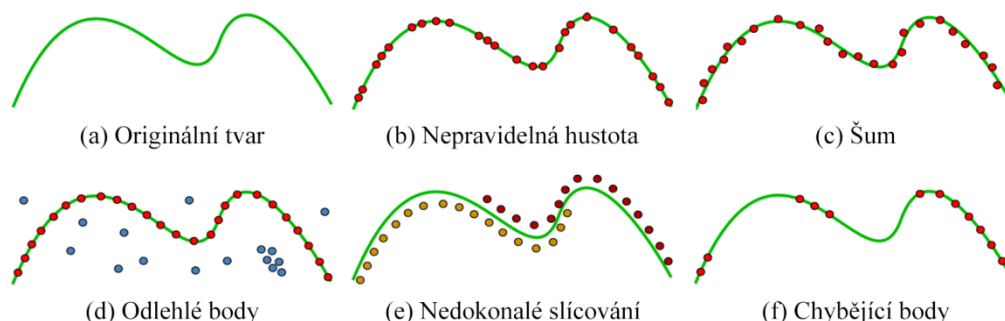
Mnoho segmentačních metod bylo vyvinuto v souvislosti se zpracováním digitálního obrazu, a tak se používají na bodové mračno převedené do rastrové podoby. V případě velmi řídkého bodového mračna lze vytvořit rastrovou reprezentaci interpolací všech bodů. Při zpracování hustších dat ovšem dochází k situaci, kdy v průmětu blízké body mohou mít i velmi rozdílnou výšku, způsobenou odrazy od vegetace i terénu pod ní, a proto je potřeba postupovat sofistikovaněji. Z tohoto důvodu se následující oddíl zabývá metodami rekonstrukce povrchu z bodového mračna.

2.2.2 Rekonstrukce povrchu

Rekonstrukce povrchu z bodového mračna je úloha s nekonečným množstvím řešení, pokud nejsou určeny omezující podmínky a požadavky na vytvořený povrch. Tyto požadavky vyplývají z účelu tvorby povrchu i způsobu získání dat. Berger a kol. (2014) zmiňují časté nedokonalosti bodového mračna (obr. 6), jejichž výskyt považují za nevyhnutelný při skenování scény reálného světa a jimiž jsou algoritmy pro rekonstrukci povrchu do různé míry ovlivněny.

V případě rekonstrukce povrchu z bodového mračna vzniklého při LLS za účelem vytvoření rastru, který může sloužit k segmentaci, není možné považovat všechny body za součást tohoto povrchu. Ačkoliv laserový paprsek neprojde k žádnému předmětu, který je shora zcela zakrytý jiným předmětem, vegetaci je pro další zpracování vhodné do určité míry generalizovat. Pokud by byly do povrchu zahrnuty veškeré body stromu, vzniklý povrch by byl velmi členitý a především nereálný, protože by z důvodu pravděpodobně malé hustoty dat a extrémní složitosti nevymodeloval kmen a jednotlivé větve a listy. Míra použité generalizace je klíčovým parametrem algoritmů, které dokáží takový povrch aproximovat.

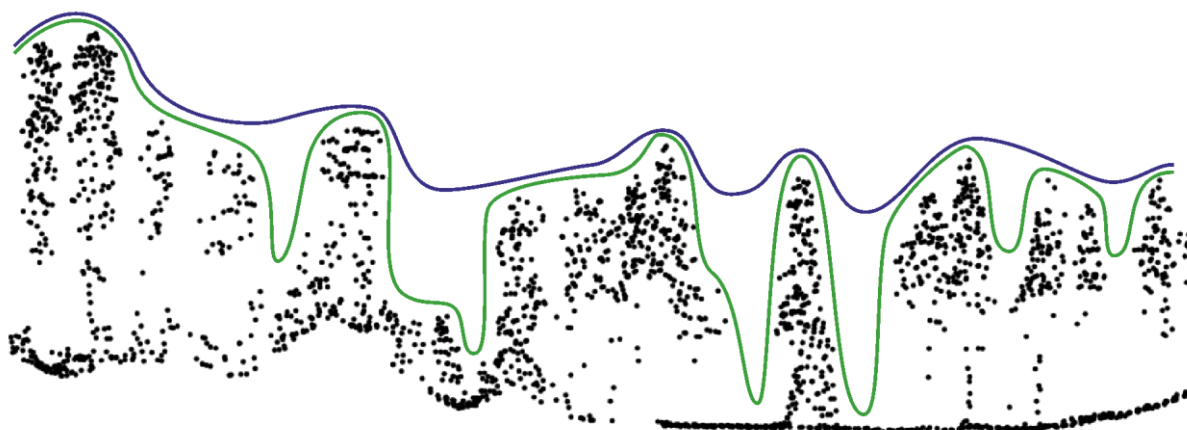
Největší generalizace v tomto kontextu dosahuje konvexní obálka. Větší míru detailu lze dosáhnout přesnější aproximací povrchu. Intuitivně si ji lze představit například pomocí zakrytí dat závojem, dekou či kterýmkoliv jiným tvarovatelným materiálem. Závoj se zachytí o body a podle použitého materiálu se mezi těmito body vytvaruje, jak je ukázáno na obr. 7.



Obr. 6 – Nedokonalosti bodového mračka z pohledu rekonstrukce povrchu

Zeleně je ukázán původní tvar, který chceme z bodů v bodovém mračku rekonstruovat. Nepravidelná hustota (a) v závislosti na měřítku přechází až v chybějící body (f). Zatímco šum (c) bývá častým jevem, odlehlé body (d) představují spíše chyby v bodovém mračku vzniklé při jeho pořizování. Na rozdíl od toho nedokonalé slícování (e) je chybou vzniklou při spojení bodových mračen z jednotlivých letových pásů v případě leteckého skenování nebo z odlišných stanovišť pro pozemní skenování.

Zdroj: Berger a kol. (2014), upraveno



Obr. 7 – Rozdílná míra generalizace při rekonstrukci povrchu

Obrázek ilustruje dvě možnosti aproximace povrchu ze stejných dat LLS. Modře je vyznačen povrch tvořený mírně tvárným materiálem („dekou“) a zeleně jemnějším a tvárnějším materiálem („závojem“).

Zdroj: ČÚZK – data podrobného LLS (2013) a ČÚZK – data standardního LLS (2013)

Přirovnání k materiálům vytvarovaným podle datových bodů se používá například u interpolační metody spline. Základní podoba této metody se nazývá také *thin plate spline*, protože napodobuje povrch vytvořený tenkým plechem, který se vyznačuje hladkým, spojitým průběhem a minimální křivostí. Při výrazných změnách interpolované hodnoty na malé vzdálenosti ovšem spline často dosahuje hodnot ležících výrazně mimo rozsah datových bodů. Pro přijatelnější výsledky v takových případech byl vyvinut spline s tenzí (Mitaš & Mitašová, 1988), který do minimalizačního kritéria zahrnuje i první derivaci a tím přibližuje použitý materiál spíše membráně nebo gumě. Míra významnosti minimalizace sklonu je ovlivněna váhovým parametrem označovaným φ .

Rovnice popisující výpočet splinu s tenzí jsou následující:

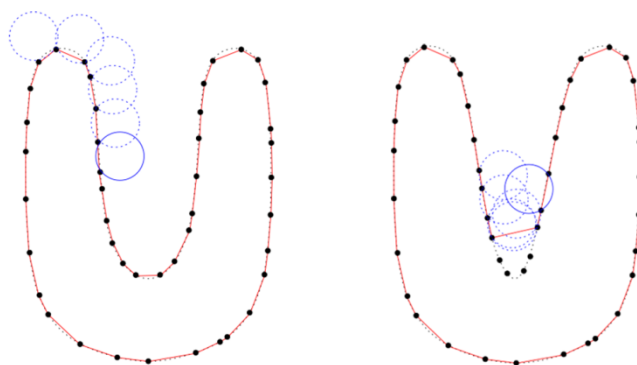
$$S(x, y) = T(x, y) + \sum_{j=1}^N \lambda_j R(r_j)$$

$$T(x, y) = a_1$$

$$R(r) = -\frac{1}{2\pi\varphi^2} \left[\ln\left(\frac{r\varphi}{2}\right) + c + K_0(r\varphi) \right]$$

kde N je počet nejbližších bodů, které mají na konkrétní hodnotu vliv, λ_j a a_1 jsou koeficienty získané řešením lineární soustavy rovnic, r je vzdálenost datového bodu od počítaného bodu, φ je váhový parametr, c je Eulerova konstanta a K_0 je Besselova funkce. Pro použití této metody v diskutovaném kontextu je ovšem nutné vybrat z bodového mračna jen ty body, kterými má funkce skutečně procházet (např. nejvyšší body v gridu).

U *ball-pivoting* algoritmu (Bernardini a kol., 1999), který je patentovaný společností IBM, určuje míru generalizace průměr koule, která se kutálí po povrchu a zapadne jen do těch mezer, které jsou dostatečně velké (obr. 8). Předpokladem této metody je ovšem rovnoměrně husté bodové mračno, což u dat LLS nebývá zaručeno. Některé další algoritmy, které jsou prakticky využívány v počítačové grafice, vyžadují body se známým směrem normálového vektoru, čímž je určena vnitřní a vnější strana objektu (např. Poissonův algoritmus podle autorů Kazhdan a kol. (2006)).



Obr. 8 – Ball-pivoting algoritmus

Obrázek vlevo ilustruje situaci, kdy jsou všechny body součástí povrchu. Na obrázku vpravo se ovšem k některým bodům koule kvůli svému průměru nedostala, a tak byl povrch v tomto místě vymodelován bez nich.

Zdroj: Bernardini a kol. (1999)

2.2.3 Klasifikace

Pomineme-li to, že filtrace bývá prováděna za účelem zachování jen terénních bodů, v obecném pojetí se jedná o formu klasifikace. Proces klasifikace umožňuje řazení bodů do libovolného počtu tříd, mezi kterými mohou například v urbánní oblasti být terén, voda, vegetace, střecha, zeď, objekt na střeše a neurčitý objekt (Xu a kol., 2012). Předmětem klasifikace nemusejí být jen jednotlivé body, ale řadit do tříd lze i segmenty nebo voxely, případně super-voxely. Voxel představuje obdobu pixelu ve 3D prostoru, zatímco super-voxel je mezistupněm mezi voxelem a segmentem. Například Lim & Suter (2009) vyvinuli klasifikaci pracující se super-voxely, které jsou tvořené shlukováním několika

blízkých bodů s podobnou geometrickou a barevnou strukturou. Nejčastěji ovšem následuje klasifikace po segmentaci bodového mračka, jak uvádí Sithole (2005) i Grilli a kol. (2017).

Pro určení příslušnosti bodu ke třídě slouží příznaky a klasifikační pravidla. V závislosti na tom, zda klasifikujeme body, voxely nebo segmenty, se liší i použité příznaky. V případě bodů to mohou být například geometrické parametry, vypočítané často na základě blízkého okolí bodu (normálový vektor, rozptyl výšek apod.), nebo spektrální vlastnosti samotného odrazu (šířka a amplituda odrazu). Na rozdíl od toho při zpracování segmentů se k využití nabízí také topologické vlastnosti (např. pokud se pod segmentem nachází další segment, nejedná se o terén), přičemž ty geometrické a spektrální se používají v agregované podobě. Pro větší robustnost a schopnost uchopení i komplexních objektů byla ve studii autorů Xu a kol. (2012) použita kombinace jednotlivých bodů a dvou druhů segmentů.

Klasifikační pravidla se získávají řízenou nebo neřízenou klasifikací, případně je lze přímo nadefinovat (např. některá jednoduchá topologická pravidla). Neřízená klasifikace neumožňuje zásah uživatele do způsobu definování tříd a vyžaduje postprocessing, ve kterém jsou vytvořené třídy spojovány a pojmenovány. Na rozdíl od toho pro použití řízené klasifikace je nutné třídy předem nadefinovat a manuálně klasifikovat určitou část dat, která poslouží jako trénovací.

2.3 LLS v pískovcových skalních městech

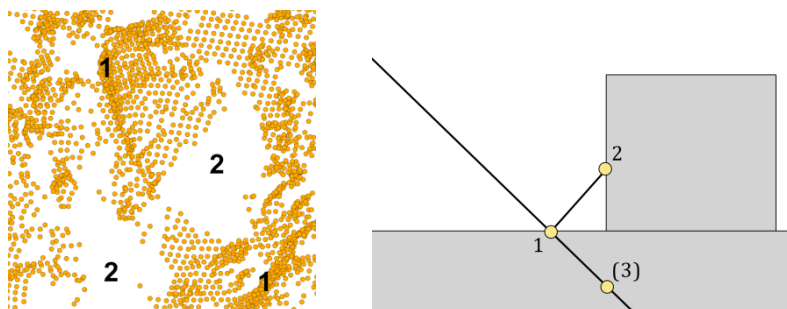
Pískovcová skalní města tvoří velmi členitý komplexní terén. LLS v tomto prostředí představuje jedinečnou možnost zachycení průběhu terénu pod hustou, povětšinou jehličnatou vegetací, což není optickým snímkováním možné ani mimo vegetační období. Kromě této významné výhody s sebou ovšem LLS v pískovcovém reliéfu přináší spíše potíže spojené s pořizováním i následným zpracováním dat.

Specifika bodového mračka

Kvůli zmíněné hustotě vegetace je počet odrazů od terénu pod stromy snížen stejně jako v jiném zalesněném prostředí. Mezi další nedostatky popsatelné i v jiných oblastech lze zařadit vznik stínů a lokálního zhuštění bodů (obr. 9 vlevo). Ke zhuštění bodů typicky dochází na kolmých stěnách (skalních stěnách i stěnách budov), které byly orientovány zhruba rovnoběžně se směrem letu a nenacházely se kolmo pod skenerem, ale spíše na okraji záběru. V takovém případě je stěna ze skeneru viditelná ze strany a dopadne na ni více paprsků. Vzniklé body mají ovšem velmi podobné souřadnice a při průmětu do roviny os x a y tvoří shluk blízkých bodů. Naopak za touto stěnou vzniká stín, kam žádný paprsek nedopadl kvůli vysoké překážce. Při překrytu jednotlivých pásů bodů často dochází k eliminaci tohoto jevu. Pravděpodobnost úspěchu se zvyšuje při nalétání území křížem v několika různých směrech. Na druhou stranu v pískovcovém skalním městě se nachází mnoho poměrně úzkých puklin a trhlin, které navíc bývají i zakryté vegetací, a tím pádem je obtížné získat odrazy z jejich dna, natož ze stěn.

Zajímavostí pískovcových skalních útvarů v datech LLS je fakt, že při pohledu na skalní objekt ze strany, jak bylo popsáno v předchozím odstavci, může dojít k zachycení převisu, který v tomto terénu není ničím neobvyklým. Především z pohledu dalšího zpracování dat se ovšem jedná o velmi problematickou záležitost, protože DMR bývá tvořeno ve 2,5D prostoru, jehož definici převis nespĺňuje.

Vliv na polohovou i výškovou přesnost bodů může mít jev zvaný několikanásobný odraz (*multipath effect*) (obr. 9 vpravo). Laserovým skenerem je měřen jen čas, za který se paprsek do zařízení vrátí, a bod je umístěn do příslušné vzdálenosti od skeneru na polopřímce odpovídající směru vyslání paprsku. Pokud ovšem dojde k odrazu paprsku například od vodorovného povrchu směrem ke kolmému a od něj zpět do skeneru, čas byl tímto odrazem prodloužen a bod je ve výsledku umístěn dál, než se nachází bod prvního odrazu.



Obr. 9 – Nedostatků bodového mračka v pískovcových skalních městech

Vlevo je ukázka zhuštění dat na skalních stěnách (1) a stínu (2). Zobrazeno je jen jeden letový pás dat ČÚZK – data podrobného LLS (2013). Vpravo je ilustrace několikanásobného odrazu. První odraz byl v bodě 1, druhý v bodě 2, ale výsledný bod byl chybně vypočítán v bodě 3.

Specifika filtrace

Pískovcová skalní města dostala svůj název díky tomu, jak moc se podobají skutečným městům. Vysoké kolmé skalní stěny připomínají zdi domů, rovné vrcholové plošiny představují střechy a ulice mezi domy jsou tvořeny úzkými hlubokými puklinami, po jejichž dně často skutečně cesty vedou. Účel filtračních algoritmů spočívá mimo jiné v odfiltrování odrazů vzniklých od zdí a střech domů. Vzhledem k podobnosti útvarů ve skalních městech z principu dochází i k jejich vyloučení z terénních bodů, ačkoliv je to nežádoucí.

Pomocí parametrů filtračních metod lze určitým způsobem ovlivnit míru odfiltrování neterénních bodů. Odlišné nastavení parametrů je vhodné například pro rovinný terén s množstvím budov a pro zalesněné svahy. V závislosti na tomto nastavení dochází v pískovcových skalních městech buď k odfiltrování veškeré vegetace i se skalními útvary, nebo k zachování většiny skalních útvarů za cenu toho, že značná část odrazů od vegetace je považována za terénní body. I při velmi jemném filtrování bývají navíc shlazeny okraje vrcholových plošin nebo vrcholky skalních věží, protože zde není splněn předpoklad spojitého, pozvolně se měnícího terénu. Použití rozdílných parametrů na pískovcový terén oproti okolnímu bylo testováno v rámci projektu GeNeSiS na území národních parků České a Saské Švýcarsko (Trommler, 2007). Tento přístup lze nazvat prostorově podmíněnou filtrace (Lysák, 2016). Jejím hlavním nedostatkem je nutnost vymezení oblastí s pískovcovým terénem, což lze například na základě klasifikace obrazových dat. Takto ovšem není možné odhalit skalní útvary skryté pod vegetací, a tak opět dojde k jejich odfiltrování.

S obrazovými daty souvisí ještě jedna možnost filtrace pískovcových skalních měst, kterou zmiňuje Lysák (2016). Jedná se o rozlišení terénních bodů přímo na základě informace z optického senzoru, který snímá zemský povrch zároveň se sběrem laserových dat. Za předpokladu přesné ortorektifikace lze očekávat, že je možné rozeznat skalní povrch a odpovídající body v datech LLS ponechat. Potíže s klasifikací optických dat se mohou vyskytnout v místech stínu a puklin, ale u

hustého bodového mračka navíc také všude tam, kam z optického senzoru na rozdíl od laserového skeneru „nebylo vidět“.

K odlišení terénních a neterénních bodů ve členitém reliéfu se také nabízí využití doplňkových informací, které jsou sbírány spolu se souřadnicemi bodů (Lysák, 2016). Jedná se například o údaje o počtu a pořadí odrazů v rámci jednoho pulzu a o přijímaném signálu, pokud skener podporuje *full-waveform* záznam. V praxi do filtrace běžně vstupují jen poslední odrazy, ale ve skalních městech může nastat i situace, kdy se část paprsku odrazí od vrcholu skalní věže a část od povrchu za stínem, který věž způsobila, a tak i jiný než poslední odraz může pocházet od terénu. Co se amplitudy a šířky odrazu týče, lze předpokládat, že odraz od vegetace nedosahuje vysoké amplitudy a je širší než odraz od rovny plochy, která nejčastěji představuje budovu nebo terén. Toho bylo v souvislosti s pískovcovými skalními městy využito v pracích Polákové (2016) a Lysáka (2011). Z jejich závěrů vyplývá, že samostatná informace o vlastnostech přijímaného signálu ke spolehlivé filtraci nestačí, má však potenciál sloužit jako doplněk k jiné filtrační metodě.

