

UNIVERZITA KARLOVA

Přírodovědecká fakulta

Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie

Studijní program: Geografie (navazující magisterské studium)

Studijní obor: Kartografie a geoinformatika



Bc. Kateřina ONDRUŠKOVÁ

DETEKCE PŘEVISŮ Z DAT LETECKÉHO LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ

DETECTION OF OVERHANGS FROM AIRBORNE LASERSCANNING DATA

Diplomová práce

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

Praha 2019

Zadání diplomové práce

pro Bc. Kateřinu Ondruškovou

obor Kartografie a geoinformatika

Název tématu: Detekce převisů z dat leteckého laserového skenování

Zásady pro vypracování

Hlavním cílem diplomové práce je analyzovat možnosti a navrhnout vlastní algoritmus pro detekci převisů z dat leteckého laserového skenování. Práce bude zaměřena zejména na pískovcová skalní města.

Dílčí cíle práce jsou následující:

- popsání a zhodnocení existujících metod pro detekci převisů z dat LLS
- provedení literární rešerše týkající se problematiky zachycení/znázornění převisů v DMR
- navržení vlastní metodiky pro detekci převisů z dat LLS
- implementace navržené metodiky ve formě skriptů pro ArcGIS 10
- testování navrženého postupu nad reálnými daty

Rozsah grafických prací: dle potřeby

Rozsah průvodní zprávy: cca 50 stran

Seznam odborné literatury:

DOLANSKÝ, T. 2004. *Lidary a letecké laserové skenování*. Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně. ISBN 80-7044-575-0.

PACK, R. T.; BLONQUIST, K.; CARTER, B. 2012. Lidar Bare-Earth Modeling Of Overhanging Cliffs – Extending 2.5-D Lidar Classifiers To Handle 3D Surface Classification Problems. In: *Proceedings of ASPRS Annual Conference 2012*, Sacramento, California. 10 p.

PFEIFER, N. 2005. A subdivision algorithm for smooth 3D terrain models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 59, p. 115–127.

RUIZ, A.; KORNUS, W.; TALAYA, J.; COLOMER, J. L. 2004. Terrain modeling in an extremely steep mountain: A combination of airborne and terrestrial lidar. In: *Proceedings of the XXth ISPRS Congress*, Istanbul, Turkey, vol. 35, part B3, p. 281–284.

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

Datum zadání diplomové práce: 18. 1. 2017

Termín odevzdání diplomové práce: květen 2019

Platnost tohoto zadání je po dobu jednoho akademického roku.

.....
Vedoucí diplomové práce

.....
Garant studijního oboru

V Praze dne 27. 11. 2018

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 31. 7. 2019

.....

Bc. Kateřina Ondrušková

Poděkování

Ráda bych tímto poděkovala RNDr. Jakubu Lysákovi, PhD. za odborné vedení mé diplomové práce, veškerý věnovaný čas, cenné rady a připomínky.

Dále bych ráda poděkovala své rodině a přátelům za podporu během celého studia.

Detekce převisů z dat leteckého laserového skenování

Abstrakt

Předmětem této diplomové práce je navrhnout postup zpracování dat leteckého laserového skenování v oblasti převisů pro tvorbu 2,5D digitálních modelů reliéfu. Teoretická část práce obsahuje stručné shrnutí základních principů leteckého laserového skenování. Následuje literární rešerše publikovaných metod řešení zpracovávání dat v oblasti převisů. Závěr teoretické části se věnuje využití leteckého laserového skenování v Česku a využití dat LLS k tvorbě digitálních modelů reliéfu. V praktické části je na základě rešerše literatury navržena vlastní metodika zpracování dat leteckého laserového skenování v oblasti převisů. Navržený algoritmus je následně implementován ve formě skriptu pro ArcGIS 10 a testován nad reálnými daty z oblasti Českého Švýcarska. V závěrečné diskuzi jsou výsledky navržené metody a její implementace kriticky zhodnoceny.

Klíčová slova: převisy, letecké laserové skenování, digitální model terénu

Detection of overhangs from airborne laserscanning data

Abstract

The objective of this thesis is to propose a method of processing airborne laserscanning data that include areas with overhangs with the goal of creating 2,5D digital terrain models. The theoretical part consists of brief introduction of basic principles of airborne laserscanning, followed by research of existing published solutions dealing with the problem of overhangs in airborne laserscanning data. Last section of theoretical part of the thesis deals with the usage of airborne laserscanning data in Czechia and digital terrain models created from those data are introduced.

In practical part of the thesis, own method of processing of ALS data in the areas of overhangs is presented. The designed algorithm is then implemented in a form of script for ArcGIS 10 and the results are tested using real data from Czech Switzerland.

The conclusion focuses on critical evaluation of the suggested method and its implementation.

Keywords: overhangs, airborne laserscanning, digital terrain model

Obsah

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Úvod | 13 |
| 2 | Úvod do laserového skenování..... | 16 |
| 2.1 | Základní principy laserového skenování | 16 |
| 2.2 | Problematika převisů v datech LLS..... | 17 |
| 2.3 | Publikované metody filtrace dat v oblasti převisů..... | 18 |
| 2.3.1 | Metoda rotace bodového mračna..... | 18 |
| 2.3.2 | Kombinace leteckého a pozemního laserového skenování | 20 |
| 2.3.3 | Řešení převisů | 21 |
| 2.4 | Letecké laserové skenování v Česku | 21 |
| 2.4.1 | DMR 4G | 23 |
| 2.4.2 | DMR 5G | 24 |
| 2.4.3 | Hodnocení přesnosti LLS v oblasti skal..... | 25 |
| 3 | Zájmové území a data..... | 28 |
| 3.1 | Zájmové území | 28 |
| 3.2 | Data a jejich předzpracování..... | 29 |
| 4 | Metodika zpracování | 30 |
| 4.1 | Princip navržené metodiky filtrace dat v oblasti převisů..... | 30 |
| 4.2 | Předzpracování dat a vymezení oblasti převisů | 31 |
| 4.3 | Určení parametrů a vytvoření pravidelné sítě..... | 32 |
| 4.4 | Označení bodů ležících pod mediánem výšek buňky | 33 |
| 4.5 | Vytvoření posunuté sítě | 34 |
| 4.6 | Odstranění bodů pod mediánem | 34 |
| 4.7 | Detekce bodů na dně prohlubní | 34 |
| 4.8 | Algoritmizace navržené metody | 35 |

| | | |
|-----|-------------------------------------|----|
| 5 | Výsledky a hodnocení | 37 |
| 5.1 | Testování parametrů algoritmu | 37 |
| 5.2 | Data pro hodnocení přesnosti..... | 39 |
| 5.3 | Hodnocení přesnosti | 41 |
| 6 | Diskuze | 44 |
| 7 | Závěr..... | 49 |
| | Použitá literatura..... | 51 |
| | Seznam příloh..... | 54 |

Přehled použitých zkratk

| | |
|---------------|---|
| Bpv | výškový systém Baltský – po vyrovnání |
| ČÚZK | Český úřad zeměměřický a katastrální |
| DMP 1G | digitální model povrchu 1. generace |
| DMR | digitální model reliéfu |
| DMR 4G | digitální model reliéfu 4. generace |
| DMR 5G | digitální model reliéfu 5. generace |
| LLS | letecké laserové skenování |
| NP | národní park |
| S-JTSK | systém jednotné trigonometrické sítě katastrální |
| SHP | shapefile – datový formát pro ukládání vektorových prostorových dat |
| TIN | <i>triangulated irregular network</i> = nepravidelná trojúhelníková síť |
| UTM | Universal Transverse Mercator |
| WGS 84 | World Geodetic System 1984 |

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obr. 1. Možnosti filtrace bodů a tvorby DMR v oblasti převisu. Zdroj: Lysák (2016), upraveno. | 13 |
| Obr. 2. Špičaté artefakty v TIN vznikající v oblasti převisů, kolmý (nahore a vlevo dole) a šikmý (vpravo dole) pohled na TIN vytvořený z manuálně klasifikovaného bodového mračna dat ZÚ v NP České Švýcarsko, oblast Pravčické brány. Zdroj: vlastní tvorba. | 14 |
| Obr. 3. Princip lidarů. Zdroj: Durrieu (2010). | 16 |
| Obr. 4. Původní strmý povrch (vlevo) a rotovaný povrch (vpravo). Zdroj: Pack, Blonquist a Carter (2012). | 19 |
| Obr. 5. Mezery v datech leteckého skenování (vlevo), vyplnění mezer daty pozemního skenování (vpravo) Zdroj: Ruiz et al. (2004). | 20 |
| Obr. 6. Rozdělení oblasti převisu na horní, strmou a dolní část. Zdroj: Lysák (2016). | 21 |
| Obr. 7. Rozdělení ČR pro LLS. Zdroj: Dušánek (2014). | 22 |
| Obr. 8. Testovací lokalita v oblasti Českého Švýcarska. Zdroj dat: ČÚZK (2019). | 28 |
| Obr. 9. Pravčická brána. Zdroj: archiv autorky. | 29 |
| Obr. 10. Cílový 2,5 D model terénu. Zdroj: Lysák (2016, upraveno). | 30 |
| Obr. 11. Původní TIN (vlevo), výběr trojúhelníků se sklonem větším než 80° a odpovídající body (vpravo). Zdroj: vlastní tvorba. | 32 |
| Obr. 12. Čtvercová síť vytvořená nad zpracovávaným územím. Zdroj: vlastní tvorba. ... | 33 |
| Obr. 13. Původní bodové mračno s označenými body pod mediánem výšek buňky (červeně). Zdroj: vlastní tvorba. | 33 |
| Obr. 14. "Prohlubně" v TIN. Zdroj: vlastní tvorba. | 34 |
| Obr. 15. Body, které pravděpodobně nerepresentují povrch. Zdroj: vlastní tvorba. | 39 |
| Obr. 16. Manuálně klasifikované bodové mračno: 2D pohled (nahore), 3D pohled (vlevo dole) a 2,5D model terénu, vytvořený z vyhovujících bodů (vpravo dole). Zdroj: vlastní tvorba. Legenda: vyhovující body – zeleně, body k vyloučení – červeně. | 40 |
| Obr. 17 Algoritmicky nesprávně odstraněné body (růžově), podklad: TIN vytvořený po manuální klasifikaci. | 41 |
| Obr. 18. Vrstevnice vytvořené z původního TIN (nahore) a z opraveného TIN (dole). Zdroj: vlastní tvorba. | 42 |
| Obr. 19. Výřez stínovaného reliéfu vytvořeného z původního (nahore) a opraveného TIN (dole). Zdroj: vlastní tvorba. | 43 |
| Obr. 20. Průřez skalní branou. Podrobnější vysvětlení v textu. Zdroj: vlastní tvorba. | 46 |