Poslední automatickou metodou, kterou uvádí Lysák (2016) jako možné řešení nedostatků s filtrací skalních měst, je objektově orientovaná filtrace. Návrhem takové metody se zabývá tato práce.

Uspokojivé výsledky při dostatečné hustotě bodového mračka poskytuje manuální filtrace. Zkušený pracovník, který má představu o tom, jak mohou skalní útvary ve skalních městech vypadat, by měl být schopen na základě zkoumání bodového mračka ve 3D prostoru označit terénní body. Jedná se ovšem o velmi časově náročnou práci. Navíc se spolehlivost správného zařazení bodů snižuje se snižující se hustotou bodového mračka. V praxi byla tato metoda nasazena jako doplňková k hierarchické robustní interpolaci při tvorbě DMR 5G (ZÚ & VGHMÚř, 2016). Některé další informace k manuální filtraci ve skalních městech jsou uvedeny v oddílu 3.1.1.

V takto členitém terénu, jakým jsou pískovcová skalní města, vyvstává v některých situacích otázka, co lze považovat za terén a co již terén není. Vosselman & Maas (2010) definují terén v pojetí LLS jako rozhraní mezi pevnou zemí a atmosférou nebo objekty, které se pevného podkladu dotýkají. Například v roklích se pod bloky pískovců odlomených od kompaktních skalních útvarů mohou vytvořit i suťové jeskyně, a tak může být s exaktním pojetím terénu potíž.

3 DATA A ZÁJMOVÉ LOKALITY

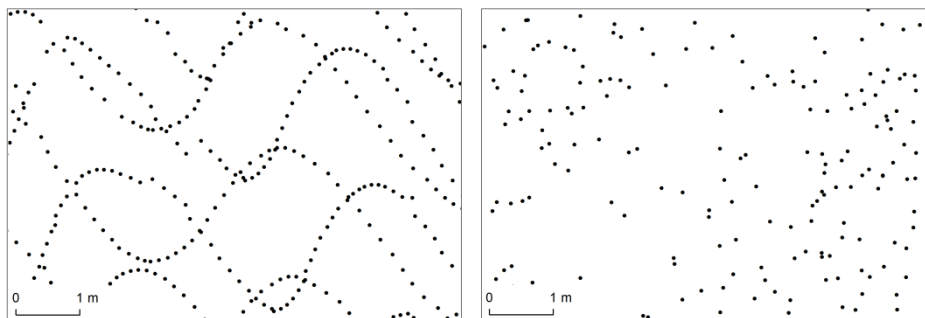
Metoda navrhovaná v této práci se opírá o předpoklad, že v bodovém mračnu lze rozpoznat a vzájemně odlišit objekty, jako jsou stromy, skalní věže a jiné. Z tohoto důvodu je nezbytné zpracovávat bodové mračno o dostatečné hustotě. Na území pískovcových skalních měst v České republice zatím proběhlo jen několik skenování, z nichž lze vybírat vhodná data.

Dva projekty využívající letecké laserové skenování se vztahují k území národních parků České a Saské Švýcarsko a datují se do března a dubna roku 1997 a dubna 2005 (projekt GeNeSiS). Zatímco bodové mračno z toho dříve provedeného dosahovalo hustoty jen zhruba 1 bod na 9 m^2 , což je z hlediska této práce velice málo, při novějších skenování přesáhla hustota posledních odrazů 8 bodů/ m^2 (Trommler, 2007). Jedná se ovšem skutečně jen o průměrnou hodnotu, protože distribuce bodů v prostoru má tvar vlny, což způsobuje jejich velmi nerovnoměrné rozložení (obr. 10 vlevo). Příčinou toho je způsob vychylování laserového paprsku při skenování – skener Falcon II, který byl použit, obsahuje optická vlákna, která paprsek při emitalci ze skeneru usměrňují.

V rámci Projektu tvorby nového výškopisu území České republiky bylo v letech 2010 – 2013 naskenováno celé území s minimální požadovanou hustotou 1 bod/ m^2 . Díky příčnému překrytu pásů okolo 50 % bylo reálně dosaženo průměrné hustoty okolo 1,5 bodu/ m^2 . Při tomto skenování vznikly další dvě datové sady experimentálního charakteru z oblasti Prachovských a Adršpašsko-teplických skal. V Prachovských skalách se jednalo pouze o test, který předcházela celorepublikovému skenování. Na rozdíl od toho v Adršpašsko-teplických skalách bylo cílem naskenovat území podrobněji, proto byla snížena střední letová výška z 1 200 – 1 400 metrů pro běžné skenování na 900 metrů nad terénem, frekvence emitalce laserového paprsku byla nastavena na 80 kHz, což odpovídalo strategii při běžném skenování ve vegetačním období (Dušánek, 2014), a navíc byly letové řady uspořádány křížem přes sebe, aby se eliminovaly zákryty. Takto vzniklé bodové mračno dosahuje průměrné hustoty téměř 4,5 bodů/ m^2 . Skener Riegel LMS Q680, který byl použit při běžném skenování i experimentálním v Adršpašsko-teplických skalách, využívá rotující hranol k usměrnění paprsku vycházejícího ze skeneru, díky čemuž jsou body rovnoměrněji rozloženy než v případě optických vláken (obr. 10 vpravo).

Na základě vlastních zkušeností, které potvrzuje i Lysák (2016), autorka hodnotí bodové mračno ze standardního skenování ČÚZK jako nedostatečně husté pro spolehlivou manuální filtraci a tedy i pro použití v této práci. Naopak v datech podrobného skenování v Adršpašsko-teplických skalách již

lze jednotlivé objekty většinou rozeznat a tedy i manuálně klasifikovat. Pro použití této datové sady navíc hovoří i fakt, že v porovnání s Národním parkem České Švýcarsko se v Adršpašsko-teplických skalách vyskytuje větší množství skalních věží na úkor skalních stěn a plošin. Navrhovaná metoda si bere za úkol především odlišit podobně se jevící objekty, jako jsou právě skalní věže a stromy, nikoliv pracovat se skalními stěnami, které tvoří prostorově výrazně rozsáhlejší objekty a projevují se u nich jiné potíže při filtraci (například odfiltrování okraje skalní plošiny).



Obr. 10 – Prostorové rozložení bodů v bodových mračcích

Vlevo je zobrazené bodové mračno z projektu GeNeSiS, vpravo z podrobného skenování v Adršpašsko-teplických skalách.

Zdroj: TUD – data z projektu GeNeSiS (2005) a ČÚZK – data podrobného LLS (2013)

3.1 Popis dat

Data podrobného skenování z Adršpašsko-teplických skal byla poskytnuta od ČÚZK v rozsahu tří mapových listů Státní mapy v měřítku 1 : 5 000 (Broumov 5-1, Broumov 6-0 a Broumov 6-1) v souřadnicovém systému WGS84/UTM-G873, z něhož byla pomocí dodané aplikace převedena do systému S-JTSK/Krovak EN. Výšková souřadnice byla ponechána v Baltském systému po vyrovnání (Bpv). Dataset tvoří 66 567 162 bodů, jejichž průměrná hustota, jak již bylo zmíněno, činí 4,45 bodů/m² a průměrná vzdálenost mezi body je rovna 0,47 metru. Na datech již proběhla filtrace, a to pomocí funkce lasground z nástrojů LAStools (viz Algoritmus postupného zhušťování TIN v podkapitole 2.1).

Protože navrhovaná metoda vyžaduje co nejhustší bodové mračno, byl výše uvedený dataset spojen s tím, jenž vznikl při standardním skenování. Na území zmíněných tří mapových listů tak bylo přidáno 34 402 267 bodů, které dosahovaly průměrné hustoty 2,35 bodů/m² a průměrné vzdálenosti 0,65 metru. Tato data byla poskytnuta ve dvou variantách – na území listu Broumov 5-1 prošla data pouze automatickou robustní filtrací v softwaru SCOP++, na zbytku území i následnou manuální kontrolou. Body byly rozděleny do kategorií budovy, hluboké chyby, terén, vysoké chyby, mosty a vegetace. Protože se v této práci používají jen kategorie terénní a neterénní body, byly spojeny všechny kategorie kromě terénních bodů do jedné, která byla považována za vegetaci (v zájmových lokalitách se budovy ani jiné objekty nevyskytují).

Obě bodová mračna byla před spojením porovnána pomocí nástroje *Compute cloud/cloud distance* v softwaru *CloudCompare*. K porovnání byl zvolen rovinný úsek ve Vlčí rokli (souřadnice středu lokality: 16° 7' 4,380" s. š., 50° 36' 15,582" v. d.), který byl manuálně očištěn od odrazů vzniklých od vegetace, protože ty způsobují velké odchylky. Průměrná vzájemná vzdálenost terénních bodů z obou datasetů byla vyčíslena na necelých 30 cm se standardní směrodatnou odchylkou 11 cm. Polohovou shodu bodových mračen vyplývající z výpočtu i vizuálního porovnání v dalších oblastech (obr. 11)

považuje autorka za dostatečnou pro účely této práce, a tak bylo spojené bodové mračno použito bez dalšího koregistrování. Výsledná hustota dosahuje hodnoty 6,75 bodů/m² a průměrná vzdálenost mezi body spojeného mračna je rovna 0,39 m.



Obr. 11 – Vizuální zhodnocení spojeného bodového mračna

Body podrobného skenování jsou oranžovo-hnědé, body běžného skenování jsou větší a černé. Obrázek ilustruje, že si prostorově oba datasety velmi dobře odpovídají. Za povšimnutí také stojí, že v podrobném skenování byly výrazně lépe nasnímány skalní věže ze stran, což je důsledek nalétávání křížem. Na levé straně věže je dokonce zachycen převis. V datech běžného skenování chybí také například terén pod stromem.

Zdroj: ČÚZK – data podrobného LLS (2013) a ČÚZK – data standardního LLS (2013)

3.1.1 Filtrace k porovnání s navrhovanou metodou

Ke zhodnocení výsledků navrhované metody byla bodová mračna z jednotlivých zájmových lokalit, které budou uvedeny dále, filtrována také jinými metodami. Tou nejdůležitější z nich je manuální filtrace, protože si tato práce vzala za cíl vytvoření obdobně spolehlivé metody. Dalšími použitými metodami jsou robustní filtrace na datech ze standardního skenování, která byla na území většiny lokalit i manuálně zpřesněna, a funkce lasground z nástrojů LAStools.

Manuální filtrace

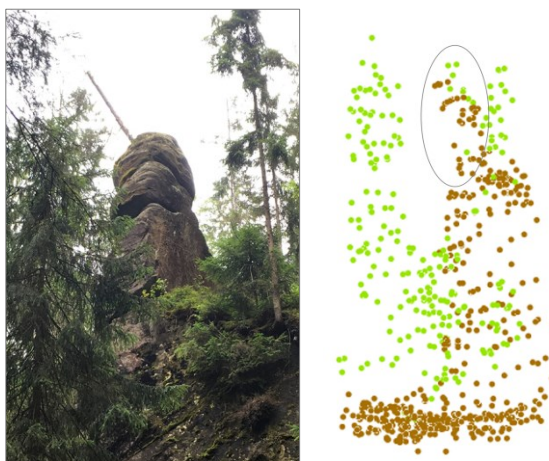
Manuální filtrace byla provedena na datech z podrobného skenování. Aby byla tato referenční data co nejspolehlivější, filtrace byla ověřena přímo v terénu. Výrazné skalní věže a samostatné stromy byly povětšinou bezchybně klasifikovány tzv. od stolu, ovšem menší skalní útvary schované pod stromy, stromky rostoucí ze skalní stěny a další objekty bylo již výrazně obtížnější identifikovat. Při manuální filtraci se člověk spoléhá na vlastní zkušenost a znalost terénu, díky čemuž je schopný v bodech zobrazených v prostoru nalézt reálné objekty, jako jsou právě skalní věže a stromy. Přestože se tyto objekty často jeví podobně vysoké a široké, vnitřní rozložení bodů napoví, o který objekt se jedná. Pokud ale nejsou objekty tvořeny dostatečným množstvím bodů, tato teorie selhává.

Z vlastní zkušenosti při manuální filtraci autorka konstatuje, že data podrobného skenování ještě nedosahují takové hustoty, aby v nich bylo možné bez terénního průzkumu odlišit například vysoké stromy rostoucí v těsné blízkosti skalních věží nebo drobnější skalní věže zakryté korunami okolních stromů. Ani po terénním šetření ovšem nelze s jistotou v některých situacích určit, zda konkrétní bod náleží skalní věži či stromu, pokud se nachází v místě jejich styku. Ve velmi hustě zarostlých lokalitách s množstvím menších skalních útvarů a velmi členitým terénem (např. Skalní ostrov – střed)

nastával i problém při rozlišování jednotlivých stromů od sebe a tím pádem byla ztížena i orientace v lokalitě. Tyto nedostatky by hustší bodové mračno nejspíš dokázalo eliminovat.

Jedním z extrémních případů, které dokazují, že bez terénního šetření by některé objekty rozpoznány nebyly, je příklad skalní věže, o kterou je opřený kmen (obr. 12). Tato věž se nachází v lokalitě Vlčí vodopád. Je možné, že v době, kdy byla data pořízena, tedy v listopadu roku 2013, mohly být kmen i strom napravo od věže více obrostlé, protože se v datech jeví větší než na fotografii, která pochází z července roku 2016.

Abychom mohli mít jistotu, že se špatně klasifikované objekty v bodovém mračnu neobjevují, museli bychom každý objekt vidět ze všech stran, což je časově i fyzicky velmi náročné a někdy i prakticky nemožné. Je tedy nutné mít na paměti, že i manuálně filtrovaná referenční data mají své nedostatky. Navíc byla při terénním průzkumu velmi postrádána aplikace do mobilního zařízení, která by umožňovala prohlížet a případně i editovat bodové mračno přímo na místě a usnadnila by tak interpretaci sporných bodů.



Obr. 12 – Obtížně rozeznatelná skalní věž

Vlevo je fotka skalní věže, vpravo je totožné místo zobrazené ve 3D pomocí dat z podrobného skenování s barevně rozlišenými body podle třídy (hnědě terén, zeleně vegetace). Pravý obrázek zahrnuje větší scénu než fotka, ale pohled na obou obrázcích vychází zhruba ze stejného místa. Skalní věž je zakroužkovaná.

Zdroj: vlastní fotografie, ČÚZK – data podrobného LLS (2013)

Robustní filtrace

Již bylo zmíněno, že data běžného skenování byla poskytnuta klasifikovaná pomocí metody robustní filtrace v softwaru SCOP++. Její úspěšnost byla hodnocena na 90 % v oblastech, kde proběhlo skenování mimo vegetační období (březen – květen), a jen na 30 – 40 % tam, kde bylo skenováno mezi červnem a zářím (ZÚ & VGHMÚř, 2016). Na všech lokalitách kromě Bludiště – Divoká rokle byla navíc tato klasifikace manuálně zkontrolována a opravena. Vzhledem k nízké hustotě bodů ze standardního skenování byla ovšem vizuální interpretace při manuální kontrole obzvláště ve skalních oblastech obtížná, a tak ve výsledném terénu některé skalní útvary zcela chybí (Lysák, 2016). Příkladem může být skalní věž s názvem Hladomorna, která je vysoká zhruba 14 metrů a nachází se na vrcholu Skalního ostrova (obr. 13).

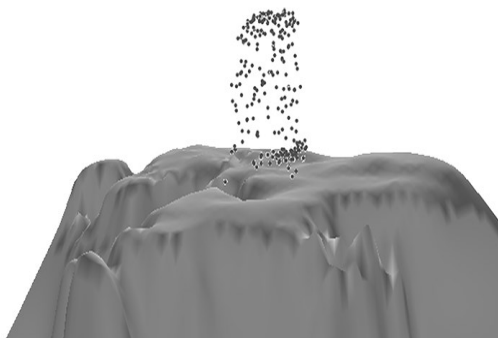
Lasground

Jak bylo uvedeno výše, funkcí lasground_new z nástrojů LAStools byla filtrována data z podrobného skenování. Protože lze tento nástroj pro vědecké účely použít bezplatně, mohlo být filtrováno i celé

spojené bodové mračno. Parametry funkce byly ponechány tak, jak byly nastaveny na ČÚZK:

```
lasground_new -i input -o output -step 3 -spike 100 -offset 0.5
```

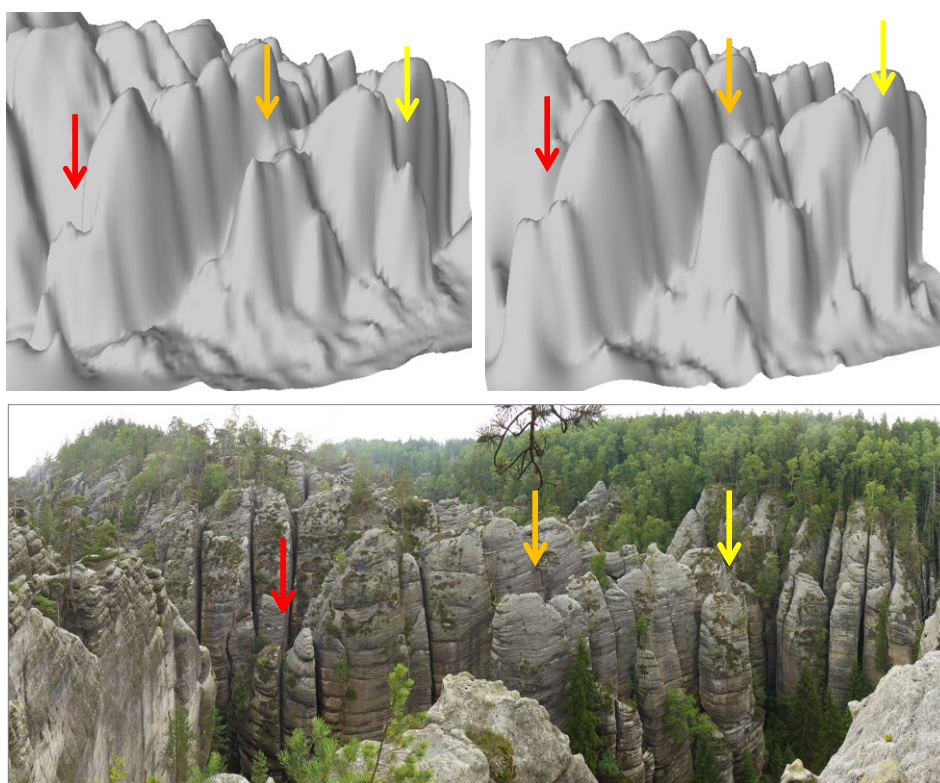
Výsledkem této filtrační metody jsou shlazené okraje skalních plošin a zmenšené či zcela chybějící skalní věže, jak ilustruje obr. 14. Více informací o této metodě je uvedeno v části s názvem Algoritmus postupného zhušťování TIN v podkapitole 2.1.



Obr. 13 – Chybějící skalní věž v datech ze standardního skenování

Povrch zobrazený ve 3D je tvořen interpolací bodů ze standardního skenování po manuální kontrole v lokalitě Skalní ostrov – jih, které byly klasifikovány jako terénní. Body ukazující chybějící skalní věž s názvem Hladomorna pochází z manuálně filtrovaného bodového mračna z podrobného skenování.

Zdroj: ČÚZK – data standardního LLS (2013) a ČÚZK – data podrobného LLS (2013)



Obr. 14 – Porovnání filtrace lasground a manuální

Na příkladu lokality Skalní ostrov – sever je ukázáno, že filtrace lasground (vlevo nahoře) nevystihuje dobře skalní útvary. Jejich výška i tvar jsou ovlivněné odfiltrováním okrajů vrcholových plošin, v tomto případě spíše celých vrcholů. Vpravo nahoře je povrch z manuální filtrace, kde skalní věže lépe odpovídají realitě zobrazené na fotce dole. Pro lepší orientaci jsou třemi barvami šipek vyznačeny odpovídající si skalní útvary na všech obrázcích.