Obr. 21. Mezera mezi dvěma skalními útvary. Podrobnější vysvětlení v textu.
Zdroj: vlastní tvorba. 46

Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| Tab. 1. Parametry skenování LLS ČR. Zdroj: Dušánek (2014, upraveno). | 23 |
| Tab. 2. Porovnání DMR 5G+ a 5G s 3D modelem, vytvořeným z dat pozemního laserového skenování. Zdroj: Paleček a Kubiček (2018)..... | 26 |
| Tab. 3. Určení parametru sklon | 37 |
| Tab. 4. Testované a použité hodnoty parametrů ve skriptu <i>detekce.py</i> | 38 |
| Tab. 5. Chybová matice srovnání výsledků skriptu <i>detekce.py</i> a manuální klasifikace..... | 41 |

1 Úvod

Pro účely topografického mapování je terén většinou reprezentován jako funkce dvou proměnných – jeden bod o souřadnicích (x, y) má právě jednu nadmořskou výšku z . Tento způsob reprezentace terénu se označuje jako 2,5D. Skutečný terén však není vždy funkcí pouze dvou proměnných a například v oblastech jeskyní, převisů či skalních bran 2,5D reprezentace nestačí, jelikož jeden bod může mít pro jednu dvojici souřadnic (x, y) 3 i více souřadnic z (Pfeifer, 2005).

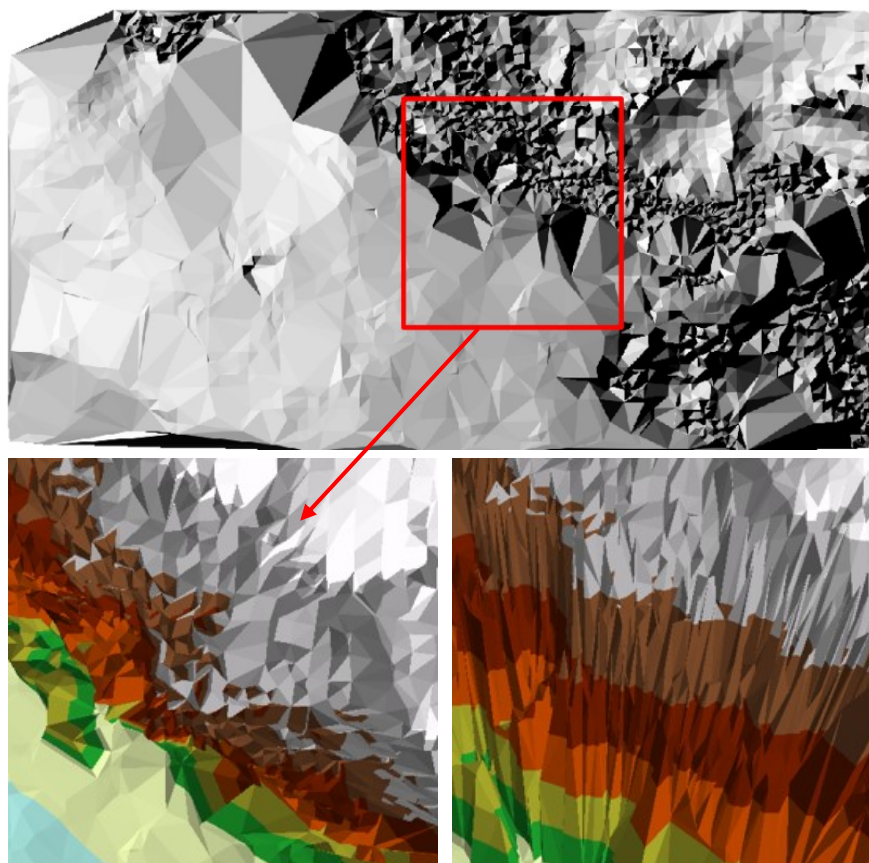
Mapování pomocí moderních technologií, jako je například letecké laserové skenování, je schopné převisy v datech zachytit. Při dalším zpracování dat však mohou nastat problémy. Pro vytvoření DMR je potřeba pořízená data nejdříve filtrovat a získat pouze odrazy pocházející od povrchu. Existuje celá řada filtračních algoritmů, které jsou založeny na principu vyhledávání „odlehklých“ bodů. Tento předpoklad v běžném terénu funguje dobře, v oblastech převisů jsou však body ležící na okraji převisu často označeny jako mimoterénní a dochází tak k odstranění části plošiny (obr. 1, červeně), jelikož jsou tyto body považovány za vegetaci.



Obr. 1. Možnosti filtrace bodů a tvorby DMR v oblasti převisu. Zdroj: Lysák (2016), upraveno.

Aby bylo zabráněno odstranění části plošiny, lze při následné manuální doklasifikaci bodového mračka označit okrajové body jako terénní (obr. 1, modře). Body jsou v tomto

případě sice již správně klasifikovány, při tvorbě DMR však dochází k problémům při použití interpolačních metod, kde výsledný terén přesně prochází měřenými body. V oblasti převisu vznikají tzv. *slope artefacts* (Ruiz et al., 2004) – „špičaté artefakty“ (obr. 2). DMR tedy nereprezentuje skutečný terén. Tyto artefakty vznikají, jelikož body, které se nacházejí polohově blízko sebe (mají podobné souřadnice x a y), jsou výškově velmi vzdálené (body „nad“ a „pod“ převisem).



Obr. 2. Špičaté artefakty v TIN vznikající v oblasti převisů, kolmý (nahore a vlevo dole) a šikmý (vpravo dole) pohled na TIN vytvořený z manuálně klasifikovaného bodového mračna dat ZÚ v NP České Švýcarsko, oblast Pravčické brány. Zdroj: vlastní tvorba.

Hlavním cílem diplomové práce je analyzovat možnosti a navrhnout vlastní algoritmus pro filtraci manuálně klasifikovaných dat leteckého laserového skenování z oblasti převisů, který by vyřešil výše popsané problémy. Algoritmus by měl být schopný zachovat body na okraji plošiny a identifikovat body pod převisem (obr. 1, žlutě), které by při tvorbě výsledného 2,5D modelu reliéfu (obr. 1, zeleně) nebyly uvažovány, a umožnit tak tvorbu přesnějšího DMR.

Samotný text práce lze rozdělit na teoretickou a praktickou část. V úvodu teoretické části je nejdříve přesně definován řešený problém, následuje literární rešerše stávajících

řešení této problematiky a identifikace jejich nedostatků. V závěru teoretické části je charakterizována zájmová lokalita a jsou popsána použitá data.

V praktické části je nejdříve popsána navržená metodika zpracování dat LLS v oblasti převisů, která je následně implementována a testována nad reálnými daty. Dále jsou prezentovány dosažené výsledky. Poslední částí práce je diskuze, kde jsou zhodnoceny výsledky navržené metody, její výhody a nedostatky a návrhy na možná vylepšení.

2 Úvod do laserového skenování

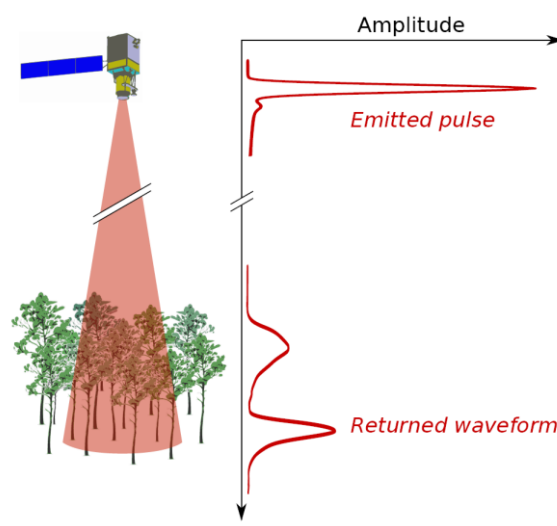
V této kapitole jsou nejprve stručně popsány základní principy laserového skenování. Poté je definován úkol řešený v této diplomové práci, jímž je problematika převisů v datech LLS. Dále jsou shrnuty publikované metody filtrace dat v oblasti převisů. Závěr kapitoly se zabývá využitím leteckého laserového skenování v Česku.

2.1 Základní principy laserového skenování

Standardně používané metody mapování, jako jsou tachymetrie a fotogrammetrie, v některých oblastech nestačí. Například v zalesněných územích je tachymetrie příliš nákladná a fotogrammetrie selhává úplně, jelikož kvůli příliš husté vegetaci není povrch viditelný (Kilian, 1996). Právě v takovýchto oblastech je využití laserového skenování velkým přínosem. Letecké laserové skenování (LLS) je jednou z nejnovějších metod dálkového průzkumu Země. Její vývoj začal v 70. letech 20. století (Ackermann, 1999).