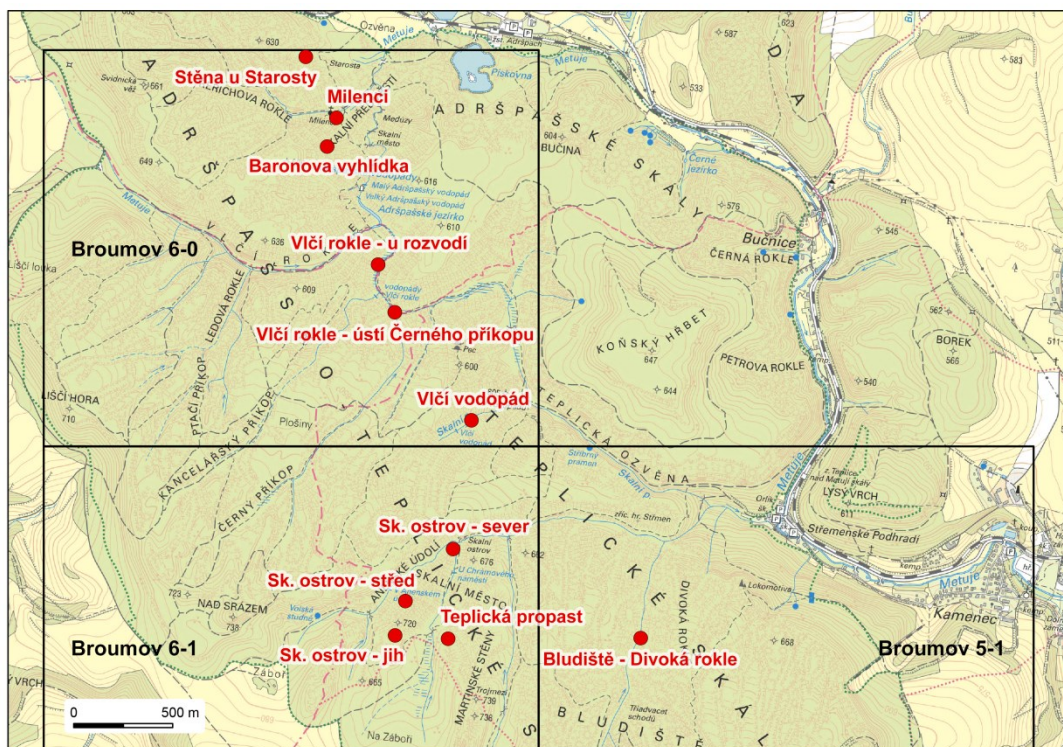
Zdroj: ČÚZK – data podrobného LLS (2013), ČÚZK – data standardního LLS (2013),
foto: Jakub Lysák

3.2 Zájmové lokality

Národní přírodní rezervace Adršpašsko-teplické skály se stala chráněnou díky geomorfologické mimořádnosti tohoto území s lesními ekosystémy a ojedinělými rostlinnými a živočišnými společenstvy podhorského a horského charakteru, které vznikly v kvádrových pískovcových svrchní křídý (AOPK, 2018). Lokalita nabízí ohromné množství rozmanitých scenérií pískovcového skalního města a je díky tomu právem velmi oblíbenou turistickou destinací v jinak méně navštěvovaném Broumovském výběžku.

Adršpašské a Teplické skály od sebe odděluje dlouhé údolí nazývané Vlčí rokle, kterým částečně protéká hlavní vodní tok oblasti – Metuje. Zatímco v Teplických skalách se častěji vyskytují prostorově rozsáhlé skalní masivy se skalními stěnami a rozčleněnými vrcholovými plošinami, na Adršpašské skály měla eroze silnější vliv a ponechala v nich spíše skalní věže, které ovšem patří k nejvyšším v Evropě (Adamovič a kol., 2010).

K otestování navrhované metody bylo zvoleno 11 lokalit, které se liší mírou zalesnění, velikostí skalních útvarů i celkovou členitostí terénu, jak bude popsáno a ukázáno na fotografiích dále. Tři z nich se nachází na území Adršpašských skal: Baronova vyhlídka, Milenci a stěna u Starosty, dvě ve Vlčí rokle a zbylých šest v Teplických skalách: Bludiště – Divoká rokle, tři oddělené lokality na Skalním ostrově, Teplická propast a Vlčí vodopád. Názvy některých oblastí se opírají o skutečná jména skalních útvarů nebo oblastí (např. Milenci, Vlčí vodopád), jiná vznikla jen pro účely této práce (např. stěna u Starosty). Umístění jednotlivých lokalit ukazuje obr. 15.



Obr. 15 – Přehledová mapa lokalit

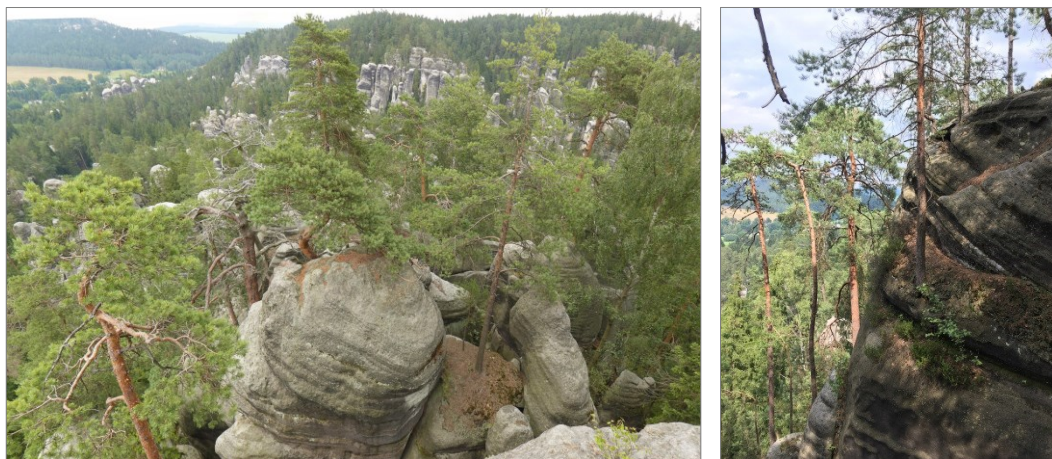
Červeně jsou zvýrazněné zájmové lokality. Pro orientaci jsou také doplněné čtverce mapových listů Státní mapy 1 : 5 000, ve kterých byla data poskytnuta. Jen na území listu Broumov 5-1 v době poskytnutí dat ještě nebyla hotová manuální kontrola.

Zdroj: ČÚZK – Základní mapa 1 : 25 000 (2017)

Baronova vyhlídka

souřadnice středu lokality: 50° 36' 33,746" s. š., 16° 6' 47,605" v. d.

Baronova vyhlídka (obr. 16) nabízí z výšky okolo 605 m n. m. jedinečný pohled na skalní útvar Milenci i jeho široké okolí (obr. 18). Tento výhled poskytuje okraj skalní plošiny Milenecké hory, který je velmi členitý a zarostlý nejčastěji borovicemi nejrůznějších tvarů vyrůstajících přímo ze skal. Lokalita zahrnuje jen plošinu a část stěn, nesáhá ovšem až na dno údolí pod skalami. Kromě rovinaté oblasti samotné vyhlídky se plošina jeví spíše jako zaoblené výstupky, mezi kterými jsou úzké různě hluboké pukliny. Z vnější strany, tedy směrem do údolí, se nachází několik nižších útvarů, jejichž tvar není z bodového mračna dobře rozlišitelný kvůli zakrytí vegetací.



Obr. 16 – Baronova vyhlídka

Vlevo je snímek skalních útvarů v těsném okolí Baronovy vyhlídky (foto: *Jakub Lysák*), vpravo borovicemi porostlý okraj plošiny (*vlastní fotografie*).

Bludiště – Divoká rokle

souřadnice středu lokality: 50° 35' 20,070" s. š., 16° 8' 22,227" v. d.

Bludiště je jméno poměrně rozsáhlé oblasti v Teplických skalách. Jak název napovídá, jedná se o těžko prostupný terén plný skalních útvarů lemujících hluboká údolí a zakrytých vegetací. Zájmová lokalita Bludiště – Divoká rokle byla zvolena v místě, kde se spojují dvě výrazné rokly v jednu pokračující pod jménem Divoká rokle dál na sever a spojující se s údolím Skalního potoka u zříceniny hradu Střmen. Nachází se tu dva útvary s výškou přes 30 metrů, které jsou dále členěné, a jedna poměrně samostatná skalní věž (obr. 17) vyrůstající ze dna údolí, která dosahuje výšky okolo 25 metrů, má na svém vrcholu strom a na jedné straně věže je výrazný převis.

Milenci

souřadnice středu lokality: 50° 36' 38,624" s. š., 16° 6' 49,245" v. d.

Milenci (obr. 18) jsou jednou z nejznámějších a nejvyšších skalních věží v Adršpašských skalách. Ačkoliv se jejich výška běžně uvádí i přesahující 100 metrů, z dat podrobného skenování byla výška změřena jen na zhruba 80 metrů. Na vrcholu Milenců se nachází malá vlaječka, z níž je v datech také jeden odraz.

Celá lokalita zahrnuje poměrně velké území, které má spíše rovinatý charakter a vystupují z něj jednotlivé skalní věže, které se střídají se vzrostlými stromy. Ze samotného masivu Milenců vyrůstá jen velmi drobný porost. V blízkosti Milenců se nachází zhruba o 30 metrů nižší skalní věž s názvem Uhlířská, která je v práci často používána jako ukázková (např. obr. 11), protože má poměrně

jednoduchý tvar, je osamocená a navíc u ní lze pozorovat některé zajímavosti, jako je převis, jediný strom vyrůstající z její stěny a mírně rozčleněný vrchol.

Tato lokalita byla zpracována poněkud odlišně od ostatních. Byla zvolena jako trénovací při kalibraci metody, a tak musela být oproti původním záměrům zvětšena. Z tohoto důvodu byla manuální filtrace provedena na datech spojeného bodového mračka (nikoliv na datech z podrobného skenování jako u jiných lokalit), ale terénní průzkum neproběhl na celém území lokality.



Obr. 17 – Osamocená věž v lokalitě Bludiště

Vlevo je snímek věže z protilehlého svahu, vpravo směrem z údolí.

Foto: Jakub Lysák



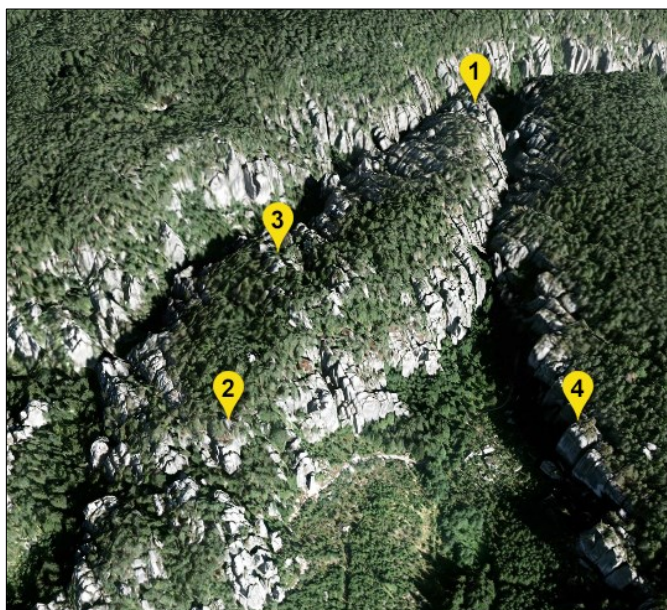
Obr. 18 – Výhled na Milence z Baronovy vyhlídky

Vpravo od skalního masivu Milenci je viditelná i skalní věž Uhlířská.

Foto: Jakub Lysák

Skalní ostrov

Skalní ostrov je mohutný skalní masiv v Teplických skalách. Od okolních masivů ho dělí místy i velmi úzké údolí lemované vysokými stěnami, po jehož dně vede hlavní část naučné stezky Teplickým skalním městem, kterou lze celý Skalní ostrov obejít. Jedná se o rozčleněnou skalní plošinu zhruba 200 metrů širokou v nejširším místě a 800 metrů dlouhou, situovanou ve směru SSV – JJZ. Rozčlenění narůstá od jihu na sever s tím, že nejsevernější část plošiny je neprostupná. Dokumentace severní lokality tak probíhala z protější plošiny. Pro rozmanitost a jedinečnost skalních útvarů na tomto masivu zde byly vytvořeny tři lokality s dodatkovými názvy sever, střed a jih (obr. 19).



Obr. 19 – Lokality na Skalním ostrově a Teplická propast na 3D modelu

Obrázek zachycuje polohu tří lokalit na Skalním ostrově (1 – sever, 2 – jih, 3 – střed) a Martinskou stěnu s Teplickou propastí (4). Pohled směřuje od jihu.

Zdroj: Seznam.cz, a.s. – mapy.cz (2018)

Skalní ostrov – sever (*souřadnice středu lokality: 50° 35' 31,114" s. š., 16° 7' 31,461" v. d.*) zahrnuje část, pod kterou přijdou turisté na své cestě okolo Ostrova jako první, protože se nachází u rozcestí Horolezecká chata. Jedná se o oblast, kde je masiv již velmi rozrušený. Původní vrcholová plošina mohla být zhruba ve výšce 665 m n. m., což je 60 metrů nad cestou pod masivem. Čelní skalní věže jsou vysoké i „jen“ necelých 50 metrů a jsou mezi nimi značně široké pukliny ve směru SSZ – JJV (obr. 14). Vrcholky skalních věží a zbytky plošiny jsou téměř bez vegetace, zespodu jsou skály lemovány i poměrně vysokými stromy. Jen díky terénnímu průzkumu zde byl jeden takový strom rozlišen od skalní věže, přestože se nacházel v její velmi těsné blízkosti.

Skalní ostrov – jih (*souřadnice středu lokality: 50° 35' 15,795" s. š., 16° 7' 19,170" v. d.*) se nachází v místě, kde je hlavní skalní plošina oddělena od menší části s příznačným názvem Trosky a je z ní výhled na protilehlou Martinskou stěnu. Převýšení nad cestou vedoucí pod Ostrovem je nižší než u předchozí lokality – okolo 35 metrů. Okraj plošiny je opět velmi rozrušen, a tak zde lze rozeznat i jednotlivé skalní věže oddělené od hlavního masivu. Z vrcholové plošiny vyrůstá skalní věž Hladomorna (obr. 13) a několik menších kamenných bloků. Vegetace se v hojně míře nachází na plošině a obklopuje i samotný Ostrov.

Skalní ostrov – střed (*souřadnice středu lokality: 50° 35' 21,673" s. š., 16° 7' 20,951" v. d.*) se nachází zhruba v polovině Skalního ostrova. Jedná se o velmi členitý terén na vrcholové plošině s hlubokými úzkými puklinami, které bývají i částečně zapadané kameny nebo přehrazené velkými balvany a zakryté korunami stromů, a vyvýšeninami v podobě skalních věží s výškou do 25 metrů. V této lokalitě byla i po terénním průzkumu manuální filtrace extrémně složitá, protože jsou tu jednotlivé objekty v těsné blízkosti, překrývají se a lze se tu obtížně orientovat.

Stěna u Starosty

souřadnice středu lokality: 50° 36' 48,065" s. š., 16° 6' 39,448" v. d.

Stěna u Starosty (obr. 20) dostala název podle zhruba 10 metrů vysoké stěny na konci plochého údolí

nedaleko masivů Starosty a Starostové. Značnou část lokality tvoří rovina s mnoha vzrostlými stromy a balvany, zbytek jsou poměrně vysoké skalní útvary (okolo 50 metrů) tvořící hráz kolem údolí. Tyto útvary ale ještě převyšují a zakrývají stromy rostoucí na nich.



Obr. 20 – Stěna u Starosty

Pohled na lokalitu směřuje od hlavní cesty směrem ke stěně, kterou lze nalézt v pravé polovině snímku.

Foto: Jakub Lysák

Teplická propast

souřadnice středu lokality: 50° 35' 16,151" s. š., 16° 7' 32,886" v. d.

Teplická propast (obr. 19 a obr. 21) je lokalita na Martinské stěně, která zahrnuje i skalní věže s názvem Loď s výškou 25 metrů a Lampasák s výškou zhruba 17 metrů. Celá Martinská stěna přitom měří okolo 55 metrů. Svým velkým převýšením a malým množstvím vegetace připomíná tato lokalita Skalní ostrov – sever jen s tím rozdílem, že pukliny mezi věžemi ještě nejsou tak široké, ale přesto hluboké. Jejich dno pokrývají balvany nebo nízké husté smrčky. Tato vegetace je prakticky nerozpoznatelná v bodovém mračnu. Do pukliny obecně pronikne jen malá část paprsků, a tak je z ní celkově méně bodů a informací. V tomto případě, kdy dno pokrývá hustý drobný porost, je ještě menší pravděpodobnost, že by paprsek prošel k terénu.



Obr. 21 – Teplická propast

Vlevo je pohled z okraje Martinské stěny na vrcholky věží, které jsou pokryté poměrně řídkou vegetací. Na snímku vpravo je vidět hlavní puklina, jejíž dno pokrývají smrčky.

Foto: Jakub Lysák

Vlčí rokle

Vlčí rokle, jak bylo uvedeno výše, je dlouhé údolí oddělující od sebe Adršpašské a Teplické skály. Po jeho dně vede žlutá turistická cesta, kterou často tvoří lávky kvůli podmáčenému terénu. Díky vysoké vlhkosti se tu daří vegetaci. Skalní útvary, které zde nalezneme, jsou spíše nižší skály vystupující ze svahu, drobné skalní věže a obrovské balvany.

Vlčí rokle – u rozvodí (*souřadnice středu lokality: 50° 36' 15,289" s. š., 16° 7' 4,029" v. d.*) se nachází před výstupem z rokle k Adršpašskému jezírku. Toto místo tvoří rozvodí mezi Metují směřující odtud na sever k Adršpachu a Skalním potokem, který zde pramení a pokračuje na jih skrz rokli do Teplic nad Metují, kde se u vstupu do skalního města vlévá do Metuje přitékající z Adršpachu. V tomto místě je dno rokle ploché, podmáčené, porostlé travinami a nižším porostem a široké až zhruba 35 metrů. Dál na obě strany od lávky skrz rokli přibývají stromy, skalní věže a další útvary a terén se zvedá (obr. 22 nahoře). Smrky tu běžně dosahují výšek okolo 40 metrů, což může být i více než dvojnásobek v porovnání s věžemi, které jsou schované pod jejich korunami. Některé ze skalních věží byly správně klasifikovány jen díky terénnímu šetření, protože v bodovém mračnu nebylo možné je rozeznat od kmene a koruny přiléhajícího stromu.

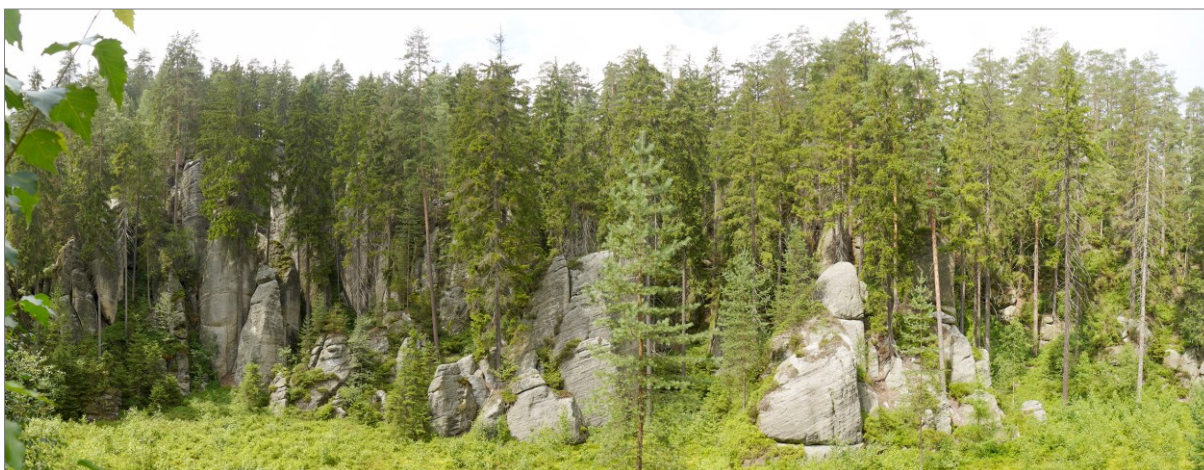
Vlčí rokle – ústí Černého příkopu (*souřadnice středu lokality: 50° 36' 8,342" s. š., 16° 7' 9,729" v. d.*) je lokalita, kde se z údolí stává opravdu úzká rokle, po jejíchž obou stranách jsou převážně skály s drobnými roklemi vedoucími do svahu (obr. 22 dole). Skalní útvary jsou porostlé hustou nízkou vegetací, ze které často vyrůstají i vysoké stromy stejně jako ze dna rokle. Orientace v bodovém mračnu takto členitého terénu je velmi obtížná a lze ji přirovnat k lokalitě Skalní ostrov – střed.

Vlčí vodopád

souřadnice středu lokality: 50° 35' 52,311" s. š., 16° 7' 32,529" v. d.

Vlčí vodopád (obr. 23) se nachází na začátku Ledové rokle, jež ústí do Vlčí rokle v blízkosti Teplické ozvěny. Lokalitu tvoří kolmá skalní stěna, z jejíž zerodované části po deštích a při jarním tání vytéká vodopád. V případě, že není dostatečný proud, stéká voda přímo po skalní stěně a odkapává v místě převisu. Pod vodopádem se voda vsákne, a tak je koryto potoka téměř stále vyschlé. Při vhodných podmínkách v zimě voda zmrzne a vytvoří ledopád. Z dat podrobného skenování se výška vodopádu jeví jako 14 metrů, ačkoliv se běžně uvádí o 4 metry více. Rozdíly mohou být způsobeny obtížným určením toho, kde se vlastně nachází dno, protože je pokryté balvany.

Kromě nižší části, ze které vytéká vodopád, dosahuje skalní stěna výšky 26 až 35 metrů. Před ní je ještě skalní blok a z něj vyrůstá skalní věž (obr. 12). Vzhledem k dostatku vlhkosti se tu nachází značné množství vegetace.



Obr. 22 – Vlčí rokle

Lokalita Vlčí rokle – u rozvodí je na horním snímku (foto: *Jakub Lysák*) a Vlčí rokle – ústí Černého příkopu na dolním snímku (vlastní fotografie).



Obr. 23 – Vlčí vodopád

Vlevo pohled z malé jeskyně vytvořené pod vodopádem (foto: *Jakub Lysák*), vpravo Vlčí vodopád při letní povodni (foto: *Jan Hátle*).

4 METODIKA

Navržená metoda si bere za cíl rozlišení bodů vzniklých odrazem od terénu (tedy i skal) a vegetace pomocí objektivě orientovaného přístupu. Hlavní myšlenka navržené metody vychází z představy postupu při manuální filtraci bodového mračka z pískovcového skalního města. Člověk je přirozeně schopen si v prostorově zobrazených bodech o dostatečné hustotě jednotlivé objekty najít a vyhodnocovat je odděleně. K rozhodnutí, zda se jedná o skalní věž nebo strom, poslouží především to, zda se objekt jeví jako „dutý“ či nikoliv. Během průchodu paprsku laseru stromem totiž dochází k několika odrazům, z nichž vzniká neuspořádaný shluk bodů zahrnující víceméně celý objem koruny stromu včetně jejího vnitřku (obr. 24 vpravo). Navíc, pokud to hustota větví a listů nebo jehličí dovolí, vzniknou pod stromem i odrazy od terénu. Takový objekt se jako „dutý“ nejeví. Na rozdíl od toho skalní věž je tvořena odrazy jen ze svého povrchu, a proto tvoří „dutý“ výběžek z okolního terénu, tedy žádné body se nevyskytují uvnitř věže (obr. 24 vlevo). V reálné krajině pískovcových skalních měst je situace složitější, například se zde nachází stromy rostoucí přímo z vrcholů a stěn skalních věží.



Obr. 24 – Profily bodovým mračnem

Vlevo je profil skalní věží, z jejíž stěny vyrůstá stromek, vpravo profil stromem, skrz který prošly paprsky laseru až k povrchu.

Zdroj: ČÚZK – data podrobného LLS (2013) a ČÚZK – data standardního LLS (2013)

Dále bude popsána konkrétní implementace uvedené myšlenky. Skripty byly napsány v jazyce Python a využívají funkce modulu *arcpy* a také funkce LAsTools (rapidlasso GmbH, 2018) pro práci se soubory ve formátu *las*. Metodu lze rozdělit na tři části, každou z nich představuje jeden skript – segmentace (*01_segmentation.py*), klasifikace objektů (*02_classification.py*) a filtrace bodového mračna (*03_filtration*). V příloze 1 je uveden shrnující diagram celého procesu zpracování bodového mračna, příloha 2 slouží pro přehled použitých skriptů a funkcí, které lze najít v digitálních přílohách k práci.

4.1 Segmentace

Skalní věže i stromy tvoří výběžky a od sebe je oddělují lokální minima terénu. Základní idea celého postupu je taková, že pokud otočíme terén vzhůru nohama, vrcholy jednotlivých objektů budou představovat lokální minima a jednotlivé objekty deprese (bezodtoké oblasti) (obr. 25 vpravo). Hranice mezi objekty pak odpovídají rozvodnicím mezi bezodtokými oblastmi a pro jejich tvorbu lze využít dostupné standardní nástroje. Hlavním úskalím této myšlenky je tvorba povrchu, který bude vstupovat do hydrologických analýz. Povrch, ze kterého by bylo možné minima odečíst, nelze totiž vytvořit z celého bodového mračna, protože v datech se s ohledem na charakter terénu vyskytují body s velmi podobnými či stejnými souřadnicemi x a y a velmi rozdílnými souřadnicemi z (tj. ležící vzájemně nad sebou). Tato problematika byla popsána již v oddílu 2.2.2 zabývající se rekonstrukcí povrchu.

V metodice byl navržen aproximovaný povrch obalující body shora vytvořený z bodů s maximální výškou v gridu o velikosti 2 metry pomocí interpolační funkce spline s tenzí (viz oddíl 2.2.2). Velikost gridu byla zvolena s ohledem na hustotu bodů a slouží i jako generalizační parametr, protože menší objekty se v interpolovaném povrchu neprojeví. V lokalitě Milenci se tímto způsobem vybere zhruba 5 % bodů a jen 0,6 % buněk gridu žádný bod neobsahuje. Funkce spline tvoří hladký terén vykazující minimální křivost a procházející datovými body, ovšem bez použití tenze dochází v místech členitého terénu k výrazným výkyvům funkce mimo rozsah hodnot datových bodů. Tenze zaručí, že se celý povrch více přimyká datovým bodům, ale za cenu celkové vyšší křivosti.

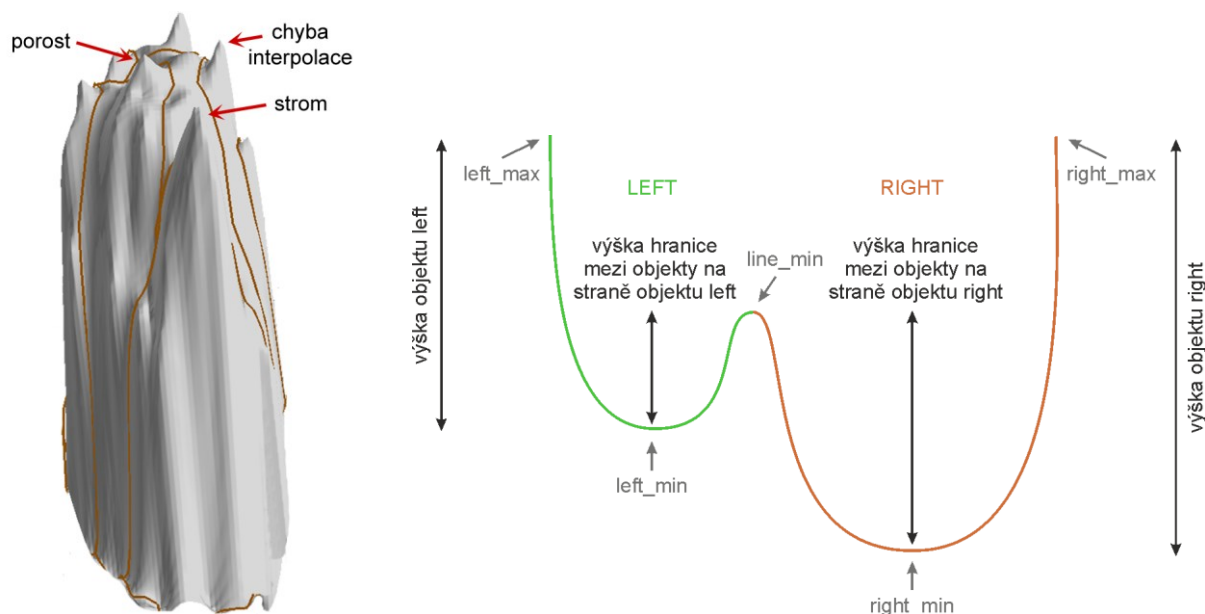
Pro implementaci segmentační metody na aproximovaný povrch byly použity některé funkce z nástrojové sady *Hydrology Toolset* dostupné pod licenci *Spatial Analyst v ArcGIS for Desktop*. V převráceném povrchu byly nalezeny směry toku (*Flow Direction*) a bezodtoká místa (*Sink*), ze kterých byl následně vypočítán rastr povodí (*Watershed*).

V aproximovaném povrchu se najde i několik bezodtokých míst odpovídajících jednomu reálnému objektu, které jsou způsobené například nerovnou vrcholovou plošinou skalní věže, drobným porostem na skalním útvaru nebo také nedokonalostí interpolace, která v místě náhlé výrazné změny výšky může vytvořit neexistující vrchol (obr. 25 vlevo). Kvůli tomu byl implementován postprocessing segmentace, který spojuje sousedící objekty na základě relativní výšky jejich hranice. Ta je pro jeden ze sousedících objektů (v tomto případě objekt *left*) vypočítána následovně:

$$\text{relativní výška hranice objektu left} = \frac{\text{výška hranice na straně objektu}}{\text{výška objektu}} = \frac{\text{line_min} - \text{left_min}}{\text{left_max} - \text{left_min}}$$

kde *left_max* a *left_min* představují maximální a minimální výšku povrchu v objektu a *line_min* minimální výšku povrchu v těsném okolí linie oddělující od sebe objekty (obr. 25 vpravo). Při

porovnávání relativní výšky hranice se stanovenou mezí pro spojování objektů je použita nižší z výšek, tedy hodnota toho objektu, který má nižší relativní výšku hranice (v obr. 25 vpravo je to levý objekt, u něhož dosahuje hranice necelých 40 % výšky celého objektu). Každý objekt se spojí s tím sousedním objektem, se kterým dosahuje tato nižší relativní výška hranice minima pro konkrétní objekt, a následně se hodnoty převýšení přepočítají podle nových objektů. Algoritmus pokračuje do té doby, dokud se v lokalitě vyskytují objekty, které by se mohly spojit se sousedními. Hranice pro spojení byla stanovena na 10 % celkové výšky objektu v lokalitě Milenci, která sloužila jako trénovací, ovšem ukázalo se, že v ostatních lokalitách je tato výška příliš vysoká a byla snížena na 7 %.



Obr. 25 – Tvorba objektů

Vlevo je pohled na skalní věž, která byla při tvorbě povodí v převráceném povrchu rozčleněna hnědými liniemi na několik objektů. Důvody vzniku některých vrcholů, kvůli kterým je celý objekt rozdělený, jsou v obrázku popsány.

Vpravo je pomocný obrázek k výpočtu výšky hranice mezi objekty pro jejich spojování. Jedná se o ilustrativní profil objekty v převráceném povrchu, který je veden právě přes lokální extrémy, jež jsou používané k výpočtu. Zeleně je znázorněný levý objekt, hnědě pravý. Hranici mezi nimi tvoří rozvodnice.

4.2 Klasifikace objektů

Pro klasifikaci objektů byly zvoleny tři třídy, které odpovídají představě popsané v úvodu této kapitoly. Jedná se tedy o skalní útvar – *skála*, *strom* a objekt, ve kterém se vyskytují obě předchozí třídy a nelze je od sebe oddělit – *mix*. Pro zařazení objektu do konkrétní třídy bylo vypočítáno několik vlastností každého objektu a pomocí techniky rozhodovacího nebo také klasifikačního stromu (*decision tree*) použitého na tréninková data byly vybrány a dále použity jen některé z nich. Následující oddíly popisují tyto vlastnosti a jejich vliv na klasifikaci.

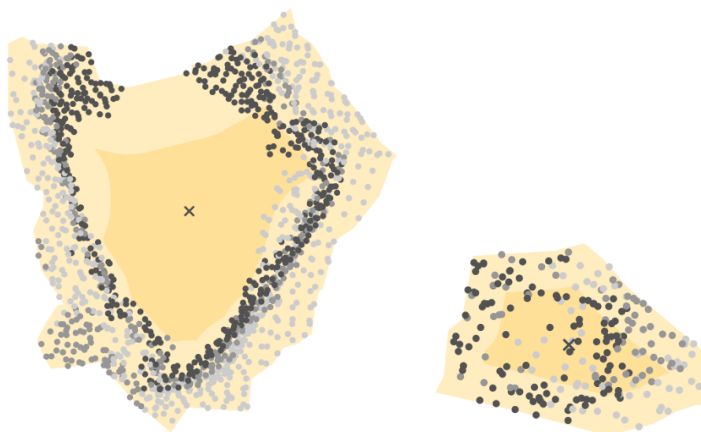
4.2.1 Řezy

Již bylo několikrát zmíněno, že hlavním geometrickým rozdílem mezi stromem a skalní věží je přítomnost bodů uvnitř objektu. Pro zjištění a kvantifikaci této vlastnosti byly použity vodorovné řezy jednotlivými objekty a následně bylo vyhodnocováno geometrické rozložení bodů ležících pod úrovní řezu v rovině os x a y (pohled shora). Každým objektem byly vedeny tři řezy v pravidelném rozložení

– ve čtvrtině, polovině a třech čtvrtinách výšky celého objektu. V práci je používáno jejich číslování od jedné (dolní řez) do tří (horní řez) v závorce za názvem příslušného atributu.

Plochu skalní věže v řezu lze rozdělit do dvou zón – vnější, ve které se nachází většina bodů, a vnitřní, ve které se nenachází téměř žádný (obr. 26 vlevo). Na rozdíl od toho body v řezu stromu by měly být rovnoměrněji rozložené uvnitř obou zón (obr. 26 vpravo). Velikost zón byla nastavena jako polovina vzdálenosti mezi centroidem půdorysného polygonu objektu a nejbližším bodem tvořícím hranici polygonu. V takto vytvořených zónách byly vypočítány hustoty bodů a tyto atributy byly pojmenovány *vnitřní hustota* a *vnější hustota* podle jednotlivých zón. Zmíněná představa o rozložení bodů ovšem selhává v situacích, kdy není objekt zcela ideálně vymezen a neodpovídá právě jednomu reálnému objektu, ale také například u rychle se zužující nebo asymetrické skalní věže (např. obr. 29).

S nedostatky předchozí vlastnosti si lépe poradí velikost souvislé oblasti, ve které se nenachází žádný bod (neboli *díra*, jak je zkráceně tato vlastnost nazývána), protože není závislá na tvaru objektu. Na druhou stranu definice a tvorba takové oblasti není jednoduchá a naráží na stejný problém jako aproximovaný povrch – tedy problémy míry generalizace hranice oblasti bez bodů. V této metodice byl zvolen výpočetně snadný postup s použitím rastru, ovšem je nutné ho brát jako určité zjednodušení. Pro každou buňku gridu 1 x 1 metr byl vypočítán počet bodů a po převodu tohoto rastru na polygony byla vybrána největší prázdná oblast. Jako proměnné při tvorbě klasifikačních pravidel, které jsou popsány dále, byla použita absolutní velikost této prázdné oblasti i její relativní velikost vztahovaná k celkové ploše půdorysného polygonu objektu (*díra%*).



Obr. 26 – Rozložení bodů v zónách objektů

Body jsou rozlišeny podle řezu, ve kterém přibyly do výpočtů (od světlé v dolním řezu po tmavou v horním řezu). Vnitřní zóna je zvýrazněna tmavší barvou. Křížek označuje centroid polygonu. Vlevo je objekt představující skálu, vpravo strom.

Zdroj: ČÚZK – data podrobného LLS (2013) a ČÚZK – data standardního LLS (2013)

4.2.2 Klasifikační pravidla

Pro nalezení pravidel pro klasifikaci objektů do zvolených tříd byla vytvořena trénovací data se 161 objekty v lokalitě Milenci a dále byla zpracována za pomoci funkce *rpart* ze stejnojmenného balíčku v jazyce R, která na základě zadaných vlastností vytvoří rozhodovací strom. Tento strom, nazývaný také jako klasifikační, představuje sekvenci pravidel, podle kterých lze pomocí příznaků (v tomto případě vlastností vypočítané z řezů) určit příslušnost ke třídě. Pravidla se sestavují pomocí rekurzivního dělení vstupní množiny a hledání příznaku s největší schopností oddělit od sebe objekty

z rozdílných tříd. Proměnné, které do výpočtu vstupovaly, jsou uvedeny dále i s označením, které je použito v popisu výsledného rozhodovacího stromu (číslem je označen řez):

- hustota bodů ve vnitřní zóně – *vnitřní hustota (1)*, *vnitřní hustota (2)*, *vnitřní hustota (3)*
- hustota bodů ve vnější zóně – *vnější hustota (1)*, *vnější hustota (2)*, *vnější hustota (3)*
- absolutní velikost souvislé plochy bez bodů – *díra (1)*, *díra (2)*, *díra (3)*
- relativní velikost souvislé plochy bez bodů vůči ploše objektu – *díra% (1)*, *díra% (2)*, *díra% (3)*.

Jak vyplývá z výsledku (obr. 27), celkem lze ke klasifikaci objektů využít čtyři proměnné, a to absolutní velikost souvislé plochy bez bodů v prostředním a dolním řezu – *díra (2)* a *díra (1)*, procentuální podíl souvislé plochy bez bodů na celkové ploše objektu v horním řezu – *díra% (3)* a hustotu bodů ve vnější zóně v prostředním řezu – *vnější hustota (2)*.