S metodou LLS se můžeme v literatuře setkat také pod názvy ALS (Airborne Laser Scanning) či LiDAR (Light Detection And Ranging) (Dolanský, 2004).

Metoda laserového skenování je bezkontaktní metodou pořizování dat a pracuje na principu výpočtu vzdálenosti mezi skenerem a měřeným objektem (obr. 3). Hlavní částí je laser, který emituje svazek laserových paprsků. Ten je následně odražen zpět a senzorem je zaznamenána doba mezi vysláním svazku paprsků a přijetím jeho odrazu (Oršulák, 2010).



Obr. 3. Princip lidarů. Zdroj: Durrieu (2010).

V závislosti na nosiči skeneru se rozlišuje letecké, pozemní a mobilní skenování. V případě leteckého skenování je skener umístěn na letadle (či bezpilotním letadle), u (statického) pozemního skenování stojí skener na jednom místě a při mobilním (pozemním) skenování

se pohybuje ve vozidle po zemském povrchu (Lysák, 2016). Tato diplomová práce je zaměřena především na využití dat leteckého laserového skenování.

Na letadle je kromě skeneru umístěn i přijímač GNSS (Global Navigation Satellite System – globální družicový polohový systém) zaznamenávající prostorovou polohu skeneru a inerciální měřicí jednotka (IMU), která měří změny náklonu skeneru.

Letecký laserový skener se řadí mezi aktivní digitální senzory. Na rozdíl od pasivních sensorů, které jsou závislé na externím zdroji záření (např. Slunce), umožňuje tedy nepřetržité mapování bez ohledu na nepříznivé podmínky (oblačnost, sněhová pokrývka). Zaznamenaný signál je digitalizován, všechna data jsou tedy primárně v digitální podobě (Morin, 2002).

Hlavní výhodou LLS je možnost pořídit velké množství dat v krátkém časovém úseku a schopnost paprsku proniknout vegetací. Výsledkem LLS je množina bodů o souřadnicích x , y , z , která se nazývá bodové mračno (point cloud). Novější systémy jsou schopny pořídit tzv. full-waveform data, která kromě prostorové informace obsahují také informaci o průběhu navraceného signálu v čase (pořadí odrazu, amplituda/intenzita a šířka odrazu) (Lysák, 2016).

Získané bodové mračno je pro získání informací o terénu dále zpracováváno pomocí automatizovaných funkcí. Hlavními metodami zpracování jsou filtrace a klasifikace.

Při cestě k zemskému povrchu se laserový paprsek může odrážet od různých objektů nad terénem, jako jsou například budovy či vegetace. Pro vytvoření DMR je nutné získat pouze odrazy pocházející od zemského povrchu. Automatizovaný postup rozdělení bodů na terénní a mimoterénní se označuje jako filtrace.

Při klasifikaci jsou body rozděleny do předem předdefinovaných tříd jako je nízká a vysoká vegetace, odrazy od budov apod. (Dolanský, 2004).

2.2 Problematika převisů v datech LLS

Většina existujících algoritmů pro filtraci dat LLS pracuje s cílem vytvořit 2,5D produkty. Při jejich aplikaci na území s velmi strmým terénem či v oblasti téměř vertikálních skalních stěn či převisů tyto filtry mohou dosahovat špatných výsledků. Dochází k tomu z několika důvodů. V lokálním měřítku může být těžké rozlišit například strmé útesy od okraje lesa. V případě převisů může filtr zcela selhat (Pack, Blonquist a Carter, 2012).

Jak bylo již zmíněno v úvodu, celá řada filtračních algoritmů pracuje na principu hledání výškově odlehlých bodů a při jejich použití může dojít k odstranění plošiny nad

převísem, která bývá často významnou terénní hranou. V těchto případech je tedy nutné po automatizované filtraci dat provést manuální editaci bodového mračna a označit body na okraji plošiny jako terénní. Při této manuální editaci sleduje operátor terén v bezprostřední blízkosti bodu a poznat, který bod je pod převísem a který ne, může být obtížně. V datech tak i po manuální editaci zůstávají v oblasti převísů body nacházející se „nad“ i „pod“ převísem. Při následné tvorbě DMR však může docházet ke vzniku „spike artefacts“ (viz kapitola 1, obr. 2).

Problém „spike artefacts“ při automatické filtraci sice nevzniká, ale odstranění bodů na okraji plošiny vede ke ztrátě přesnosti výsledného digitálního modelu reliéfu a z něj odvozovaných informací. Výsledné hodnoty odchylek výšek DMR od skutečnosti mohou být o řád vyšší, než je střední výšková chyba dat LLS. Například při tvorbě DMR z dat LLS v oblasti NP České Švýcarsko dosáhla maximální odchylka od DMR 10,54 m na skalnatém vrchu (Dolanský, 2008).

Cílem této diplomové práce je vyřešit problém „spike artefacts“ při tvorbě DMR z korektně manuálně doklasifikovaného bodového mračna, které obsahuje odrazy od terénu včetně okrajů plošin. Navržený algoritmus by měl nalézt body pod převísem způsobující vznik „spike artefacts“ a vyloučit je při následné tvorbě DMR. Tím se zajistí, že dojde k zachování bodů na okraji plošin, což by mělo vést k výškově přesnějšímu 2,5D modelu povrchu.

2.3 Publikované metody filtrace dat v oblasti převísů

Problematika převísů je ve stávajících pracích řešena většinou pouze okrajově, možnosti rešerše literatury jsou tedy značně omezeny.

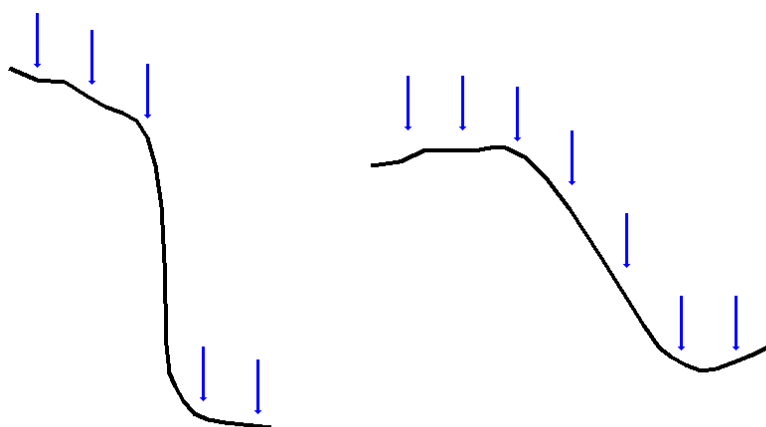
2.3.1 Metoda rotace bodového mračna

Pack, Blonquist a Carter (2012) se rozhodli pokusit adaptovat existující standardní 2,5D filtry a rozšířit je o možnost klasifikovat skutečně 3D povrchy.

Základní myšlenkou metodiky je použití standardních filtrů na rotované bodové mračno. Samotné zpracování dat probíhá v pěti krocích:

1. Nejdříve je provedená klasifikace povrchu pomocí standardního filtračního algoritmu. Výsledná data slouží k zjištění, zda je v daném datasetu dostatek strmých povrchů a bude-li tedy nutné použít navrženou metodiku.

2. Z klasifikovaných dat je vytvořen TIN, který je následně použit k nalezení strmých povrchů. Větší množství trojúhelníků s normálou směřující horizontálně naznačuje přítomnost trojúhelníků, které jsou téměř svislé. Tento krok je nutný při zpracování velkého objemu dat, rozdělených do menších datových souborů (bloků). Je stanovena prahová hodnota pro množství trojúhelníků s větším než daným sklonem. Například za bloky obsahující strmý povrch jsou považovány všechny bloky s více než 1 % trojúhelníků se sklonem větším než 60° . Následně je navrhovaná metodika použita pouze na tyto bloky.
3. V dalším kroku dochází k samotné rotaci bodového mračka. Po rotování svahu se sklonem 90° o 30° vznikne svah se sklonem 60° (obr. 4), který je už možné úspěšně klasifikovat s použitím existujících metod. Pro zpracování strmých povrchů ve všech směrech je mračno rotováno kolem svého těžiště celkem osmkrát (s intervalem 45°). Výsledkem je osm bodových mračen.



Obr. 4. Původní strmý povrch (vlevo) a rotovaný povrch (vpravo).
Zdroj: Pack, Blonquist a Carter (2012).

4. Následně je všech osm vzniklých bodových mračen a původní bodové mračno klasifikováno pomocí standardních filtračních algoritmů.
5. V posledním kroku jsou výsledky klasifikací spojeny do výsledného souboru. Pokud byl bod označen jako terénní aspoň v jednom z klasifikovaných bodových mračen, je označen jako terénní i ve finálním výsledku klasifikace.

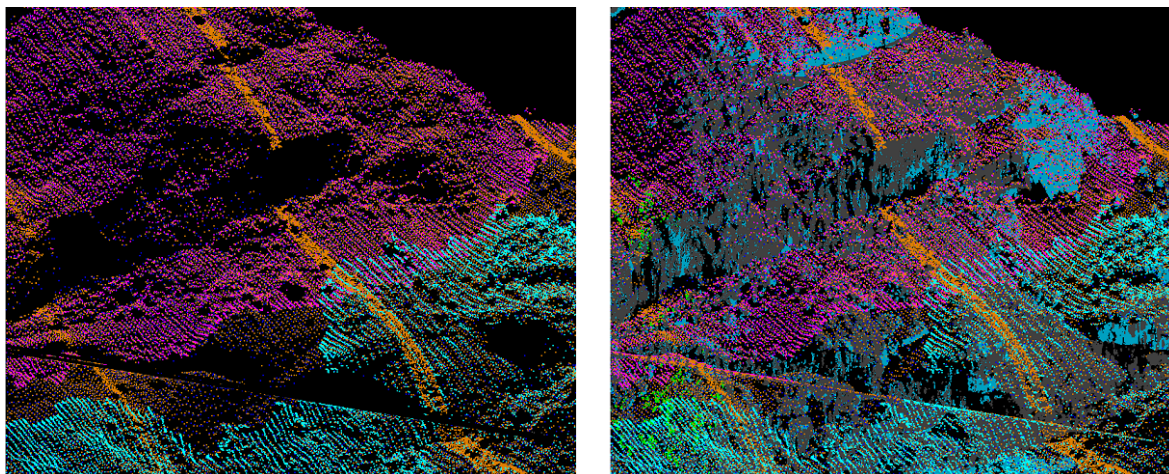
Tento postup řeší správnou klasifikaci bodů v oblasti převisu, ale stejně jako v případě manuální doklasifikace mračka nezabrání vzniku špičatých artefaktů při následné interpolaci.