Výsledek klasifikace podle rozhodovacího stromu v trénovací lokalitě ukazuje chybová matice (tab. 1, pro vysvětlení tabulky viz podkapitulu 5.1 a tab. 2). Celková spolehlivost přesahuje 85 %, což je uspokojivý výsledek. Klasifikace je schopna poměrně spolehlivě rozpoznat strom a do třídy skal zařadit minimum objektů jiných tříd, což je výhodné z pohledu dalšího zpracování. Zpracovatelská přesnost třídy skal, tedy pravděpodobnost, že trénovací objekt této třídy bude správně klasifikován, je poměrně nízká. Na druhou stranu je nutné mít na paměti, že tyto výsledky jsou založené na jedné testovací lokalitě, kde samostatně skály tvoří jen necelých 10 % objektů. Navíc odlišení třídy mix od zbývajících dvou v testovacích datech bylo v některých případech subjektivní, protože příroda je velmi různorodá a vytvořený objekt vždy neodpovídal právě jednomu reálnému objektu.

4.3 Filtrace bodového mračka s využitím objektů

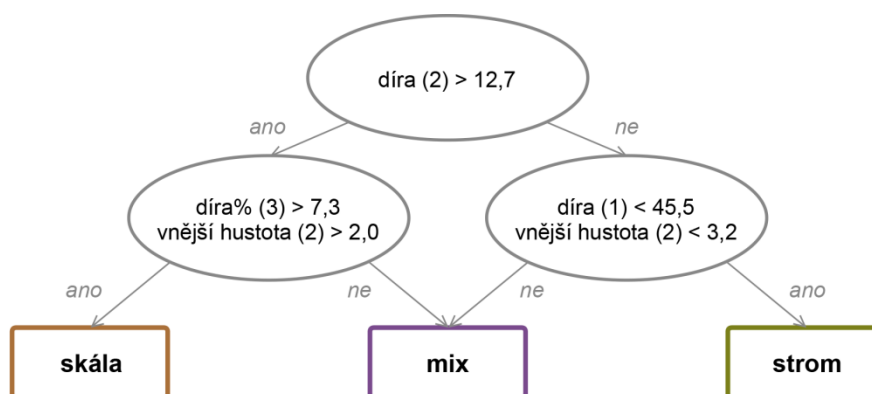
Filtrace jednotlivých objektů je posledním krokem navržené metody. Některé segmentační algoritmy vytvářejí objekty, ve kterých se v ideálním případě nachází odrazy jen od jednoho druhu objektu (tedy například od vegetace). V navržené metodě jsou ovšem hranice objektů definované pouze v rovině os x a y , a tak se v rámci jednoho objektu mohou vyskytovat terénní i neterénní body. Tato situace nastává především u tříd strom a mix.

Body patřící objektům třídy skála byly označeny jako terénní bez dodatečné filtrace. Zbylé dvě třídy byly filtrovány pomocí funkce `lasground_new` z `LAStools` s odlišnými parametry. Aby byly stromy ve své třídě skutečně odfiltrovány, byl zvolen *offset* 1 metr, kdežto ve třídě mix, kde se vyskytují i skalní útvary pod stromy, byl navýšen na 5 metrů a navíc bylo zintenzivněno i hledání iničiálních bodů terénu parametrem *hyper_fine*. Obě filtrace počítají se všemi odrazy a krok (*step*) pro prvotní tvorbu TIN byl nastaven na 3 metry, což odpovídá parametru *wilderness*, který je určen pro členitý terén. Příkaz pro filtraci třídy strom vypadá následovně:

```
lasground_new -i input -o output -step 3 -offset 1 -all_returns
```

a pro filtraci třídy mix:

```
lasground_new -i input -o output -step 3 -offset 5 -all_returns  
-hyper_fine
```



Obr. 27 – Rozhodovací strom

Rozhodovací strom popisuje sekvenci pravidel, podle kterých lze vstupní data rozdělit do požadovaných tříd. Skála je tedy například definována velikostí díry v prostředním řezu větší než 12,7 m², relativní velikostí díry v horním řezu větší než 7,3 % a vnější hustotou v prostředním řezu větší než 2,0 bodů/m².

trénovací data

	skála	strom	mix	součet	uživatelská přesnost
<i>klasifikace</i> skála	9	0	1	10	90,00%
strom	1	90	11	102	88,24%
mix	5	5	39	49	79,59%
součet	15	95	51	161	
zpracovatelská přesnost	60,00%	94,74%	76,47%		85,71%

Tab. 1 – Chybová matice klasifikace

Chybová matice ukazuje shodu mezi použitou klasifikací a trénovacími daty. V 85 % případů jsou objekty zařazeny do stejné třídy. Protože je zpracovatelská přesnost třídy skála rovna jen 60 %, ve 40 % případů se stane, že je skála považována za objekt jiné třídy (nejčastěji mix). Na druhou stranu uživatelská přesnost třídy skála uvádí, že jen v 10 % případů se ve třídě skála podle použité klasifikace vyskytne objekt jiné třídy.

5 VÝSLEDKY

Hlavní hypotézou, kterou se tato práce snaží dokázat či vyvrátit, je, že lze navrhnout automatizovaný postup filtrace dat leteckého laserového skenování v pískovcových skalních městech, jehož výsledky by byly obdobně spolehlivé jako manuální filtrace. Od manuální filtrace očekáváme, že odrazy pocházející od terénu, který lze v bodovém mračnu s obecnou zkušeností s místními podmínkami (např. se skalními útvary) rozeznat, jsou označeny jako terénní body a naopak vegetace je označena za neterénní. Hodnocení spolehlivosti navržené metody tedy mimo jiné spočívá v porovnání jejího výsledku s tím z manuální filtrace a zhodnocení, kolik bodů bylo klasifikováno odlišně. Podobně se postupovalo i s dalšími typy filtrace, kterými jsou robustní interpolace, použitá na data ze standardního skenování s následnou manuální kontrolou, a funkce *lasground*.

Jak bude ukázáno dále, číselná hodnota vyjadřující míru shody mezi jednotlivými filtracemi není vždy tím nejlepším ukazatelem spolehlivosti, pokud se na situaci díváme z praktického pohledu. Při tvorbě DMR za účelem orientace v terénu a hledání potenciální cesty i při následné analýze DMR pro získání informací o skalních útvarech může být shoda tvaru skalních útvarů méně podstatná než to, zda je vůbec v DMR konkrétní skalní útvar i jen zlomkem původních bodů zanesen či nikoliv. Jinak řečeno autorka považuje za zásadní chybu, pokud je odfiltrována celá skalní věž, ale za méně významnou chybu situaci, kdy jsou některé body ze skalního útvaru považovány za vegetaci při zachování celkové informace o tom, že skalní útvar existuje. Toto hledisko bylo hodnoceno spíše vizuálně.

Navržená metoda byla aplikována na všechny zájmové lokality v jednotné podobě. Jedinou výjimkou je již zmíněný parametr meze relativního převýšení hranice mezi objekty pro jejich spojení, který byl oproti nastavení v testovací lokalitě Milenci u všech ostatních snížen. Výsledné DMR z jednotlivých lokalit jsou umístěné v digitálních přílohách ve složce *vysledky*.

5.1 Porovnání filtrací

Pro zhodnocení míry shody filtrovaných bodových mračen byla vždy z každé dvojice vytvořena nová vrstva pomocí funkce *Spatial Join*, která našla body z obou vstupních mračen, které si jsou v prostoru nejbližší, a informace o nich spojila do jednoho záznamu. Následně byla tato tabulka agregována do podoby chybové matice, jejíž vzorová podoba je v tab. 2. Tato tabulka porovnává,

kolik bodů mělo stejnou hodnotu třídy, tedy kolik bodů bylo v obou mračnec vyhodnoceno jako terénní nebo neterénní (hodnoty a a d), a kolik se lišilo (hodnoty b a c). V každém řádku i sloupci bylo vypočítáno, kolik procent bodů z celkového množství bodů klasifikovaných do dané třídy v konkrétní filtraci se shoduje ve třídě s druhou filtrací. Tedy například pro filtraci B platí, že $a / (a + b) \cdot 100 \%$ bodů povrchu se shoduje s filtrací A, doplněk do 100 % označuje body povrchu filtrace B, které byly ve filtraci A klasifikovány jako vegetační. Dále tabulka obsahuje celkovou míru shody, která je vyjádřena jako poměr shodně klasifikovaných bodů ke všem bodům, tedy $100 \cdot (a + b) / (a + b + c + d)$.

		filtrace A			
		terén	vegetace	součet	
filtrace B	terén	a	b	a + b	$a / (a + b) \cdot 100$
	vegetace	c	d	c + d	$d / (c + d) \cdot 100$
	součet	a + c	b + d	-	
		$a / (a + c) \cdot 100$	$d / (b + d) \cdot 100$		$100 \cdot (a + b) / (a + b + c + d)$

Tab. 2– Vzor chybové matice

Tato tabulka slouží k označení proměnných zobrazených v chybových maticích. Podrobněji je vysvětlena v textu.

V následujících oddílech budou bližší popsány výsledky porovnání všech použitých filtrací. Důraz je kladen především na srovnání navržené a manuální filtrace, protože manuálně filtrované bodové mračno je považováno za referenční. Uvedeny jsou celkové závěry i odlišnosti jednotlivých lokalit.

5.1.1 Porovnání výsledků s manuální filtrací

Navržená a manuální filtrace (tab. 3) vykazují 85% shodu po započtení výsledků ze všech zájmových lokalit. V porovnání s ostatními typy filtrací je tato shoda o 9 % v případě robustní filtrace a o 13 % v případě funkce lasground vyšší. Protože považujeme manuálně filtrovaná data za spolehlivá, lze říci, že zhruba 20 % terénních bodů je navrženou filtrací chybně klasifikováno a označeno za vegetaci, v opačné situaci se jedná jen o necelých 9 %. Pokud je v bodovém mračnu filtrovaném navrženou metodou označen bod za terénní, je více než 90% pravděpodobnost, že skutečně náleží terénu. V případě vegetace je tato pravděpodobnost nižší než 80 %. Z toho vyplývá, že jsou neterénní body poměrně spolehlivě odfiltrovány, ovšem i za cenu ztráty určitého množství bodů terénu.

		manuální filtrace			
		terén	vegetace	součet	
navržená filtr.	terén	123 064	9 940	133 004	92,53%
	vegetace	29 529	106 718	136 247	78,33%
	součet	152 593	116 658	269 251	
		80,65%	91,48%		85,34%

Tab. 3 – Chybová matice porovnávající manuální a navrženou filtraci

Uvedené hodnoty jsou součty bodů ze všech zájmových lokalit.

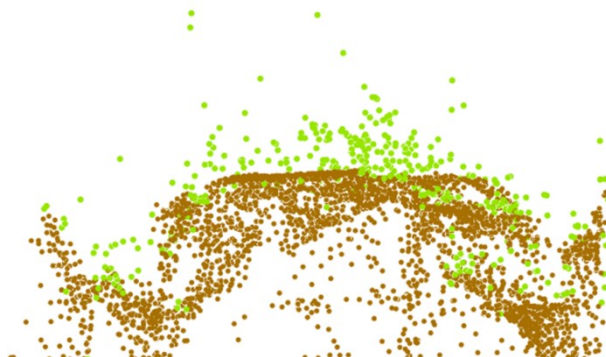
Dále bude uveden komentář k výsledkům v jednotlivých zájmových lokalitách. Chybové matice porovnávací navrženou a manuální filtraci pro každou lokalitu zvlášť jsou v příloze 3, důležité nebo zajímavé hodnoty jsou zmíněny přímo v textu.

Baronova vyhlídka

Lokalitu Baronova vyhlídka tvoří vrcholová plošina porostlá stromy a strmé skalní stěny. Protože se tu nevyskytuje žádná samostatně stojící skalní věž, všechny objekty byly zařazeny do třídy mix nebo strom, což znamená, že na nich proběhla filtrace (viz podkapitolu 4.3). Většina objektů třídy mix zahrnovala skalní stěnu a strom rostoucí na jejím vrcholu. Výsledkem filtrace takového objektu bývá jen vrcholová plošina, u které navíc dochází k mísení bodů ze stromu mezi terénní, a jen velmi malé množství bodů ze stěny. Na místě stěny tedy v DMR vzniká prázdné místo, ale okraj plošiny bývá zachován správně, a tak tento nedostatek autorka nepovažuje za zcela zásadní z pohledu tvorby DMR.

Z hlediska praktického využití vytvořeného DMR může být vnímán jako důležitější problém to, že některé terénní body v mračnu filtrovaném navrženou metodou náleží ve skutečnosti vegetaci. Množství těchto bodů je sice menší než množství bodů zasažených chybou zmíněnou v předchozím odstavci, nicméně při použití tohoto výsledku by uživatel získal mylnou představu o podobě terénu v lokalitě. Mohlo by se totiž zdát, že z vrcholové plošiny vyrůstají další skalní útvary a že není plochá (obr. 28).

Za pozitivní lze vedle zachování okraje plošiny považovat také to, že například strom vyrůstající ze skalní stěny přímo pod vyhlídkou byl správně odfiltrován, přestože se nachází v těsné blízkosti stěny.



Obr. 28 – Chybně klasifikované body vegetace

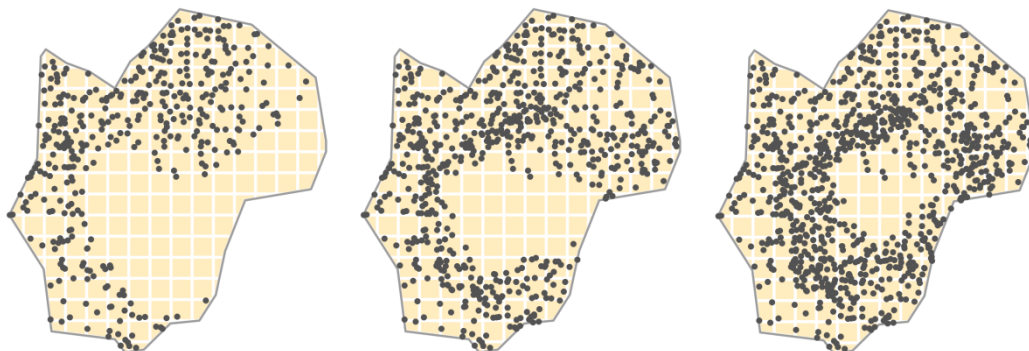
Obrázek nabízí pohled na Baronovu vyhlídku směrem od SV (tedy například od Milenců, na které nabízí plošina výhled). Zobrazeny jsou jen body, které navržená metoda klasifikovala jako terénní. Hnědou barvu mají ty, které jsou označené za terénní také v manuální filtraci, zeleně jsou odrazy od vegetace na vrcholové plošině (tedy chybně klasifikované body).

Zdroj: ČÚZK – data podrobného LLS (2013)

Bludiště – Divoká rokle

Bludiště – Divoká rokle zahrnuje svahy po obou stranách rokle, ze kterých vystupují skalní útvary. V lokalitě se nachází i jedna osamocená věž v mírném svahu a dvě věže blízko u sebe jen drobně porostlé vegetací na svých vrcholech. Navzdory tomu byly všechny objekty v lokalitě klasifikovány do třídy mix. Důvodem k chybné klasifikaci u dvou sousedících věží byly další dva vysoké stromy v blízkosti, které byly zahrnuty do stejného objektu. Přesto jsou alespoň částečně tvary těchto věží zachované. Na rozdíl od toho zmíněná osamocená věž (obr. 17) byla odfiltrována celá. Do třídy mix se dostala kvůli relativní velikosti prázdné oblasti ve třetím řezu – díra% (3), která dosáhla jen poloviny

požadované hodnoty pro zařazení objektu do třídy skála. Jak je vidět na obr. 29, za malou velikost prázdné plochy ve třetím řezu mohou mimo jiné body, které se vyskytují uvnitř jinak poměrně pravidelné díry ve vnitřní části skály – tyto body pochází od převisu u paty věže a jsou viditelné již od dolního řezu. Celá výška věže, ze které se vypočítávají hladiny řezů, byla nadhodnocena kvůli stromku, který roste na věži, což také přispělo k chybné klasifikaci třídy objektu. Horní řez byl díky tomu veden ve vyšší výšce, kde se věž zužuje a přechází ve vrchol.



Obr. 29 – Řezy skalní věží klasifikované do třídy mix

Obrázky ukazují tři řezy skalní věží od dolního nalevo po horní napravo. Pro lepší představu o velikosti prázdné plochy je v podkladu mřížka 1 x 1 metr. V dolním řezu se místem bez bodů napravo projevuje přítomnost svahu, ve kterém skalní věž stojí. Fotografie věže jsou na obr. 17.

Zdroj: ČÚZK – data podrobného LLS (2013) a ČÚZK – data standardního LLS (2013)

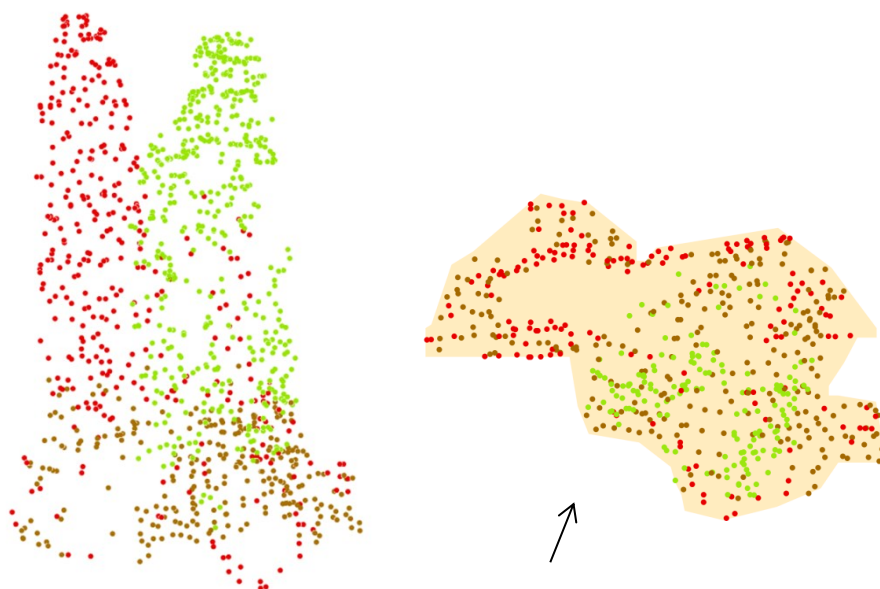
Milenci

Lokalita Milenci byla použita jako testovací lokalita pro kalibraci klasifikace objektů. Jako v jediné tu také bylo manuálně klasifikováno stejné bodové mračno, které bylo filtrováno navrženou metodou. Díky tomu i díky velké rozloze lokality je počet hodnocených a porovnávaných bodů vysoký, a tak by se mohlo zdát, že výsledky z této oblasti mohly výrazně ovlivnit i celkové výsledky. Po vynechání těchto bodů v součtech všech lokalit byly ovšem rozdíly velmi malé, takže lze říci, že se zmíněný jev neprojevil.

V lokalitě se nachází velké množství jednotlivých skalních věží nebo větších skalních masivů, okolo kterých roste mnoho stromů. Objekty třídy skála uchovaly veškeré body patřící masivům a větším skalním věžím i s drobným porostem na nich. Právě tento porost a drobné nedostatky z filtrace třídy mix tvoří veškerou neodfiltrovanou vegetaci v lokalitě. Korektně tedy bylo rozpoznáno 95 % neterénních bodů.

Z opačného pohledu jsou výsledky poněkud horší – 20 % terénních bodů bylo navrženou filtrací označeno za vegetaci. Způsobeno je to jednak zředěním bodů na některých skalních útvarech, které byly klasifikovány do třídy mix, ale také odfiltrováním několika celých skalních věží. Jedná se vždy o poměrně úzké vysoké útvary, u kterých velmi blízko roste strom (obr. 30), což způsobuje výškově nedostatečně výraznou hranici mezi objekty v aproximovaném povrchu a výsledkem je jejich spojení v jeden objekt. Takový objekt sice byl správně zařazen do třídy mix, ale filtrace, která na něm proběhla, je schopna si do určité míry poradit se stromy rostoucími přímo ze skalních útvarů, ale s touto situací nikoliv.

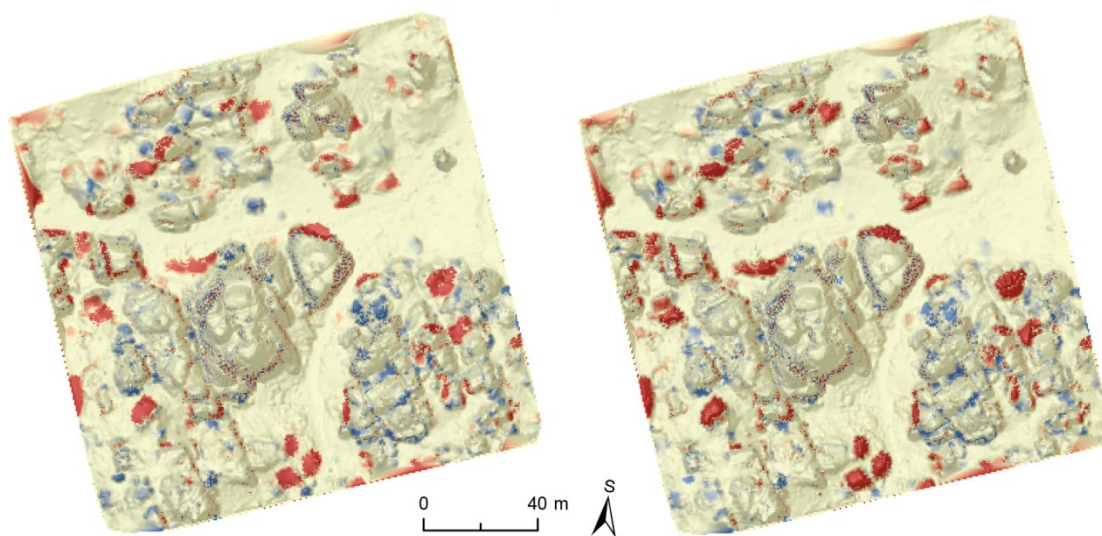
Stínované reliéfy vytvořené z DMR z manuálně filtrovaných dat i z výsledků navržené metody v této lokalitě jsou umístěny v příloze 4. Rozdíly těchto DMR jsou zobrazeny na obr. 31.



Obr. 30 – Odfiltrovaná skalní věž

Vlevo je pohled na jeden z objektů v lokalitě Milenci, kde došlo k odfiltrování skalní věže. Hnědě jsou znázorněny body, které jsou v manuální i navržené filtraci označeny jako terénní, zeleně vegetační a červeně ty, které mají být součástí terénu, ale navržená filtrace je označila za neterénní. Vpravo je prostřední řez stejným objektem. Je na něm vidět, jak je skalní věž úzká a velmi podobně rozlehlá jako strom. Pohled na levém obrázku směřuje zespodu až mírně zleva vzhledem k půdorysu objektu, jak naznačuje šipka na pravém obrázku. Červené body za stromem na levém obrázku patří vedlejší věži, kterou ale segmentace přiřadila z větší části do sousedního objektu.

Zdroj: ČÚZK – data podrobného LLS (2013) a ČÚZK – data standardního LLS (2013)



Obr. 31 – Rozdíly DMR v lokalitě Milenci

Oba obrázky ukazují rozdílový rastr vzniklý odečtením DMR vytvořeného navrženou metodou od DMR z manuálně klasifikovaných dat. Červená barva představuje místo, kde DMR z manuálně filtrovaných dat převyšuje DMR vytvořené navrženou metodou (maximální převýšení je 32 metrů). Modrá barva ukazuje opačnou situaci, tedy převýšení DMR vytvořeného navrženou metodou nad DMR z manuálně filtrovaných dat (maximální převýšení je 31 metrů). Na obrázku vlevo slouží jako podklad stínovaný reliéf z DMR vytvořeného navrženou metodou, vpravo z DMR z manuálně filtrovaných dat. Především v červeně označených místech je patrný rozdíl mezi oběma stínovanými reliéfy. Na větších skalních útvarech se mohou projevit nedostatky tvorby DMR v místech kolmých stěn či převisů, které jsou znatelné měnícími se barvami jednotlivých pixelů v těsné blízkosti.

Zdroj: ČÚZK – data podrobného LLS (2013) a ČÚZK – data standardního LLS (2013)

Skalní ostrov – jih

Výsledky z lokality Skalní ostrov – jih jsou podobné jako u Baronovy vyhlídky. Skalní stěny byly do značné míry odfiltrovány a na vrcholové plošině zůstalo množství bodů z vegetace. Problém se ještě více prohlubuje tím, že algoritmus vytvořil na značné části území lokality jeden objekt, který tedy zahrnuje skalní stěny, přilehlé úzké skalní věže, vrcholovou plošinu s porostem i bez něj a skalní věž přímo na plošině. Důvodem je velká výška skalní stěny, díky které se relativní výška hranice mezi objekty na vrcholové plošině, které zahrnují i část stěny, stane malou a dojde ke spojení objektů, ačkoliv kdyby se tyto objekty nacházely v rovinném terénu, k jejich spojení by nedošlo. Celý tento výsledný objekt byl klasifikován do třídy mix a následná filtrace vyhodnotila body skalní věže Hladomorna jako neterénní stejně jako body přilehlých skalních věží u stěny. Okraje plošiny opět zůstaly zachovány poměrně uspokojivě.

Skalní ostrov – sever

Lokalitu Skalní ostrov – sever tvoří z 85 % terénní body, které formují vysoké skalní věže tvořící pozůstatky souvislého skalního masivu. Z relativně malého počtu bodů patřících vegetaci jich označila navržená metoda 60 % chybně jako terénní a naopak do těch neterénních zařadila téměř 15 % terénních bodů, které ve výsledku tvoří více než polovinu bodů klasifikovaných navrženou metodou jako neterénní. Celková míra shody přitom dosahuje 80 % díky tomu, že naprostou většinu bodů tvoří terénní, které byly klasifikovány správně.

Při tvorbě objektů v této lokalitě nedošlo ke stejné situaci jako v předchozí, ačkoliv výška stěny je zde ještě vyšší. Skalní věže jsou zde totiž odděleny poměrně výraznými puklinami, a tak netvoří vrcholovou plošinu. Navíc na horních částech skalních útvarů roste jen poměrně malé množství vegetace a autorka považuje za správné z hlediska navržené metody, že nebyly vytvořeny samostatné objekty pro tuto vegetaci. Na druhou stranu stromy u paty skalní stěny byly v některých případech připojeny k celému skalnímu útvaru, protože se nachází v těsné blízkosti skalní stěny.

Skalní věže na okraji celého masivu, které jsou od něj výrazněji oddělené než zbytek, byly zařazeny do třídy skála, ostatní do třídy mix. Právě k těm věžím, které jsou na okraji a patřily do třídy skála, jež neprošla následnou filtrací, byly často přidruženy i stromy rostoucí pod skalním útvarem, a proto je takové množství odrazů od vegetace chybně klasifikováno jako body terénní. Je nutné poznamenat, že přinejmenším jeden úzký strom dosahující výšky téměř jako skalní věž, u které roste velmi blízko, byl rozpoznán až při terénním průzkumu, kterým byla manuální filtrace zpřesněna. Tento objekt tedy stojí mimo možnosti navržené metody.

Zbylé skalní útvary byly zařazeny do třídy mix kvůli malé vnější hustotě v prostředním řezu, z pohledu ostatních příznaků by patřily jednoznačně mezi skály. Ze špatného zařazení plyne následná filtrace těchto objektů, která způsobila, že zde bylo mylně nalezeno množství neterénních bodů. Celkově ovšem došlo spíše ke zředění bodů, které nemá na výsledné tvary skalních objektů velký vliv.

Skalní ostrov – střed

Celková míra shody s manuální filtrací dosáhla v lokalitě Skalní ostrov – střed jedné z nejmenších hodnot. Část objektů zde bylo zařazeno do třídy skála, díky čemuž byly i neterénní body vegetace v jejich okolí ponechány mezi terénními. Zbylé objekty byly filtrovány jako třída mix, což způsobilo zředění bodů skalních útvarů. Ačkoliv tedy není navržená klasifikace v této lokalitě příliš spolehlivá, jak vyplývá z porovnání s manuálně filtrovanými body, lze konstatovat, že žádné skalní útvary

v terénních bodech zcela nechybí, jen jejich tvar může být nedokonale vystihnout. S přihlédnutím k tomu, jak je tato lokalita nepřehledná a jak náročné bylo ji manuálně filtrovat, to autorka nepovažuje za velký nedostatek.

Stěna u Starosty

Lokalitu Stěna u Starosty tvoří částečně rovinatá plocha porostlá stromy a částečně vysoké skalní útvary, věže a stěny. Některé z těchto útvarů byly správně přiřazeny do třídy skála, a tak byl jejich tvar zcela zachován, ale způsobilo to vmísení odrazů od stromů rostoucích kolem útvarů nebo přímo z nich mezi terénní body. Ostatní skalní útvary prošly jemnější filtrací jako objekty třídy mix a body tvořící jejich povrch byly zředěny, ale celkově žádný útvar ve výsledném bodovém mračnu nechybí.

V rovinaté části lokality bylo několik bodů pocházejících od vegetace zahrnuto do terénních. Jejich počet sice není velký, ale nachází se poměrně vysoko nad okolním terénem, a tak by při modelování DMR způsobily výrazné elevace. Z důvodu hustého porostu tu vytvořené objekty vždy neobsahují právě jeden strom se všemi body náležícími jeho koruně. Místo toho jsou koruny stromů v některých případech nepřirozeně odříznuté. Pokud totiž rostou stromy natolik blízko, že se jejich koruny prolínají, nelze je od sebe při tvorbě objektů spolehlivě oddělit. Klasifikace těchto ne zcela ideálně vytvořených objektů neproběhla správně a některé z nich byly přiřazeny do třídy mix, především kvůli hodnotě vnější hustoty prostředního řezu.

Teplická propast

V lokalitě Teplická propast se projevují jevy popsané u lokalit Skalní ostrov – jih a Skalní ostrov – sever. Dvě věže oddělené puklinou od zbytku masivu byly zařazeny do třídy skála, a tak nedošlo k odfiltrování poměrně nízkého porostu na jejich vrchu ani u paty. Na zbytku skalních útvarů, které byly klasifikovány jako mix, proběhla filtrace, která měla za následek označení bodů skalních stěn za mimoterénní a ponechání některých neterénních bodů v terénu na vrcholové plošině, která má být zcela rovná. Kvůli tomu má také tato lokalita nejnižší celkovou míru shody s manuální filtrací, a to jen 75 %. Z hlediska úplnosti informací ve výsledném DMR ovšem považuje autorka za největší nedostatek odfiltrování podlouhlého úzkého skalního útvaru s názvem Lampasák. Sousedící větší útvar jménem Loď byl v terénu částečně ponechán.

Vlčí rokle – u rozvodí

Lokalita Vlčí rokle – u rozvodí je specifická rozsáhlou rovinou, která není zarostlá stromy. S takovým typem povrchu nebylo při navrhování metody počítáno. Algoritmus vytvořil na místě roviny několik objektů, které byly zařazeny do třídy mix. Filtrace ovšem vyhodnotila všechny body jako terénní, takže výsledek je správný.

Kromě zmíněné roviny se v lokalitě nachází také skalní věže a další skalní útvary, které jsou ale zakryté korunami stromů. Některé skalní útvary byly identifikovány až při terénním šetření, a tak nelze očekávat, že by je navržená metoda klasifikovala správně. Obecně jsou ve výsledném bodovém mračnu poměrně zjednodušené tvary skalních útvarů, protože došlo ke zředění bodů při filtraci. Na druhou stranu se ale tentokrát mezi terénní body dostaly jen 3 % vegetačních, které sice narušují výsledné DMR, ale výrazně méně než u některých jiných lokalit.

Za pozornost v této lokalitě stojí vzrostlý strom na okraji rovinatého úseku, u kterého bylo několik bodů přiřazeno do terénu, přestože podobně vypadající stromy poblíž byly filtrovány bezchybně.

Objekt, který byl kolem stromu vytvořen, zahrnuje kromě stromu i část roviny, což není z hlediska metody zásadní problém. V tomto případě ovšem okolní rovina navýšila hustotu bodů ve vnější části prostředního řezu na 3,47 bodu/m², kvůli čemuž byl strom mylně považován za objekt třídy mix. Mez tohoto příznaku byla v navržené metodě nastavena na 3,2 bodu/m². Jedná se tedy o stejný nedostatek jako v lokalitě Stěna u Starosty.

Vlčí rokle – ústí Černého příkopu

Ačkoliv je lokalita Vlčí rokle – ústí Černého příkopu značně členitá a zarostlá, dosahuje nejlepšího výsledku z pohledu celkové míry shody ze všech zájmových lokalit. Za úspěchem ovšem stojí spíše podoba lokality než navržená metoda. Nenachází se tu žádná skalní věž ani jiný výrazný skalní útvar, ale skály tvoří poměrně zaoblené tvary vystupující ze svahu a jsou porostlé vegetací. Z tohoto důvodu byly veškeré vytvořené objekty přiřazeny do třídy strom nebo mix a následně filtrovány. Filtrace v některých případech označila za neterénní body i některé ostřejší skalní výběžky, a tak jsou tvary skal mírně zkresleny. Také se tu opět projevuje nedostatek filtrace třídy mix, která zanechá mezi terénními body i odrazy od stromů, které jsou poměrně vysoko nad okolním terénem. Téměř stejné shody s manuální filtrací tu dosahuje i bodové mračno filtrované funkcí lasground.

Vlčí vodopád

V lokalitě Vlčí vodopád nalezneme výraznou skalní stěnu, jejíž body byly podobně jako u jiných lokalit s tímto typem skalního útvaru odfiltrovány. Chybně byla také klasifikována skalní věž zmíněná již při popisu lokality (obr. 12), která není z bodového mračna bez znalosti terénu rozpoznatelná. Je dobré také podotknout, že dva výrazné stromy na vrcholu skalní stěny byly ponechány mezi terénními body, ačkoliv objekty, ve kterých se nachází, byly zařazeny do třídy strom. Autorka vidí příčinu v tom, že se stromy nachází na samém okraji lokality, drobná část bodů z jejich koruny dokonce chybí a terénní body pod nimi jsou velmi řídké. Při filtrování byl pravděpodobně terén vymodelován jako strmý svah zahrnující i odrazy od stromu, a proto nebyly považovány za vegetaci.

5.1.2 Porovnání výsledků s ostatními metodami filtrace

Pro lepší zhodnocení výsledků navržené metody byly vybrány další dvě metody filtrace (robustní interpolace a lasground), se kterými jsou data dále srovnávána. Aby bylo zřejmé, kde jednotlivé filtrace fungují nebo chybují stejně nebo se naopak liší, jsou zároveň porovnávány i s manuální filtrací. Toto srovnání proběhlo jen na lokalitě Milenci, protože tam byla manuálně filtrována i data ze standardního skenování, tedy ta, na která byla použita robustní interpolace s následnou manuální kontrolou. Stínované reliéfy vytvořené z DMR z dat filtrovaných všemi uvedenými metodami jsou umístěné v příloze 4.

Ze srovnání manuální filtrace s navrženou a robustní (tab. 4) vyplývá, že navržená i robustní filtrace po manuální kontrole dávají v téměř 80 % případů stejné výsledky, navíc 72 % bodů je v obou porovnávaných metodách klasifikováno správně vůči manuálně filtrovaným datům. Samotná robustní filtrace se shoduje s manuálně filtrovanými daty v 76 % případů. V navržené filtraci je odfiltrováno o necelou polovinu méně terénních bodů než u robustní filtrace i přes to, že po robustní filtraci proběhla manuální korekce, díky které, dle soudu autorky, byly navraceny do terénních bodů odrazy od skalních věží Milenci, Uhlířská a některých dalších (toto lze pozorovat na stínovaném reliéfu z DMR vytvořeného z dat filtrovaných robustní interpolací umístěného v příloze 4 – v místě skalních věží má

výrazně podrobnější průběh). Mezi těmito přidanými věžemi je i minimálně jedna, která navrženou filtrací rozpoznána nebyla, a také jedna, která je ve skutečnosti stromem nacházejícím se v blízkosti skalní věže. Je ale nutné podotknout, že v bodovém mračnu ze standardního skenování není manuální filtrace snadná kvůli nízké hustotě dat i způsobu nalétání území, při kterém byly objekty nasnímány jen z jedné strany. Z důvodu rozdílného bodového mračna vstupujícího do robustní a navržené filtrace lze toto srovnání chápat pouze jako ilustrativní, protože na stejných datech by mohly výsledky robustní filtrace být odlišné.

		<i>manuální / robustní filtrace</i>					
		<i>terén / terén</i>	<i>terén / vegetace</i>	<i>vegetace / vegetace</i>	<i>vegetace / terén</i>	<i>součet</i>	
<i>manuální / navržené filtr.</i>	<i>terén / terén</i>	8 136	3 347	-	-	11 483	70,85%
	<i>terén / vegetace</i>	1 123	1 611	-	-	2 734	58,92%
	<i>vegetace / vegetace</i>	-	-	10 016	306	10 322	97,04%
	<i>vegetace / terén</i>	-	-	497	54	551	9,80%
	<i>součet</i>	9 259	4 958	10 513	360	25 090	
		87,87%	32,49%	95,27%	15,00%		78,98%

Tab. 4 – Porovnání manuální filtrace s robustní i navrženou filtrací v lokalitě Milenci

Sloupce i řádky jsou popsány pomocí dvojice tříd. První z této dvojice označuje třídu, do které byl bod klasifikován manuálně, druhá třída pochází od příslušné filtrace (u sloupců z robustní filtrace doplněné manuální korekcí, v řádcích z navržené filtrace). Například 3 347 bodů, které byly manuální filtrací označeny za terénní, klasifikovala navržená metoda správně, ale robustní interpolace je odfiltrovala z terénních bodů. Celková míra shody zahrnuje všechny kombinace, ve kterých se robustní i navržená filtrace shodly, tedy všechny hodnoty na diagonále, při započítání jen správně klasifikovaných bodů vůči manuální filtraci je hodnota shody 72,35 %.