2.3.2 Kombinace leteckého a pozemního laserového skenování

Modelováním v extrémně strmém terénu se zabývali Ruiz et al. (2004). Zaměřili se zejména na možnosti využití kombinace leteckého a pozemního laserového skenování.

Autoři nejdříve použili software TerraScan k filtraci bodového mračka získaného metodou LLS. Ze vzniklého bodového mračka byl vytvořen 2,5D TIN. Tento model povrchu však není vhodnou reprezentací pro oblast převisů, jelikož jejich přítomnost v datech způsobila vznik tzv. „*spike artefacts*“.

Po automatické filtraci dat muselo dojít k manuální klasifikaci dat, při které byly odstraněny body způsobující „*spike artefacts*“ a body vegetace, chybně klasifikované jako body povrchu. Výsledkem byl model dostatečně reprezentující povrch v rámci omezení 2,5D modelu. Tento model byl použit k nalezení oblastí, kde je hustota bodů získaných pomocí LLS příliš nízká a vznikaly mezery. V těchto místech byla data doplněna o výsledky pozemního laserového skenování (obr. 5).



Obr. 5. Mezery v datech leteckého skenování (vlevo), vyplnění mezer daty pozemního skenování (vpravo)
Zdroj: Ruiz et al. (2004).

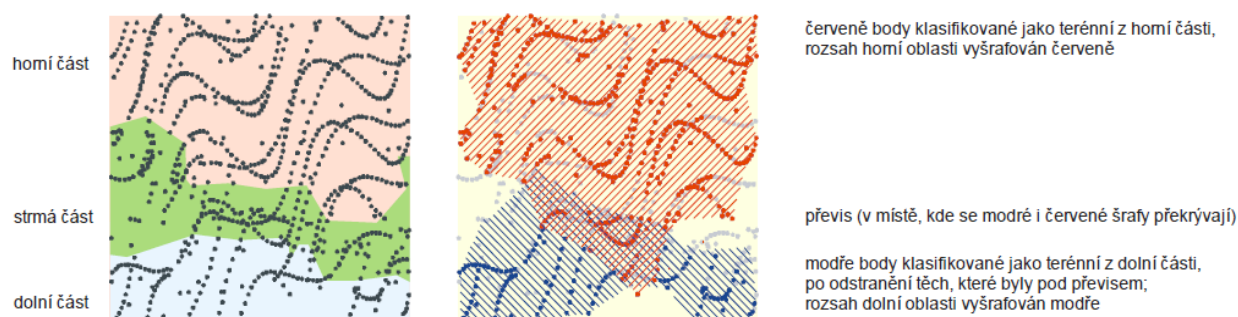
Po koregistraci dat pozemního laserového skenování a dat LLS byla data filtrována. Jelikož data obsahují příliš strmý povrch, nebylo možné použít standardní filtry a musela být aplikována metoda rotace bodového mračka.

Po spojení datasetů pořízených leteckým a pozemním laserovým skenováním vznikl přesnější DMR, než jakého by bylo možné dosáhnout při použití jen jedné z daných metod laserového skenování. Tato metoda je vhodná především pro účely 3D vizualizace.

2.3.3 Řešení převisů

Řešením problému převisů, zachycených v datech LLS, se ve své disertační práci zabýval Lysák (2016) a navrhl postup řešení zpracování dat LLS v oblastech převisů.

Po standardní filtraci dat, která odstraní body z okrajů plošin, je vytvořen digitální model terénu ve formě TIN. Dále jsou nalezeny trojúhelníky se sklonem větším, než je zvolená mezní hodnota, která je dána hustotou mračna. Tyto trojúhelníky jsou sjednoceny a vzniknou tak strmé části zahrnující potenciální oblast výskytu převisu. Následně se území zpracovává po částech s předpokladem, že převis rozděluje část na dvě oddělené oblasti – horní a dolní (obr. 6). Tyto oblasti se dají vymezit například porovnáním mediánu výšek bodů v dané oblasti. Problém nastává v oblasti převisu, kde jsou při pohledu shora body z dolní a horní oblasti smíchány (obr. 6, zeleně).



Obr. 6. Rozdělení oblasti převisu na horní, strmou a dolní část. Zdroj: Lysák (2016).

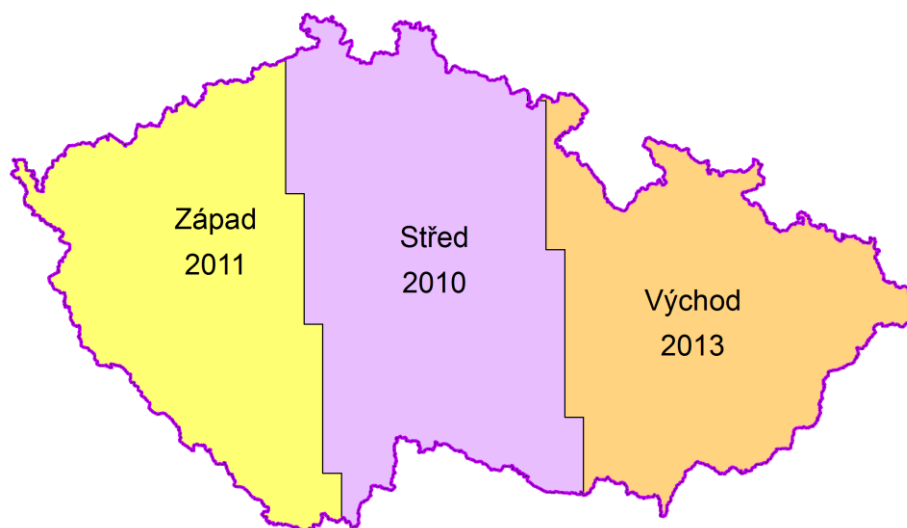
Následují dvě filtrace, po jejichž provedení se dolní a horní oblast rozšíří o body z oblasti převisu. O bodech z oblasti převisu je tedy po filtracích známo, jestli se nachází v dolní či horní oblasti. Při tvorbě 2,5D modelu reliéfu pak body z dolní oblasti, které se nacházejí v oblasti průniku (obr. 6, místa, kde se modré i červené šrafovy překrývají), nebudou uvažovány. Dojde také k zachování bodů na okraji plošiny, které byly při standardní filtraci označeny jako mimoterénní. Právě z tohoto návrhu vychází metodika této diplomové práce.

2.4 Letecké laserové skenování v Česku

Dosavadní celoplošný digitální výškový model ČR vznikal v letech 1995 až 2000 digitalizací vrstevnic s intervalem 2 nebo 5 m podle Základní mapy ČR 1 : 10 000 (Dušánek, 2014). Ačkoli byl model aktualizován a byly opravovány hrubé chyby, celková přesnost, charakterizovaná střední výškovou chybou $m_H = 0,7-1,5$ m v odkrytém terénu, 1–2 m v intravilánech a 2–5 m v zalesněném území, se nijak nezvýšila (Šíma, 2011) a nebyla pro potřeby státní správy a územní správy dostačující.

Za účelem vytvoření přesnějšího výškového modelu byl v roce 2008 zpracován Projekt tvorby nového výškopisu. Podíleli se na něm ČÚZK, Ministerstvo obrany ČR a Ministerstvo zemědělství ČR. Metodou pořizování dat bylo zvoleno letecké laserové skenování pro svou technickou i nákladovou efektivitu. Výslednými produkty jsou *Digitální model reliéfu 4. generace* (DMR 4G), *Digitální model reliéfu 5. generace* (DMR 5G) a *Digitální model povrchu 1. generace* (DMP 1G).

Pořizování dat probíhalo v letech 2010 až 2013 a pro jeho účely bylo území ČR rozděleno do tří oblastí (obr. 7). Skenování pásma „Střed“ se uskutečnilo v období od 22. března do 10. října 2010, skenování pásma „Západ“ v období od 9. března do 27. června 2012 a skenování pásma „Východ“ v období od 8. dubna 2013 do 11. listopadu 2013 (Brázdil, 2016a).



Obr. 7. Rozdělení ČR pro LLS. Zdroj: Dušánek (2014).

Každé z pásem bylo dále rozděleno do náletových bloků. Tyto bloky byly 10 km široké a jejich délka byla 10, 20 nebo 30 km v závislosti na výškové členitosti georeliéfu. Pro každý z bloků byly připraveny dva projekty pořizování dat: jeden v jarním období (do 30. 4.) a jeden ve vegetačním období (od 1. 5.) s využitím rozdílných parametrů skenování (tab. 1). Ve vegetačním období bylo pro zajištění lepší prostupnosti laserových paprsků mapováno území z nižší výšky a byla snížena frekvence laserových pulsů (Dušánek, 2014).

Tab. 1. Parametry skenování LLS ČR. Zdroj: Dušánek (2014, upraveno).

| Parametr | Jarní období | Vegetační období |
|---------------------------------------|--------------|------------------|
| Střední výška letu nad terénem | 1 400 m | 1 200 m |
| Počet podélných os | 12 | 14 |
| Vzdálenost podélných os | 830 m | 715 m |
| Příčný překryt pásů | 50 % | 50 % |
| Frekvence laserových pulsů | 120 kHz | 80 kHz |

Ke skenování byl použit systém Litemapper 6 800, který se sestával z leteckého laserového skeneru RIEGL LMS Q-680, palubní aparatury GPS Nova Tel, záznamového zařízení a inerciální měřické jednotky (Šíma, 2011). Mapování se provádělo ze střední výšky maximálně 1 500 m nad terénem s překrytem sousedních skenovaných pásů 40–50 % (Brázdil, 2009).

Z dat pořízených skenerem bylo vytvořeno bodové mračno, které bylo následně georeferencováno do geodetického referenčního systému WGS 84/UTM a výškového systému Bpv (Šíma, 2011).

Získaná bodová mračna prošla automatizovanou robustní filtrací za využití softwaru SCOP++ a poté byla manuálně kontrolována a editována. Úspěšnost robustní filtrace závisela na ročním období, data pořízená v březnu až květnu (období bez rozvinuté vegetace) dosahovala 90% úspěšnosti filtrace, v oblastech skenovaných v červnu až září byla úspěšnost 30–40 % (Brázdil et al., 2016a).

2.4.1 DMR 4G

Text následující kapitoly vychází z Technické zprávy k DMR 4G (Brázdil et al., 2016a).

Jelikož výsledkem robustní filtrace nejsou pouze body reliéfu, pro generování DMR 4G bylo nutné provést výběr uzlových bodů. U těchto bodů se s maximální pravděpodobností předpokládá, že správně reprezentují terénní reliéf. Jednotlivé oblasti jsou rozděleny do čtverců 5×5 m a jako uzlový bod je vybrán bod s nejnižší výškou. Vybraný uzlový bod ale také musí splňovat podmínku, že se svou výškou extrémně neodlišuje od okolních bodů. Z takto vybraných uzlových bodů byl vygenerován model reliéfu, který byl dále vizuálně kontrolován, a nalezené chyby byly odstraněny. Poté byly souřadnice uzlových bodů transformovány do souřadnicového systému S-JTSK. Následně byl výškový model za

použití metody adaptabilní lineární predikce interpolován z nepravidelné sítě uzlových bodů do pravidelné čtvercové sítě bodů o rozměrech 5×5 m.

Datová sada DMR 4G pro území celé ČR byla dokončena 1. 2. 2014. Výsledný DMR 4G reprezentuje terénní reliéf včetně skalních útvarů. Jelikož se jedná o model typu čtvercové sítě 5×5 m, byla nutná jeho generalizace. V některých oblastech, jako jsou například skalní útvary půdorysně menší než 5 metrů, převisy, strmé svahy či výrazné vertikální zlomy, může docházet až k několikametrovým výškovým chybám. Model tedy nemůže korektně vystihnout lokální terénní anomálie a hrany.

Garantovaná úplná střední chyba výšky, která je 0,3 m v terénu bez souvislé vegetace a zástavby a 1 m v terénu hustě pokrytém vegetací, je v DMR 4G dosažena.

Hlavním účelem vytvoření DMR 4G bylo získání zdroje informací o terénním reliéfu pro účely ortogonalizace leteckých měřicích snímků.

2.4.2 DMR 5G

Podle Technické zprávy k DMR 5G (Brázdil et al., 2016b) bylo po manuální kontrole bodových mračen po robustní filtraci nutné následně odstranit nepodstatné terénní nerovnosti. To bylo řešeno generalizací modelu výběrem uzlových bodů v síti 1×1 m (viz kapitola 2.4.1). Výsledkem bylo bodové mračno nerovnoměrně rozložených skutečně měřených bodů terénního reliéfu.

Následně byla provedena interpolace v oblastech neobsahujících naměřená data, jako jsou například vodní plochy, plochy pod budovami nebo v některých oblastech s hustou vegetací. Bylo využito interpolačního algoritmu Fill-Void Areas, který vytvořil umělé body interpolací z nepravidelné sítě okolních blízkých výškových bodů reliéfu. Pro plošnou interpolaci byla použita adaptabilní lineární predikce. Z těchto dat byl vytvořen DMR 5G+.

Jelikož by vzniklý model mohl být příliš detailní a zatížený drobnými chybami v důsledku nízké vegetace, následovalo ředění bodů metodou „hoblování“ s využitím softwaru Atlas DMT při zachování maximální úplné výškové chyby. Došlo k odstranění nadbytečných bodů a také k úpravě výšky bodů (max. o 0,16 m). Nakonec byla testována absolutní výšková přesnost a odstraněna systematická složka chyby měření, která byla -0,034 m, a souřadnice jednotlivých výškových bodů byly transformovány do souřadnicového systému JTSK.

Datová sada DMR 5G pro území celé ČR byla dokončena k 30. 6. 2016. Následně byla ověřována přesnost a kvalita výsledného DMR 5G. Garantovaná úplná střední chyba

výšky, která je 0,18 m v terénu bez souvislé vegetace a zástavby a 0,3 m v terénu hustě pokrytém vegetací, je v DMR 5G dosažena. Neplatí to ale obecně pro všechny druhy povrchu. Na základě ověření přesnosti kontrolním geodetickým měřením v terénu bylo zjištěno, že v některých oblastech, jako jsou terénní hrany u komunikací, dochází k systematické chybě -0,11 m a maximální výškové chybě až 0,66 m. Výraznější výškové chyby se také mohou nacházet v místech, kde byly body uměle vytvořeny interpolací, jako například v oblastech s velmi hustou vegetací.

2.4.3 Hodnocení přesnosti LLS v oblasti skal

Hodnocením přesnosti LLS ve skalách se zabýval Dolanský, 2008. Zájmovým územím byla oblast Česko-Saského Švýcarska. Použitá data LLS byla pořízena v rámci projektu GeNeSiS a zpracovávána v rámci projektu SISTEMaPARC. V té době se jednalo o jednu z mála oblastí, kde bylo v Česku provedeno velkoplošné letecké laserové skenování.

Ke skenování byl použit skener TopoSys. Pořízená data byla filtrována na TU v Drážďanech a následně z nich byl vytvořen digitální model terénu. Pro správné georeferencování bylo geodetickým měřením zaměřeno 40 kontrolních bodů. Pro kontrolu přesnosti filtrace bylo podrobně tachymetricky zaměřeno území o několika desítkách čtverečních metrů v deseti lokalitách. Na základě těchto kontrolních měření byla stanovena střední kvadratická chyba výsledného terénu $\pm 0,16$ m, ve skalnatých oblastech dosahovala však až 4 m.

Dolanský provedl přesnější kontrolu přesnosti s využitím většího souboru kontrolních bodů, měřených na specifických místech. Využil k tomu body bodového pole ležící na povrchu terénu, jejichž geodetické souřadnice jsou již zaměřeny a jsou volně dostupné. Na území NP České Švýcarsko bylo testováno 74 bodů. Největší odchylka byla zjištěna 10,54 m na skalnatém vrchu mezi Meznou a Vysokou Lípou. Většina bodů splňovala uvedenou střední kvadratickou chybu, u devíti bodů byla však odchylka větší než dvojnásobek stanovené střední kvadratické chyby (odchylka větší než 0,32 m).

Výsledky tedy ukazují, že daný DMR odpovídá udané přesnosti, v oblasti skalních měst však může být odchylka i 10 m. V těchto oblastech je tedy nutné model opravit.

Hodnocením přesnosti LLS se zabývali také Paleček a Kubíček (2018). Hlavními cíli studie bylo identifikovat lokality se skalními útvary z DMR 5G+, zhodnotit v těchto oblastech přesnost DMR 5G a DMR 5G+ a posoudit přesnost získaných poznatků pomocí vytvoření 3D modelu skalního útvaru.

Pro účely zjišťování přesnosti DMR 5G+ a 5G byla vybrána skalní formace Bílá skála v oblasti CHKO Žďárské vrchy. Byl vytvořen 3D model tohoto skalního útvaru z dat získaných pomocí pozemního laserového skenování. K určení přesnosti DMR byly použity tři metody. První metodou bylo zjišťování rozdílu objemu dané skalní formace v DMR a 3D modelu. Druhou metodou byla ortogonální projekce skalní formace do plochy mapy. Poslední metodou bylo porovnávání celkové vzdálenosti bodového mračka tvořící DMR od sousedících bodů v 3D modelu.

Následovalo porovnávání DMR 5G+ a 5G v oblasti skalního útvaru Bílá skála. Bodové mračko pro vytvoření DMR 5G+ má větší průměrnou hustotu bodů, jelikož bodové mračko pro vytvoření DMR 5G vzniklo jeho hoblováním a zředěním (viz kapitola 2.4.2). Vertikální rozdíl obou modelů ukázal, že v západní a jihozápadní části skalní lokality byl 5G DMR až o 6 metrů níže než DMR 5G+, zatímco zbytek území je průměrně 0 až 2 metry nad referenčním (5G+) modelem. Chyba v jihozápadní části území byla způsobena stěnou s mírným převisem. Dále byly oba modely vytvořené z dat LLS srovnány s 3D modelem, vytvořeným z dat pozemního laserového skenování. Výsledky tohoto srovnání jsou v tabulce 2.

Tab. 2. Porovnání DMR 5G+ a 5G s 3D modelem, vytvořeným z dat pozemního laserového skenování. Zdroj: Paleček a Kubíček (2018).

| Elevation model | Mean Vertical Difference [m] | Standard Deviation [m] | Maximum Vertical Difference [m] | Minimum Vertical Difference [m] |
|------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|--|--|
| DMR 5G | -3,26 | 5,61 | 10,21 | -20,96 |
| DMR 5G+ | -0,82 | 3,59 | 21,13 | -20,93 |

Výsledkem studie bylo zjištění, že současná kvalita DMR 5G v oblastech skalních útvarů má jisté nedostatky. Výškový rozdíl pro vrcholy skalních útvarů dosahoval až 3,26 m. Bylo zjištěno, že současná průměrná hustota bodů není dostačující. Minimální hustota bodového mračka by měla být 10 bodů/m² a skenování oblasti by mělo probíhat z několika směrů.