V tab. 5 byly stejným způsobem porovnány manuální filtrace s navrženou metodou a funkcí lasground. Celková shoda je jen mírně nižší než v předchozím případě, množství stejně klasifikovaných bodů ve všech třech filtracích dosahuje 66 %. Opět se ukazuje, že navržená metoda zachovává více terénních bodů. Lasground totiž odfiltrovala více než polovinu odrazů od terénu. Z nich jen ve 30 % případů chybovala také navržená metoda. K těmto shodným nedostatkům v obou filtracích patří především úzké skalní věže, které mají v blízkosti strom, jak bylo popsáno v předchozí kapitole u lokality Milenci. Naprostá většina rozdílů mezi navrženou filtrací a lasground se koncentruje v objektech třídy skála, protože lasground z nich značnou část bodů považuje za neterénní, kdežto navržená metoda celý objekt klasifikuje mezi odrazy od terénu. Zbylé dvě třídy objektů, tedy stromy a mix, byly také filtrovány funkcí lasground, a tak jsou rozdíly mezi výsledky stejné filtrace jen s rozdílnými parametry minimální.

		manuální filtrace / lasground					
		terén / terén	terén / vegetace	vegetace / vegetace	vegetace / terén	součet	
manuální / navržené filtr.	terén / terén	28 254	24 032	-	-	52 286	54,04%
	terén / vegetace	2 802	9 949	-	-	12 751	78,03%
	vegetace / vegetace	-	-	47 752	357	48 109	99,26%
	vegetace / terén	-	-	2 126	126	2 252	5,60%
	součet	31 056	33 981	49 878	483	115 398	
		90,98%	29,28%	95,74%	26,09%		74,59%

Tab. 5 – Porovnání manuální filtrace s lasground a navrženou filtrací v lokalitě Milenci

Stejně jako u tab. 4, jen místo robustní filtrace jsou zde hodnoty z filtrace lasground. Celková shoda všech tří filtrací je rovna 65,86 %.

6 DISKUZE

Z popsaných výsledků vyplývá, že navržená metoda do určité míry naplnila cíl práce a přinesla spolehlivější filtraci bodového mračna v pískovcových skalních městech, než umožňují běžné automatické metody. Na druhou stranu získané DMR neodpovídá zcela požadavkům pro jeho praktické využití, z nichž některé byly nastíněny v úvodu, a to z důvodu místy chybně klasifikované vegetace. Navíc i některé skalní věže byly navrženou metodou odfiltrovány. I přesto považuje autorka tuto práci za potvrzení hypotézy, že lze bodové mračno z pískovcového skalního města filtrovat pomocí objektově orientovaného přístupu s využitím rozdílu mezi skalními útvary a vegetací spočívající v uspořádání bodů uvnitř objektu. Dále budou shrnuty silné i slabé stránky jednotlivých kroků navržené metody i s návrhy na možná vylepšení.

Segmentace

Segmentační metoda byla zvolena podle představy, že jednotlivé stromy a skalní útvary od sebe dělí lokální minima povrchu aproximovaného z bodového mračna. Úskalí tvorby tohoto povrchu byly diskutovány již v oddílu 2.2.2. Z pohledu spolehlivosti segmentace je kvalita tohoto povrchu stěžejní, protože pokud se v něm některá elevace neprojeví, není možné objekt rozpoznat. Mimo to je ovšem také důležité, aby byly sníženiny mezi elevacemi dostatečně výrazné, tj. jednotlivé objekty byly dobře oddělitelné. Zatímco první zmíněný problém ve výsledcích zaznamenán nebyl, ten druhý v některých případech pozorovat lze. Protože byl povrch tvořen z nejvyšších bodů v gridu, lokální minima byla nadhodnocena, a tak mohlo dojít ke spojení objektů nacházejících se blízko u sebe, ačkoliv z bodového mračna by jejich hranice rozpoznatelná byla.

Metoda segmentace založená na principu tvorby povodí vykazuje ovšem častěji opačný problém, tedy vytvoření většího počtu objektů kvůli nedokonalostem povrchu spočívajícím ve výskytu drobných prohlubní. V praxi to znamená, že jedna členitější skalní věž byla tvořena více segmenty. Tyto nedokonalosti měla na svědomí mimo jiné i interpolační metoda. Její výhodou, kvůli které byla v navržené metodě použita, je zvýraznění lokálních extrémů. Na druhou stranu právě tato vlastnost v některých případech způsobila umělé elevace ve vytvořeném povrchu. Jak ale bylo ukázáno například na obr. 25, stejný efekt měla také nevzrostlá vegetace nebo rozrušený skalní povrch.

Přesegmentování bylo řešeno pomocí spojování objektů na základě výšky hranice mezi nimi. Tento přístup se ukázal být vhodným spíše na rovinnatém terénu, ze kterého vystupují jednotlivé

stromy a skalní věže. Jejich části byly povětšinou správně spojeny, přičemž reálné objekty zůstaly oddělené. Naopak spojování způsobilo poměrně výrazné potíže v situaci, kdy se popsaný rovinatý terén nachází na vrcholové plošině obehnané vysokou skalní stěnou. Algoritmus v takovém případě často spojil mnoho objektů na plošně, protože byl výpočet relativní výšky hranice mezi objekty ovlivněn nepoměrně velkou výškou skalní stěny. Pro zlepšení výsledku se nabízí například použití hierarchického přístupu ke spojování a následné vyhodnocování objektů na různé úrovni. V praxi by to tedy mohlo fungovat tak, že zůstanou zachovány veškeré hranice původních segmentů, jen by jim byla přidělena určitá kategorie významnosti. Při výpočtu příznaků a klasifikaci jednotlivých objektů by tak bylo postupováno od těch původních ke spojeným a až podle výsledků klasifikace by byly objekty skutečně pospojovány. Jinou možností by bylo zpracování „po patrech“, které by zahrnovalo nalezení této vysoké skalní stěny a rozdělení celého bodového mračka na dvě či více částí právě pomocí této stěny. Tento přístup by ovšem fungoval dobře tam, kde je tato stěna dostatečně výrazná a její průběh je jednoduchý, nečlenitý, a to v pískovcových skalních městech rozhodně není pravidlem.

Celkově lze segmentaci označit za velmi důležitou část navržené metody, protože jejím selháním jsou výsledky celé metody silně ovlivněny. Použití některého sofistikovanějšího přístupu k rekonstrukci povrchu by mohlo zajistit vhodnější vstup do segmentace. Ačkoliv bylo zmíněno, že se ball-pivoting algoritmus příliš nehodí pro použití s daty LLS, protože vyžaduje rovnoměrně husté bodové mračno, při vzrůstající hustotě mračka a naskenování oblasti z různých směrů může tento nedostatek dat ztratit význam. Nerovnoměrně husté oblasti se sice v takovém bodovém mračnu budou stále nacházet, ale v situaci, kdy bude i ta největší vzdálenost sousedních bodů v řádu nižším než průměr koule, pomocí které se bude povrch aproximovat, nebude mít nerovnoměrnost vliv. Již i zpracovávané bodové mračno dosahuje vzdálenosti bodů v desítkách centimetrů a průměr koule pro aproximaci povrchu by mohl být v řádu prvních jednotek metrů.

Klasifikace

Proces klasifikace se skládá ze tří kroků – výpočtu příznaků, definování tříd a sestavení klasifikačních pravidel. Protože se jedná o klasifikaci objektů, použité příznaky mohou být jakékoliv vlastnosti celých segmentů. V praxi bývají použity rozptyl výšek a průměrná vzdálenost bodů v segmentu, procento bodů z jiného než posledního odrazu, součet reziduí k rovině proložené body a mnoho dalších (Xu a kol., 2012, viz oddíl 2.2.3). Navržená metoda je ovšem přizpůsobena teorii, že se stromy a skalní věže liší především vnitřním rozložením bodů uvnitř segmentu, a tak bylo toho hledisko zohledněno i při výběru příznaků (viz oddíl 4.2.1). Kromě použitých řezů, díky kterým byl problém převeden do 2D prostoru, se nabízí i další možnosti získání informace o rozložení bodů. V případě, že by byl nalezen vhodný algoritmus pro aproximování povrchu, bylo by možné použít ho také na převrácené bodové mračno, aby byl vytvořen i povrch „zespodu“, který by se dal chápat také jako aproximace terénu. Z porovnání průběhu těchto dvou povrchů v jednotlivých objektech by mohly být získány další příznaky vyjadřující například rozdíl výšky elevace v obou površích. V ideálním případě by pod stromem žádná elevace nevznikla, zatímco u skály by dosahovala téměř stejné výšky jako u horního povrchu. Tento fakt by mohl být také využitelný již při segmentaci.

Klasifikaci provádíme za účelem zařazení objektů do tříd, které je nutné definovat. V této práci byly zvoleny pouze tři základní třídy – skála, strom a mix. Při použití citlivějších příznaků by třída mix mohla být rozdělena dále na strom na skále, strom vedle skály apod. Opomenut byl také nízký

porost či rovný terén, u nichž příznaky založené na vodorovných řezech postrádají smysl. Ve výsledcích ale nebyl zaznamenán významný problém způsobený vynecháním těchto tříd.

Z důvodu výběru řízené klasifikace pro stanovení klasifikačních pravidel bylo nutné vytvoření trénovacích dat na jedné z lokalit. Jak se ovšem ukázalo ve výsledcích, není tato lokalita zcela reprezentativní s ohledem na ostatní zájmové oblasti. S tím souvisí i samotné sestavení klasifikačních pravidel, pro které byl zvolen poměrně jednoduchý nástroj v podobě rozhodovacího stromu. Pevně stanovené meze hodnot jednotlivých příznaků založené na jedné testovací lokalitě se ukázaly být zdrojem některých nedostatků produkovaných navrženou metodou (viz např. výsledky lokality Vlčí rokle – u rozvodí). K odstranění těchto problémů by jistě vedlo větší množství pečlivě vybraných trénovacích objektů a využití pravděpodobnosti či zohlednění lokální členitosti terénu v klasifikačních pravidlech. Příkladem klasifikace, která je založená na vyhodnocení pravděpodobnosti příslušnosti k určité třídě, může být například práce autorů Stal a kol. (2014), ve které byla využita binomická logistická regrese.

Filtrace

Závěrečná filtrace jednotlivých objektů může být chápána jako poslední krok segmentace, kdy se oddělí terénní a neterénní body v objektech třídy mix a strom a vzniknou tak objekty typu terén pod stromem, skála pod stromem apod. Implementace navržené metody v této práci nahrává spíše druhému záměru, který spočívá v tvorbě DMR z terénních bodů.

Jako filtrační algoritmus byla zvolena funkce lasground z nástrojů LAStools. Jejím principem je postupné zhušťování TIN, jak bylo popsáno v podkapitole 2.1. Výsledky filtrace správně zařazených objektů do třídy strom považuje autorka za zcela uspokojivé, nedostatky ovšem nachází u objektů třídy mix. Tato třída představuje velmi různorodé objekty a nastavení jednotných parametrů pro filtraci nepřináší vždy požadovaný výsledek. Z důvodu snahy o zachování co největšího množství odrazů od terénu mezi terénními body byly parametry nastaveny poměrně volně, a tak i některé neterénní body byly zařazeny mezi terénní. Na druhou stranu ani v tomto případě nedokázala filtrace správně určit body skalních stěn, protože se jeví jako zdi budovy.

Obecně lze tedy třídu objektů mix považovat spíše za něco, co vyžaduje další pozornost. V případě zavedení jejího podrobnějšího členění, jak bylo nastíněno v předchozí části o klasifikaci, by i následná filtrace mohla být citlivější. Potíže se skalní stěnou ovšem nastanou vždy při použití běžného filtračního algoritmu. Ten by například mohl být nahrazen kombinací segmentace a klasifikace, jež by se opíraly o příznaky získané například z doplňkových informací o signálu, vzdálenosti od aproximovaného terénu (viz předchozí část o segmentaci) apod. Klasifikace by také mohla být ovlivněna tím, do jaké třídy v podrobnějším členění (např. strom vedle skály, strom na skále) byl objekt zařazen, ať už jen rozdílnými klasifikačními pravidly nebo i zakomponováním určité topologické informace do rozhodování, protože předpokládáme jiné vzájemné prostorové rozložení terénu a vegetace v jednotlivých třídách objektů.

7 ZÁVĚR

V práci byla představena a otestována metoda, která na základě objektivě orientovaného přístupu a posouzení vnitřního rozložení bodů uvnitř objektů klasifikuje body LLS na terénní a neterénní. Analogie objektivě orientovaného přístupu v souvislosti s filtrací dat LLS v pískovcových skalních městech není zcela inovativní, prozatím byly ovšem provedeny pokusy jen ve zcela odlišném měřítku než v navržené metodě, a to na území národních parků České a Saské Švýcarsko (viz kapitola 3). Podrobnější segmentace až na úroveň jednotlivých stromů a skalních útvarů umožňuje analýzu bodů, z nichž jsou objekty tvořeny, což poskytuje nové možnosti v rozeznávání objektů.

Ačkoliv navržená metoda dosáhla určitého úspěchu kvantifikovaného mírou shody s relativně spolehlivou manuální filtrací, lze tuto práci chápat spíše jako důkaz pro tvrzení, že je možné využít informaci o rozložení bodů v objektu k rozeznání skalních útvarů od stromů, spíše než jako vytvoření nástroje pro klasifikaci dat LLS. Na druhou stranu segmentace i klasifikace objektů vytvořené v rámci návrhu metody by mohly v budoucnu prakticky pomoci při manuální kontrole výsledků automatické filtrace. V případě, že segmentace proběhne správně, je snazší prohlížet ve 3D prostoru jednotlivé objekty než celou scénu, přičemž objekty třídy mix a skála poukazují na velmi pravděpodobný výskyt nedostatků automatické filtrace. Při tvorbě DMR 5G probíhala v pískovcových skalních městech manuální kontrola, nicméně data standardního skenování nejsou dostatečně hustá pro využití v navržené segmentaci.

DMR vytvořený z dat filtrovaných navrženou metodou obsahuje více informace o průběhu terénu než při jeho tvorbě z dat filtrovaných jinými automatickými metodami použitými v práci, protože navržená metoda označila menší množství terénních bodů za mimoterénní. Stále ovšem nespĺňuje zcela požadavky na použití k orientaci v terénu, které byly zmíněny v úvodu práce. Z důvodu chybné klasifikace některých odrazů od vegetace vznikají v DMR falešné elevace, v opačném případě chybí skalní útvary. Navíc při zachování odrazů od kolmých skalních stěn a převisů mezi terénními body dochází při tvorbě DMR pomocí triangulace ke vzniku artefaktů. Při výskytu převisů již totiž nelze modelovat DMR jen v 2,5D prostoru, a tak pro využití potenciálu takto podrobných dat bude muset být terén tvořen ve 3D prostoru nebo dojde ke generalizaci.

Navržená metoda byla testována na datech, která dosud nebyla zpracovávána jiným způsobem než běžnou automatickou filtrací. Při interpretaci výsledků navržené metody v porovnání s robustní interpolací s následnou manuální kontrolou je nutné toto mít na paměti, protože robustní interpolace

byla použita na méně hustá data. Na druhou stranu práce se opírá především o porovnání s manuální filtrací, která byla ověřena i v terénu, a tak jsou především tyto výsledky považovány za relevantní.

V úvodu bylo zmíněno několik skupin potenciálních uživatelů podrobného DMR z pískovcových skalních měst a produktů z něj odvozených. Jako poněkud kontroverzní vnímá autorka poskytnutí těchto dat veřejnosti. Ačkoliv by skály (a konečně i data pořízená státními institucemi) měly patřit všem, hrozilo by v této souvislosti skalám i samotným návštěvníkům nebezpečí. Bohužel se nelze plně spolehnout na kladný vztah návštěvníků k přírodě a její ochraně, což se mimochodem projevuje i na turistickém okruhu skalami, a tak by otevření volné cesty směrem k návštěvě i aktuálně zakázaných míst jistě vedlo k devastaci téměř nedotčené přírody. Přecenění vlastních sil by v tomto prostředí navíc mohlo znamenat i vážné ohrožení na životě. Na druhou stranu pokud člověk opravdu chce, vydá se i dnes pod hrozbou pokuty mimo vyznačené cesty a jeho pohyb se bez kvalitních mapových podkladů nebo zkušeného průvodce stává ještě nebezpečnějším. Skály jsou skutečně unikátními útvary, které bychom měli studovat, chránit a navštěvovat s úctou a uvědoměním, jak umí být jejich prostředí drsné, ale i okouzlující a nádherné.

POUŽITÉ ZDROJE

Seznam literatury

- ADAMOVIČ, J.; MIKULÁŠ, R.; CÍLEK, V. 2010. *Atlas pískovcových skalních měst České a Slovenské republiky : Geologie a geomorfologie*. 1. vyd. Praha : Academia, 2010. ISBN 978-80-200-1773-4.
- AOPK, 2018. *Národní přírodní rezervace Adršpašsko-teplické skály* [online]. [cit. 10. 4. 2018]. Dostupné z: <http://www.ochranaprirody.cz/lokality/?idmzchu=1>
- AXELLSON, P. 2000. DEM Generation from Laser Scanner Data Using Adaptive TIN Models. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. XXXIII, Part B4. Amsterdam, 2000.
- BERGER, M. A KOL. 2014. State of the Art in Surface Reconstruction from Point Clouds. *EUROGRAPHICS star reports*. Vol. 1, No. 1. 2014. p. 161-185.
- BERNARDINI, F. A KOL. 1999. The Ball-Pivoting Algorithm for Surface Reconstruction. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. Vol. 5, No. 4. Piscataway, 1999, s. 349 – 359.
- CÍLEK, V. A KOL., 2007. The origin and development of sandstone landforms. In: HÄRTEL, H. A KOL. *Sandstone Landscapes*. 1st ed. Praha : Academia in collaboration with Bohemian Switzerland National Park Administration and Royal Botanic Gardens Kew, 2007. ISBN 978-80-200-1577-8.
- ČAPEK, R. 1973. *Znázorňování skal* [rukopis]. Praha, 1973. Rigorózní práce na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy v Praze.
- DUŠÁNEK, P. 2014. Nové výškopisné mapování České republiky. *Sborník ze Symposia GIS Ostrava 2014 – Geoinformatika v pohybu*. Ostrava, 2014.
- DOLANSKÝ, T. 2004. Lidary a letecké laserové skenování. *Acta Universitatis Purkynianae 99, Studia Geoinformatica*, Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2004. ISBN 80-7044-575-0.
- GRILLI, E.; MENNA, F.; REMONDINO, F. 2017. A Review of Point Clouds Segmentation and Classification Algorithms. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XLII-2/W3. Nafplio, 2017.
- HU, H. A KOL., 2014. An adaptive surface filter for airborne laser scanning point clouds by means of regularization and bending energy. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 92, 2014, s. 98 – 111.
- KAURANNE, T. A KOL., 2017. Airborne Laser Scanning Based Forest Inventory: Comparison of Experimental Results for the Perm Region, Russia and Prior Results from Finland. *Forest*. Vol. 8, No. 72. 2017.
- KAZHDAN, M.; BOLITHO, M.; HOPPE, H. 2006. Poisson Surface Reconstruction. *Eurographics Symposium on Geometry Processing* 2006. s. 61 – 70.
- KRAUS, K.; PFEIFER, N. 1998. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 53, 1998, s. 193 – 203.
- LIM, E. H.; SUTER, D. 2009. 3D terrestrial LIDAR classifications with super-voxels and multi-scale Conditional Random Fields. *Computer-Aided Design* 41, 2009, s. 701 – 710.