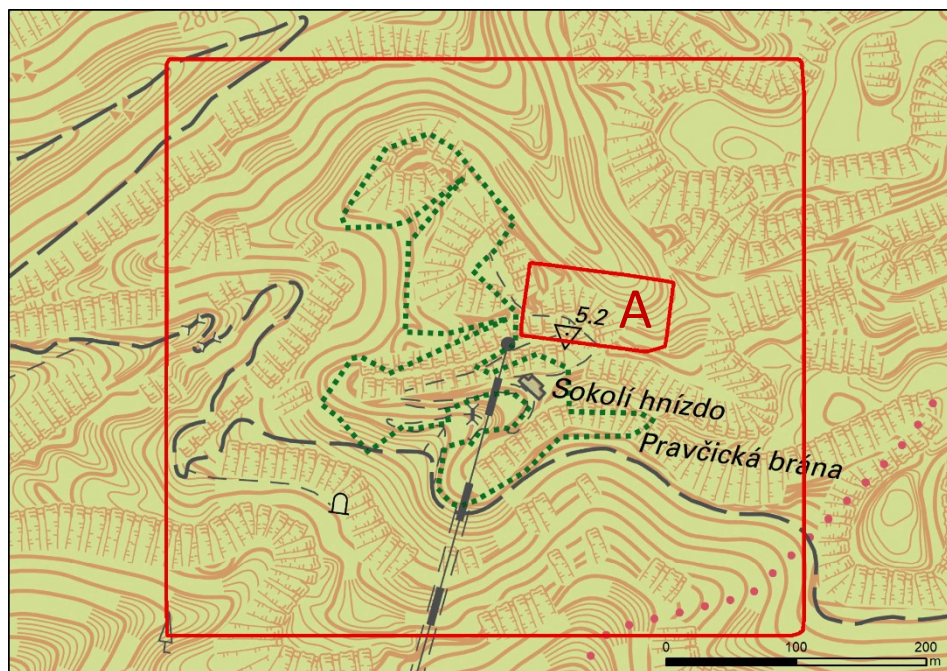
Ale ani větší hustota bodů by nevyřešila problémy v oblasti převisů, pro jejichž mapování autoři navrhuji použít jiné metody, jako je například pozemní laserové skenování.

3 Zájmové území a data

Diplomová práce je zaměřena na detekci převisů. Z tohoto důvodu byla jako zájmové území vybrána oblast obsahující pískovcová skalní města.

3.1 Zájmové území

Zájmové území se nachází v NP České Švýcarsko v oblasti Pravčické brány, má rozlohu přibližně 21,7 ha.



Obr. 8. Testovací lokalita v oblasti Českého Švýcarska. Zdroj dat: ČÚZK (2019).

Národní park České Švýcarsko má rozlohu přibližně 80 km². Nachází se v okrese Děčín a přiléhá ke státní hranici s Německem, kde na něj navazuje NP Saské Švýcarsko.

Celá oblast národního parku představuje reprezentativní ukázkou pískovcového fenoménu České křídové pánve, tj. typického reliéfu kvádrových pískovců a na něj vázaných specifických ekologických podmínek (NP České Švýcarsko, 200-?).

Současný reliéf se začal formovat na konci druhohor. Na dně křídového moře se postupně uložily sedimenty o mocnosti až 1 000 metrů. Po ústupu křídového moře došlo k zahájení procesu postupného rozrušování a odnášení mořských usazenin. K velkým změnám reliéfu došlo na konci třetihor vlivem alpinského vrásnění a střídání dob ledových a meziledových v období čtvrtohor. Tyto procesy podmínily intenzivní hloubkovou říční erozi a odnos méně zpevněných poloh pískovců. Měly za následek vznik charakteristických

forem skalního reliéfu, jako jsou například rozsáhlá skalní města, stolové hory, kužely či kaňony řek Labe, Kamenice a Křinice (AOPK ČR, 200-?).

Symbolem NP České Švýcarsko je Pravčická brána (obr. 9). Jedná se o největší skalní bránu v Evropě se skalním mostem 21 m dlouhým, 7–8 m širokým a 16 m vysokým (Demek, 2006). Vznikla boční erozí v úzkém pískovcovém ostrohu.



Obr. 9. Pravčická brána. Zdroj: archiv autorky.

3.2 Data a jejich předzpracování

Pro účely této diplomové práce byla poskytnuta data LLS pořízená v rámci Projektu tvorby nového výškopisu ČR (viz kapitola 2.4). Jedná se o data po manuální kontrole, představující odrazy pocházející od terénu, z nichž byl následně vytvořen DMR 5G+.

Bodově mračno pokrývající celé zájmové území (obr. 8) obsahovalo 69 694 bodů s průměrnou hustotou 3,14 bodů/m². Pro účely navrhování algoritmu byl vytvořen výřez z tohoto bodového mračna, na kterém bylo odladěno nastavení parametrů algoritmu a průběžně testovány jeho výsledky. Tento výřez (obr. 8, A), nacházející se severovýchodně od restaurace Sokolí hnízdo, obsahoval 3 622 bodů s průměrnou hustotou bodového mračna 1,75 bodu/m².

4 Metodika zpracování

V následující kapitole je popsána praktická část této diplomové práce. Hlavním cílem práce je navržení vlastního způsobu zpracování dat, ve kterých jsou zachyceny oblasti převisů tak, aby z nich bylo možné vytvořit 2,5D model terénu, který se bude v oblasti převisů (v rámci možností 2,5D zobrazení) co nejvíce podobat skutečnosti (obr. 10, zeleně). Při použití automatizované filtrace může dojít k odstranění části plošiny (obr 10, červeně), ta ale bývá často výraznou terénní hranou a její odstranění má za následek snížení přesnosti výsledného 2,5D DMR a z něj odvozených produktů.

Nejdříve je popsán princip navržené metody a její shrnutí v několika krocích. Tyto kroky jsou podrobněji popsány v několika podkapitolách. Závěr kapitoly se věnuje praktické implementaci navrženého postupu s využitím skriptovacího jazyka Python.



Obr. 10. Cílový 2,5 D model terénu. Zdroj: Lysák (2016, upraveno).

4.1 Princip navržené metodiky filtrace dat v oblasti převisů

Hlavním cílem metody je nalézt body „pod“ převisem, které způsobují vznik tzv. „spike artefacts“ (obr. 10, modře) a zároveň zachovat body na okraji plošiny, které bývají při použití standardních filtračních metod odstraněny.

Nejprve je z bodového mračna vytvořen DMR ve formě TIN. Následně dochází k vymezení potenciálních oblastí převisů vybráním trojúhelníků se sklonem větším, než je určená mez. Poté jsou takto určené oblasti zpracovávány po částech. Při výběru bodů pod převisem je kladen důraz na to, aby zároveň nedošlo k odstranění bodů na okrajích plošin a aby byly také zachovány body na úpatích skalních stěn.

Postup pro zpracování bodového mračna, obsahující oblasti převisů, lze rozdělit do několika kroků:

1. předzpracování dat a vymezení oblasti převisů
2. určení parametrů a vytvoření pravidelné sítě
3. výpočet mediánu výšek v buňkách sítě
4. označení bodů ležících pod mediánem výšek buňky
5. vytvoření posunuté sítě a opakování kroků 3 a 4
6. odstranění bodů, které byly označeny jako pod mediánem v obou sítích
7. detekce bodů na dně prohlubní

Vstupním souborem pro algoritmus je filtrované 3D bodové mračno, představující odrazy pocházející od terénu, včetně bodů na okraji plošiny a bodů pod převisem.

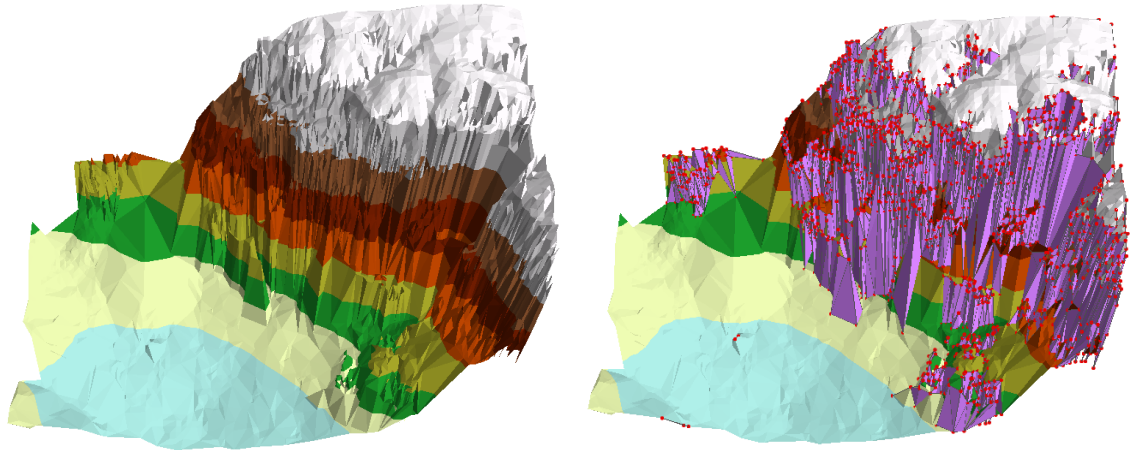
Výsledkem algoritmu jsou dvě vrstvy bodů. Jedna vrstva obsahuje body, které jsou vhodné pro vytvoření 2,5D modelu terénu. Body druhé vrstvy nesplňují požadavky na jeho vytvoření (viz kapitola 1) a při následné tvorbě 2,5D modelu terénu je tedy vhodné je vyloučit.