- LYSÁK, J. 2011. *Filtrace dat leteckého laserového skenování v pískovcových skalních městech* [rukopis]. Praha, 2011. Seminární práce na Fakultě stavební ČVUT v Praze.
- LYSÁK, J. 2016. *Topografické mapování skalních útvarů s využitím dat leteckého laserového skenování* [rukopis]. Praha, 2016. Dizertační práce na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy.
- MITÁŠ, L.; MITÁŠOVÁ, H. 1988. General Variational Approach to the Interpolation Problem. *Computer and Mathematics with Applications*. Vol. 16, No. 12. 1988, s. 983–992.
- PFEIFER, N.; STADLER, P.; BRIESE, CH. 2001. Derivation of Digital Terrain Models in the SCOP++ Environment. *Proceedings of OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Digital Elevation Models*. Vol. 3612. Stockholm, 2001.
- POLÁKOVÁ, T. 2016. *Využití doplňkových informací o pulsu pro klasifikaci dat LLS v členitém terénu* [rukopis]. Praha, 2016. Diplomová práce na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy.
- rapidlasso GmbH, 2018. *LAStools - efficient LiDAR processing software*. Verze 180209, bez licence. Dostupné z: <https://rapidlasso.com/LAStools>
- SHAN, J.; TOTH, CH. K. 2009. *Topographic Laser Ranging and Scanning : Principles and Processing*. Boca Raton (Florida) : CRC Press, 2009. ISBN 978-1-4200-5142-1.
- SITHOLE, G. 2005. *Segmentation and Classification of Airborne Laser Scanned data* [rukopis]. Delft, 2005. Doktorská práce na Aerospace Engineering Faculty, TU Delft.
- SITHOLE, G.; VOSSSELMAN, G. 2003. Comparison of Filtering Algorithms. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. ISPRS Commission III, Working Group 3. Dresden, 2003.
- STAL, C. A KOL., 2014. Classification of airborne laser scanning point clouds based on binomial logistic regression analysis. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 35, No. 9. 2014, s. 3219 – 3236.
- TOMKOVÁ, M. 2015. *Pískovcová skalní města v GIS* [rukopis]. Praha, 2015. Bakalářská práce na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy.
- TÓVÁRI, D.; PFEIFER, N. 2005. Segmentation Based Robust Interpolation – A New Approach to Laser Data Filtering. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVI-3/W19. Enschede, 2005.
- TROMMLER, M. 2007. *Geodata for the Saxon – Bohemian Switzerland : Cross-border Digital Terrain Models and Digital Ortho Image Mosaic for the National Park Region – Product Information*. Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, University of Technology, Dresden. Version 4-EN.
- VOSSSELMANN, G.; MAAS, H.-G. 2010. *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Dunbeath (Scotland) : Whittles Publishing, 2010. ISBN 978-1904445-87-6.
- XU, S.; OUDE ELBERINK, S.; VOSSSELMAN, G. 2012. Entities and Features for Classification of Airborne Laser Scanning Data in Urban Area. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 1-4, XXII ISPRS Congress, Melbourne, 2012, s. 257 – 262.
- ZÚ; VGHMŮŘ, 2016. *Technická zpráva k digitálnímu modelu reliéfu 5. generace (DMR 5G)*. [cit. 10. 4. 2018]. Dostupné z: http://geoportal.cuzk.cz/Dokumenty/TECHNICKA_ZPRAVA_DMR_5G.pdf

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Seznam obrázků

Obr. 1 – Ukázka rozdílného charakteru terénu ve skalním městě a jeho okolí	7
Obr. 2 – Klasifikace filtračních metod podle počtu zpracovávaných bodů	11
Obr. 3 – Klasifikace filtračních metod podle základního konceptu filtru	11
Obr. 4 – Vztah bodu a trojúhelníkové sítě při výpočtu algoritmu postupného zhušťování TIN. 12	
Obr. 5 – Váhová funkce pro robustní interpolaci.....	13
Obr. 6 – Nedokonalosti bodového mračna z pohledu rekonstrukce povrchu.....	15
Obr. 7 – Rozdílná míra generalizace při rekonstrukci povrchu.....	15
Obr. 8 – Ball-pivoting algoritmus	16
Obr. 9 – Nedostatky bodového mračna v pískovcových skalních městech	18
Obr. 10 – Prostorové rozložení bodů v bodových mračcích	21
Obr. 11 – Vizuální zhodnocení spojeného bodového mračna.....	22
Obr. 12 – Obtížně rozeznatelná skalní věž.....	23
Obr. 13 – Chybějící skalní věž v datech ze standardního skenování	24
Obr. 14 – Porovnání filtrace lasground a manuální.....	24
Obr. 15 – Přehledová mapa lokalit.....	25
Obr. 16 – Baronova vyhlídka	26
Obr. 17 – Osamocená věž v lokalitě Bludiště	27
Obr. 18 – Výhled na Milence z Baronovy vyhlídky	27
Obr. 19 – Lokality na Skalním ostrově a Teplická propast na 3D modelu	28
Obr. 20 – Stěna u Starosty.....	29
Obr. 21 – Teplická propast.....	29
Obr. 22 – Vlčí rokle	31
Obr. 23 – Vlčí vodopád.....	31
Obr. 24 – Profily bodovým mračnem.....	32
Obr. 25 – Tvorba objektů	34
Obr. 26 – Rozložení bodů v zónách objektů	35
Obr. 27 – Rozhodovací strom	37
Obr. 28 – Chybně klasifikované body vegetace.....	40
Obr. 29 – Řezy skalní věží klasifikované do třídy mix	41
Obr. 30 – Odfiltrovaná skalní věž	42
Obr. 31 – Rozdíly DMR v lokalitě Milenci	42

Seznam tabulek

Tab. 1 – Chybová matice klasifikace	37
Tab. 2 – Vzor chybové matice	39
Tab. 3 – Chybová matice porovnávající manuální a navrženou filtraci.....	39
Tab. 4 – Porovnání manuální filtrace s robustní i navrženou filtrací v lokalitě Milenci.....	46
Tab. 5 – Porovnání manuální filtrace s lasground a navrženou filtrací v lokalitě Milenci	47

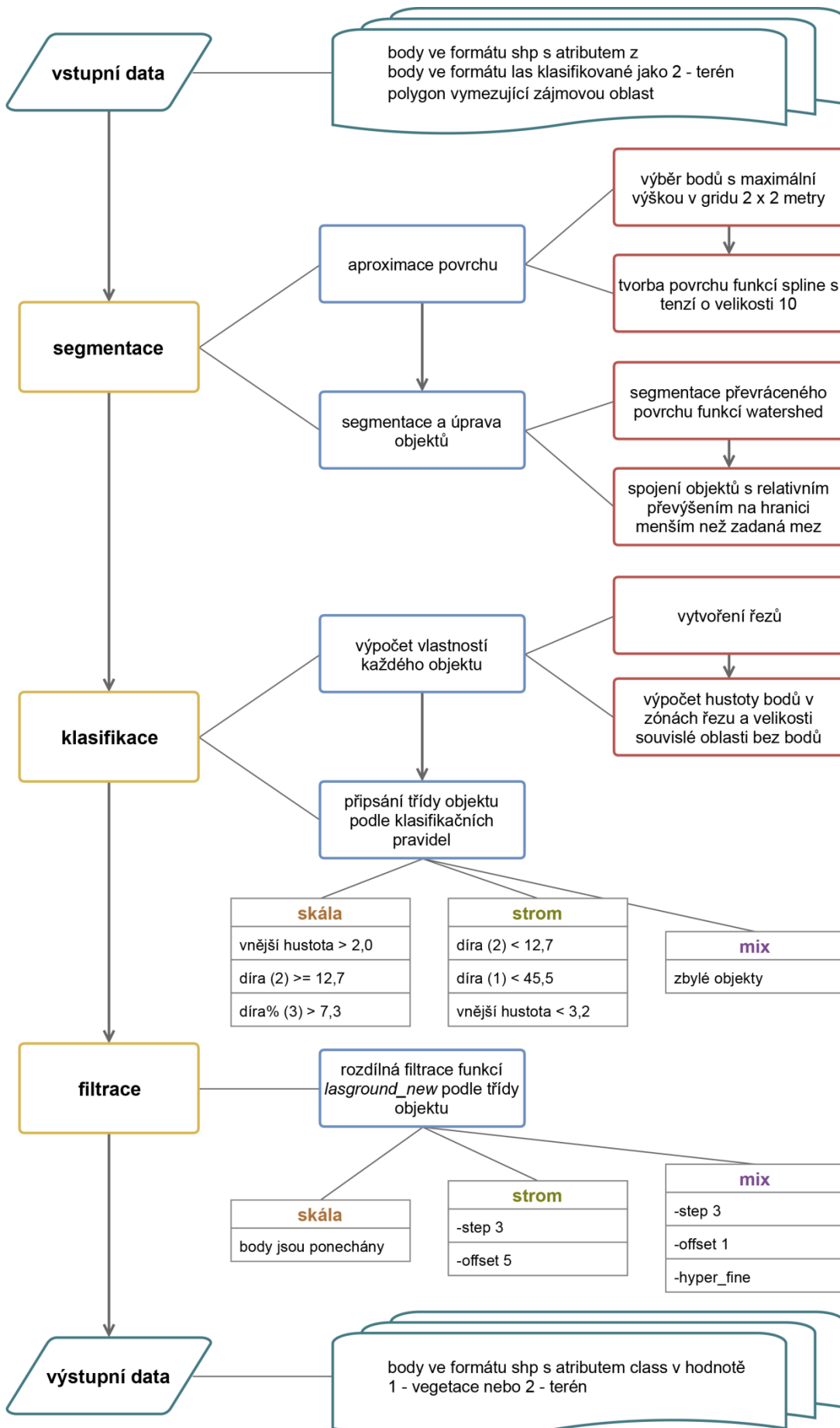
PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK

AOPK	Agentura ochrany přírody a krajiny
ČHS	Český horolezecký svaz
ČÚZK	Český úřad zeměměřický a katastrální
DMR	digitální model reliéfu
DMR 5G	Digitální model reliéfu 5. generace
GeNeSiS	<i>Geoinformation Networks for the cross- border National Park Region of Saxon-Bohemian Switzerland</i>
LLS	letecké laserové skenování
TIN	nepravidelná trojúhelníková síť (<i>triangulated irregular network</i>)
VGHMÚř	Vojenský geografický a hydrometeorologický úřad
ZÚ	Zeměměřický úřad

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Navržená metoda v diagramu	I
Příloha 2 – Skripty	II
Příloha 3 – Porovnání navržené a manuální filtrace za jednotlivé lokality	III
Příloha 4 – Stínované reliéfy v lokalitě Milenci.....	VI
Příloha 5 – Obsah přiloženého CD.....	VII

Příloha 1 – Navržená metoda v diagramu



Příloha 2 – Skripty

01_segmentation.py

- vstup: *points.shp* s atributem *z* (výška bodu), *area.shp*
- vyžaduje: *utils_segmentation.py*
- průběh: Skript vybere nejvyšší body v gridu o velikosti *max_size*. Z těchto bodů je vytvořen rastr pomocí interpolace spline s tenzí (velikost rastru – *spline_size*, velikost tenze – *tension*, počet bodů vstupujících do výpočtu splinu – *number_points*). Dále je vytvořena prvotní segmentace metodou *watershed*. Ta je dále upravena spojováním objektů, jejichž relativní převýšení hranice přesáhne *height*. Nakonec jsou čísla označující objekty připsána k bodům do atributu *obj*.
- výstup: *points_obj.shp* s atributem *obj* (číslo objektu), *poly_obj.shp* s atributem *obj* (číslo objektu)

02_classification.py

- vstup: *points_obj.shp* s atributem *obj* (číslo objektu), *poly_obj.shp* s atributem *obj* (číslo objektu)
- vyžaduje: *utils_classification.py*
- průběh: Nejdříve jsou vypočítány základní údaje o objektu – minimum výšky, maximum výšky, rozsah výšky a počet bodů v objektu. Následně jsou provedeny řezy, u kterých je vypočítána hustota v jednotlivých zónách (*den_in*, *den_out*) a velikost souvislé plochy bez bodů (absolutní – *hole*, relativní – *hole_per*). Nakonec je podle uvedených klasifikačních pravidel rozhodnuto o příslušnosti objektu k třídě skála, strom nebo mix.
- výstup: *poly_obj.shp* s atributem *classR* (třída objektu) a dalšími atributy sloužícími k výpočtu

03_filtration.py

- vstup: *poly_obj.shp* s atributem *classR* (třída objektu), *merged_las.las*
- vyžaduje: *lasclip*, *lasground_new*, *las2shp* z nástrojů LAStools
- průběh: Skript prochází objekt po objektu a pomocí polygonu, který tento objekt definuje, ořízne bodové mračno ve formátu *las*. Záleží na třídě objektu, zda poté dojde k filtraci pomocí funkce *lasground_new* (třída strom a mix) či nikoliv (třída skála). Nakonec jsou filtrované objekty převedeny do formátu *shp* a opět spojeny v jeden soubor.
- výstup: *points_obj_classified.shp* s atributem *class* (1 – neterénní, 2 – terénní bod)

Příloha 3 – Porovnání navržené a manuální filtrace za jednotlivé lokality

manuální filtrace

		terén	vegetace	<i>součet</i>	
<i>navržená filtr.</i>	terén	5 253	622	5 875	89,41%
	vegetace	1 963	9 782	11 745	83,29%
	<i>součet</i>	7 216	10 404	17 620	
		72,80%	94,02%		85,33%

Baronova vyhlídka

manuální filtrace

		terén	vegetace	<i>součet</i>	
<i>navržená filtr.</i>	terén	3 595	563	4 158	86,46%
	vegetace	1 847	4 893	6 740	72,60%
	<i>součet</i>	5 442	5 456	10 898	
		66,06%	89,68%		77,89%

Bludiště – Divoká rokle

manuální filtrace

		terén	vegetace	<i>součet</i>	
<i>navržená filtr.</i>	terén	52 286	2 253	54 539	95,87%
	vegetace	12 751	48 109	60 860	79,05%
	<i>součet</i>	65 037	50 362	115 399	
		80,39%	95,53%		87,00%

Milenci

manuální filtrace

		terén	vegetace	<i>součet</i>	
<i>navržená filtr.</i>	terén	2 970	346	3 316	89,57%
	vegetace	1 289	3 706	4 995	74,19%
	<i>součet</i>	4 259	4 052	8 311	
		69,73%	91,46%		80,33%

Skalní ostrov – jih

manuální filtrace

		terén	vegetace	<i>součet</i>	
navržená filtr.	terén	15 179	1 815	16 994	89,32%
	vegetace	2 295	1 224	3 519	34,78%
	<i>součet</i>	17 474	3 039	20 513	
		86,87%	40,28%		79,96%

Skalní ostrov – sever

manuální filtrace

		terén	vegetace	<i>součet</i>	
navržená filtr.	terén	3 589	724	4 313	83,21%
	vegetace	510	799	1 309	61,04%
	<i>součet</i>	4 099	1 523	5 622	
		87,56%	52,46%		78,05%

Skalní ostrov – střed

manuální filtrace

		terén	vegetace	<i>součet</i>	
navržená filtr.	terén	15 397	1 560	16 957	90,80%
	vegetace	2 717	15 328	18 045	84,94%
	<i>součet</i>	18 114	16 888	35 002	
		85,00%	90,76%		87,78%

Stěna u Starosty

manuální filtrace

		terén	vegetace	<i>součet</i>	
navržená filtr.	terén	7 779	1 286	9 065	85,81%
	vegetace	1 902	2 090	3 992	52,35%
	<i>součet</i>	9 681	3 376	13 057	
		80,35%	61,91%		75,58%

Teplická propast

manuální filtrace

		terén	vegetace	<i>součet</i>	
<i>navržená filtr.</i>	terén	11 289	208	11 497	98,19%
	vegetace	2 590	9 099	11 689	77,84%
	<i>součet</i>	13 879	9 307	23 186	
		81,34%	97,77%		87,93%

Vičí rokle – u rozvodí

manuální filtrace

		terén	vegetace	<i>součet</i>	
<i>navržená filtr.</i>	terén	4 328	324	4 652	93,04%
	vegetace	1 165	9 415	10 580	88,99%
	<i>součet</i>	5 493	9 739	15 232	
		78,79%	96,67%		90,22%

Vičí rokle – ústí Černého příkopu

manuální filtrace

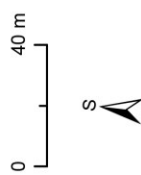
		terén	vegetace	<i>součet</i>	
<i>navržená filtr.</i>	terén	1 399	239	1 638	85,41%
	vegetace	500	2 273	2 773	81,97%
	<i>součet</i>	1 899	2 512	4 411	
		73,67%	90,49%		83,25%

Vičí vodopád

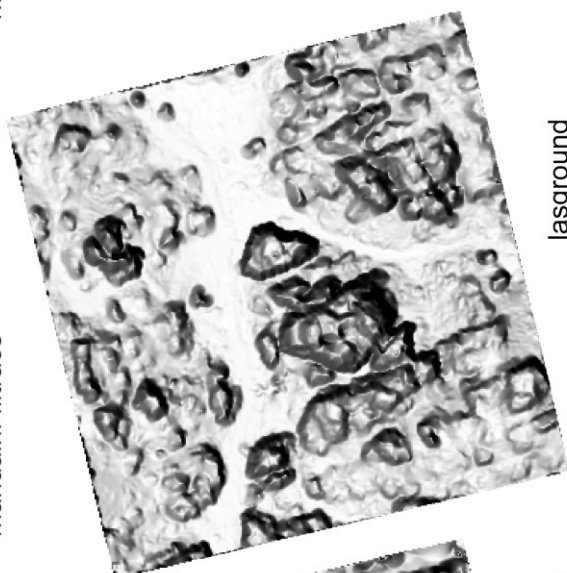
Příloha 4 – Stínované reliéfy v lokalitě Milenci



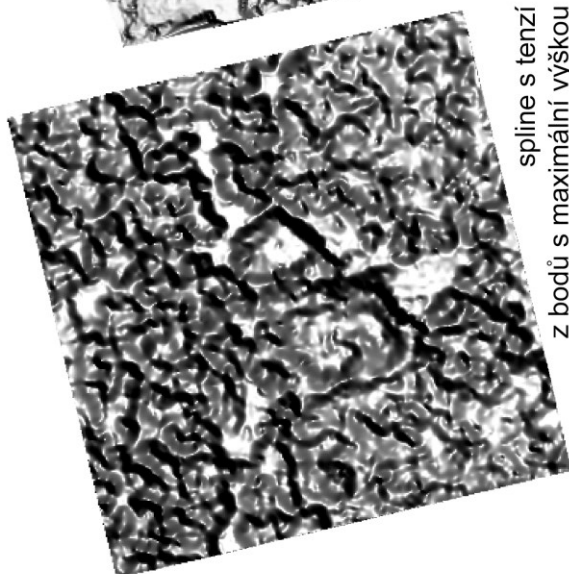
navržená metoda



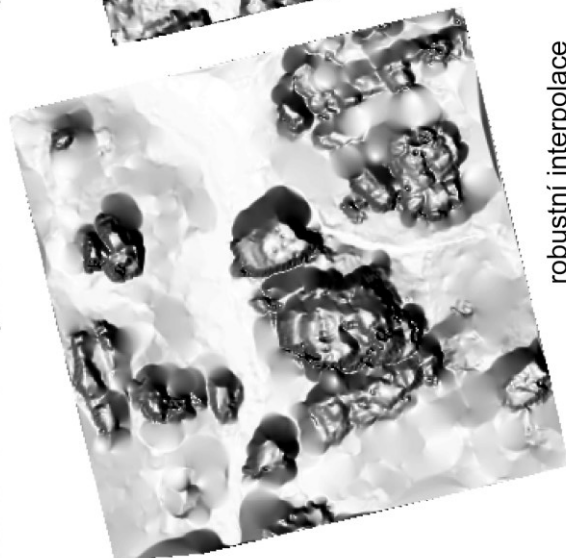
manuální filtrace



lasground



splines s tenzí
z bodů s maximální výškou



robustní interpolace

Příloha 5 – Obsah přiloženého CD

- text práce ve formátu PDF
- složka *skripty_ukazka* obsahující veškeré potřebné skripty a funkce ke spuštění navržené metody a vstupní i výstupní soubory z lokality Milenci
- složka *vysledky* obsahující DMR s velikostí pixelu 0,5 m, vytvořené z TIN interpolací přirozeného souseda v jednotlivých lokalitách