Jednotlivé kroky jsou podrobněji popsány v následujících podkapitolách.

4.2 Předzpracování dat a vymezení oblasti převisů

Vstupním souborem pro navržený algoritmus je filtrované 3D bodové mračno, představující odrazy pocházející od terénu. Z něho je vytvořen DMR ve formě TIN, který je následně převeden na jednotlivé trojúhelníky.

Na okrajích TIN, v místech, kde nejsou data, vznikají trojúhelníky se sklonem téměř 90°, které nerepresentují skutečný terén. Ty jsou před dalším zpracováním odstraněny. Následně jsou vybrány trojúhelníky, které mají větší sklon, než je zvolená mez (např. 80°). Tyto trojúhelníky jsou sjednoceny a představují oblast potenciálního výskytu převisů. Do další části algoritmu vstupují pouze body, nacházející se v těchto oblastech.



Obr. 11. Původní TIN (vlevo), výběr trojúhelníků se sklonem větším než 80° a odpovídající body (vpravo). Zdroj: vlastní tvorba.

4.3 Určení parametrů a vytvoření pravidelné sítě

Další zpracování bodů v oblastech vybraných v předchozím kroku probíhá po částech. K rozdělení území na tyto části je využita pravidelná čtvercová síť. Před vytvořením této sítě je nutné vypočítat určité parametry.

Prvním parametrem je velikost buňky sítě ($cs = \text{cell size}$). Ta je stanovena na základě hustoty bodového mračka tak, aby se průměrně v jedné buňce sítě nacházel určitý počet bodů N . Hodnota N by měla být zvolena tak, aby byl medián dostatečně robustní statistikou. Při testování algoritmu byla použita hodnota $N = 10$. Hustota bodového mračka ($PD = \text{point density}$) je vypočtena jako poměr rozlohy daného území a celkového počtu bodů. Vzorec na výpočet velikosti buňky sítě byl tedy odvozen jako:

$$cs = \sqrt{\frac{N}{PD}}$$

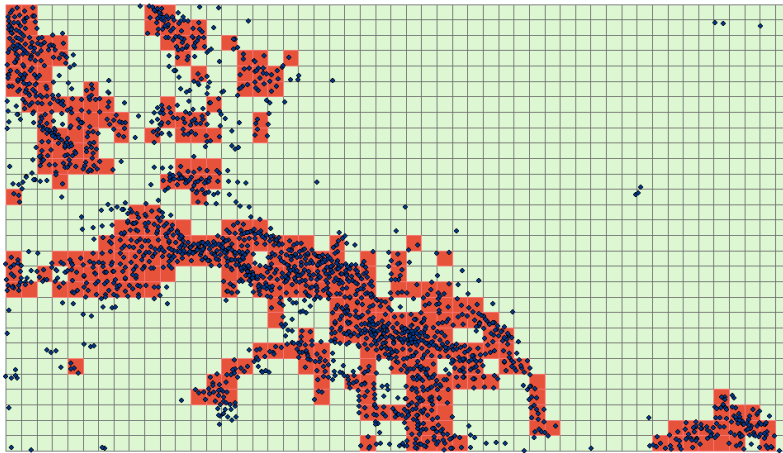
Dalšími parametry, nutnými pro vytvoření sítě, je počet řádků a sloupců, které budou síť tvořit. Ty lze snadno získat vydělením šířky a délky zpracovaného území velikostí buňky cs , která byla vypočítána podle vzorce výše.

Takto vypočítané parametry jsou použity k vytvoření pravidelné čtvercové sítě (obr. 12), která pokrývá celé zpracovávané území. Vytvořená síť rozděluje bodové mračno do menších celků, které jsou dále samostatně zpracovávány.

V každé buňce je následně spočítán výškový rozsah bodů $r (= \text{range})$. Předpokládá se, že pokud je výškový rozdíl v buňce malý, nenachází se v ní body „nad“ i „pod“ převisem a nemusí být tedy nadále zpracována. Pokud je výškový rozsah větší než stanovená mez, předpokládá se, že se v buňce nachází skalní stěna (a potenciální převis) a je tedy nutné tuto

oblast dále zpracovat (obr. 12, červeně). Aby bylo zajištěno, že je v buňce dostatečný sklon terénu, byl pro výpočet meze experimentálně určen vztah:

$$r = cs \cdot 2$$

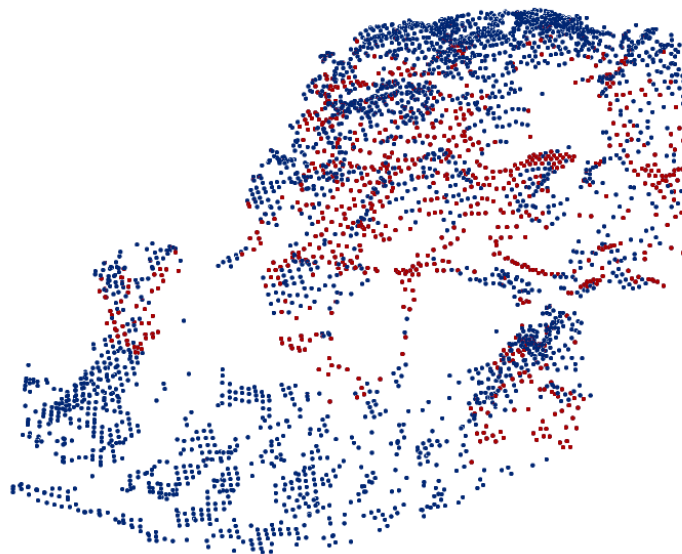


Obr. 12. Čtvercová síť vytvořená nad zpracovávaným územím.
Zdroj: vlastní tvorba.

4.4 Označení bodů ležících pod mediánem výšek buňky

V buňkách, které splňují podmínku rozsahu, je následně vypočítána hodnota mediánu výšek bodů. Pokud je hodnota výšky bodu menší než medián výšek buňky, je bod označen jako potenciální kandidát na odstranění v dalších krocích (obr. 13, červeně).

Použitím odstraňování pouze bodů pod mediánem výšek buňky je splněn jeden z hlavních požadavků na navrhovaný algoritmus – zachování bodů na okrajích skalních plošin, které bývají standardními filtračními metodami odstraňovány.



Obr. 13. Původní bodové mračno s označenými body pod mediánem výšek buňky (červeně).
Zdroj: vlastní tvorba.

4.5 Vytvoření posunuté sítě

Pokud by byly odstraněny všechny body pod mediánem výšek buňky, které byly označeny v předcházejícím kroku, mohlo by dojít k odstranění nejen bodů pod převisem, ale také bodů na patě stěny. Aby tomu bylo zabráněno, je celé území zpracováno dvakrát. Druhá síť je posunuta o polovinu velikosti buňky sítě ve směru vodorovné i svislé osy. Dále je opakován celý postup zjištění výškového rozsahu v buňce a spočítání hodnoty mediánu výšek buňky s následným označením bodů pod mediánem, který je popsán v podkapitolách 4.3 a 4.4.

4.6 Odstranění bodů pod mediánem

Body, které byly označeny jako pod mediánem výšek buňky v obou sítích, jsou považovány za body, které se nacházejí pod převisem, a jsou z původního bodového mračka odebrány. Následně je opět vytvořen model povrchu v podobě TIN.

4.7 Detekce bodů na dně prohlubní

Odebráním vybraných bodů pod mediánem došlo k odstranění většiny „spike artefacts“. Na některých místech se však nacházejí „prohlubně“ (obr. 14). Některé „prohlubně“ byly již v původně vytvořeném TIN, další vznikly po odstranění „spike artefacts“. Pro identifikaci bodů v oblasti těchto „prohlubní“ a vytvoření z hlediska 2,5D správnějšího modelu terénu bylo využito nástrojů ArcHydro Tools.



Obr. 14. "Prohlubně" v TIN.
Zdroj: vlastní tvorba.

ArcHydro Tools je sada nástrojů rozšiřující software ArcGIS, která slouží pro potřeby hydrologických analýz. V algoritmu byl využit nástroj Fill Sinks, který vyplnil vzniklé prohlubně. Tento nástroj pracuje na principu vyplňování „prohlubní“ vodou, až dosáhne

výšky hladiny, ze které je možný odtok. Body nacházející se na dně prohlubní, byly označeny a přidány k bodům „pod“ převisem, které byly identifikovány v kroku popsaném v kapitole 4.6. Ze všech těchto bodů je vytvořena vrstva bodů, které je vhodné vyloučit při tvorbě nového 2,5D modelu terénu. Odstraněním těchto bodů z původního bodového mračka vzniká vrstva „vyhovujících“ bodů, které jsou následně využity při tvorbě opraveného 2,5D modelu terénu.

4.8 Algoritmizace navržené metody

Navržený postup byl následně automatizován ve formě skriptu pro software ArcGIS 10.6. za použití jazyku Python. Python je dynamický, objektově orientovaný, interpretovaný skriptovací jazyk, nezávislý na platformě. V roce 1991 jej navrhl Guido van Rossum a je vyvíjen jako open source projekt. Hlavním důvodem zvolení tohoto jazyka byla vysoká kompatibilita s produkty ESRI. Pomocí modulu ArcPy lze přistupovat k jednotlivým nástrojům softwaru ArcGIS.

Tento skript byl napsán v Pythonu 2.7 a prostředí PythonWin. Skript byl vytvořen hlavně za účelem experimentálního ověření navržené metodiky a hodnocení jejích výsledků. Nebyl zcela optimalizován z hlediska výkonu a z tohoto důvodu nemusí tedy vždy obsahovat nejefektivnější implementaci navrženého řešení problému.

Byly vytvořeny dva skripty: první skript *priprava.py* slouží k přípravě dat ke vstupu do hlavního skriptu *detekce.py* (příloha 5). Tyto skripty jsou k dispozici na přiloženém CD.

priprava.py

Vstupním parametrem je 3D bodové mračno ve formátu shapefile obsahující pouze odrazy pocházející od terénu. Účelem tohoto skriptu je připravit data pro hlavní skript *detekce.py*. Jelikož skript *detekce.py* pracuje pouze s jediným atributem – souřadnicí *z* (nadmořskou výškou), jsou všechny ostatní atributy z atributové tabulky vstupního bodového mračka odstraněny. Pro jednoznačnou identifikaci bodů je každému bodu přidán identifikátor (atribut ID). Výstupem skriptu je shapefile, obsahující upravené bodové mračno.

detekce.py

Vstupním parametrem je cesta ke složce, která obsahuje shapefile s upraveným bodovým mračnem, vytvořeným pomocí skriptu *priprava.py*. V této složce jsou vytvářeny všechny mezisoubory a výstupy.

Nejprve je z původního bodového mračna pomocí funkce *Create TIN* vytvořen TIN, který je následně funkcí *TIN Triangle* převeden na jednotlivé trojúhelníky. Poté jsou vybrány trojúhelníky se sklonem větším než 80° a vytvořena vrstva bodů, které tyto trojúhelníky tvoří. Do další části skriptu už vstupují pouze tyto body, tvořící nové bodové mračno. Dále je spočítána hustota bodového mračna a na jejím základě vypočtena velikost buňky, která je použita při vytvoření pravidelné čtvercové sítě *a* s využitím nástroje *Create Fishnet*. Následuje výpočet výškového rozsahu (*range*) v každé buňce sítě pomocí *Summary Statistics* a jsou vybrány buňky, které splňují stanovenou mez rozsahu. V těchto buňkách je spočítán výškový medián bodů funkcí *Median Center* a body pod mediánem jsou označeny pomocí atributu *med*. Dalším krokem je vytvoření sítě *b*, která je posunuta o polovinu velikosti buňky ve směru vodorovné i svislé osy. Poté následuje opakované vypočítání rozsahu, výškového mediánu a označení bodů pod mediánem. Body, které byly označeny jako pod mediánem výšek v obou sítích, jsou označeny jako body „pod převisem“. V poslední části algoritmu je využit nástroj *Fill* z ArcHydro Tools pro nalezení bodů na dně „prohlubní“. Tyto body jsou přidány k bodům označeným jako „pod převisem“.

Výstupem algoritmu jsou dvě vrstvy: *body_ok.shp* a *body_pryc.shp*. Vrstva *body_ok.shp* obsahuje body, které jsou vhodné pro následné vytvoření opraveného 2,5D modelu terénu. Vrstva *body_pryc.shp* obsahuje body „pod převisem“, které je vhodné při tvorbě 2,5D modelu terénu vyloučit. Kromě těchto dvou bodových vrstev jsou vedlejšími výsledky algoritmu také původní a opravený TIN a vrstevnice z nich odvozené.

5 Výsledky a hodnocení

Následující kapitola popisuje proces testování parametrů navrženého algoritmu a hodnocení jeho výsledků.

5.1 Testování parametrů algoritmu

Navržený algoritmus pracuje s několika parametry (minimální sklon trojúhelníků v oblasti převisů, minimální průměrný počet bodů v buňce a minimální rozsah výšek v buňce). V průběhu navrhování finální podoby algoritmu bylo proto testováno mnoho verzí s různými kombinacemi parametrů.

Sklon trojúhelníků definuje oblast, která bude zpracovávána. Je tedy důležité, aby vybrané trojúhelníky obsahovaly body, které mají být algoritmem odstraněny. Na druhou stranu, pokud do algoritmu vstupuje příliš mnoho bodů, může dojít ke snížení výsledné celkové přesnosti. Testovány byly sklony trojúhelníků 60°, 70°, 80° a 85°. Výsledky byly následně hodnoceny pomocí vizuální interpretace a chybových matic (příloha 1). Jak vyplývá z tabulky 3, nejvyšší celkové přesnosti klasifikace se dosáhlo při použití sklonu 70° a 80°, jejichž výsledná přesnost byla velmi podobná. Jako finální byla vybrána hodnota 80°, protože počet nesprávně odstraněných bodů byl v případě použití této hodnoty parametru menší, a také proto, že bodové mračno obsahuje méně bodů, což znamená nejen, že je menší možnost, že budou odstraněny nesprávné body, ale také kratší výpočetní čas.

Tab. 3. Určení parametru sklon

| sklon | počet správně nalezených bodů k vyloučení | počet bodů označených jako k vyloučení | uživatelská přesnost | zpracovatelská přesnost | celková přesnost klasifikace | celkový počet bodů |
|-------|---|--|----------------------|-------------------------|------------------------------|--------------------|
| 60° | 538 | 731 | 91,34 % | 73,60 % | 93,10 % | 2 441 |
| 70° | 552 | 725 | 93,72 % | 76,14 % | 94,06 % | 2 304 |
| 80° | 553 | 721 | 93,89 % | 76,70 % | 94,23 % | 2 043 |
| 85° | 517 | 670 | 87,78 % | 77,16 % | 93,64 % | 1 714 |

Minimální průměrný počet bodů v buňce ovlivňuje velikost vytvořené sítě. Je zapotřebí, aby v buňce byl dostatek bodů pro výpočet robustní statistiky. Byly testovány hodnoty 5, 10, 15 a 20 bodů v buňce. Při zvolení nízkého počtu bodů v buňce je následně odstraněno méně bodů a v datech tedy zůstává více bodů, které by měly být pro účely vytvoření 2,5D DMR odstraněny, a mohou způsobovat vznik „spike artefacts“. Pokud je ale počet bodů v buňce

příliš vysoký, může dojít k vytvoření sítě s příliš velkou buňkou, což může mít opět za následek snížení celkové přesnosti výsledku algoritmu, jelikož dochází k odstranění více bodů na stěnách a patách stěn. Jako nejvhodnější se na základě vizuální interpretace a chybových matic (příloha 2) jeví minimální počet bodů v buňce $N = 10$.

Minimální rozsah výšek v buňce dále upřesňuje oblast, ve které budou hledány body „pod převisem“. Pokud je nastaven příliš nízko, vstupují do algoritmu buňky, které neobsahují body „pod převisem“ a dochází tak k zbytečnému odstraňování bodů. Pokud je naopak nastaven příliš vysoko, nedojde k zpracování buněk, které body „pod převisem“ obsahují, a tyto body tedy zůstanou ve výsledném bodovém mračku, i když by z něj měly být vyloučeny. Pro zjištění meze výškového rozsahu byly testovány hodnoty, které byly násobky velikosti buňky cs , konkrétně $0,5 \cdot cs$, cs a $2 \cdot cs$. Na základě chybových matic (příloha 3), byla vybrána hodnota $2 \cdot cs$, tedy pokud je například velikost strany buňky 1 metr, musí být minimální rozdíl výšek nejnižšího a nejvyššího bodu v buňce 2 metry. Tím je zajištěno, že se v buňce nachází povrch s dostatečným sklonem, a tedy s největší pravděpodobností body „nad“ i „pod“ převisem.

Pro účely hodnocení výsledků byla vybrána kombinace parametrů, která dosahovala nejvyšší celkové přesnosti klasifikace (viz kapitola 5.3), a byl vytvořen skript *detekce.py* (příloha 5). Konkrétní hodnoty parametrů použitých pro testování jsou v tabulce 4. Použité parametry závisí na charakteru zpracovávaného území a použitých datech. Při použití algoritmu pro zpracování jiných oblastí může tedy být vhodné je upravit.

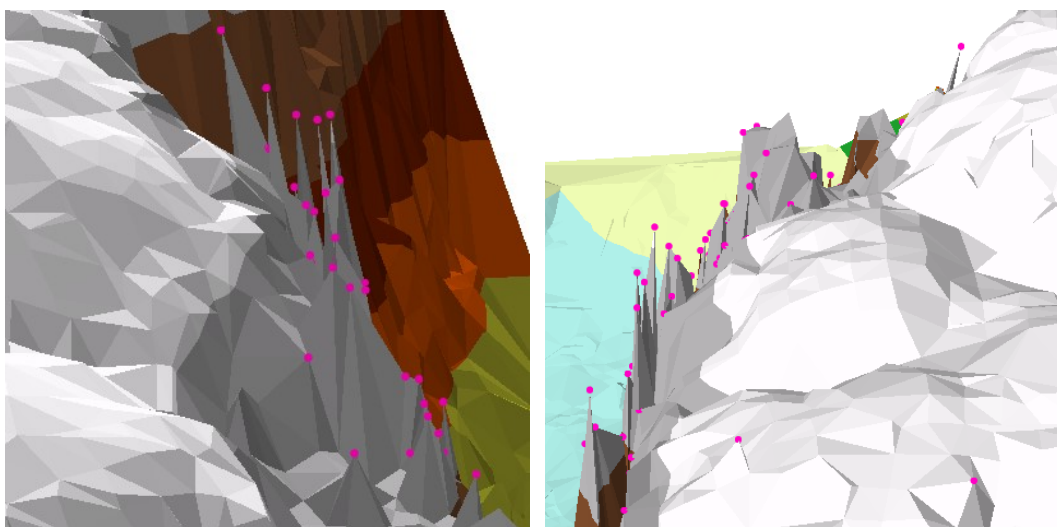
Tab. 4. Testované a použité hodnoty parametrů ve skriptu *detekce.py*

| Název parametru | Testované hodnoty | Použitá hodnota |
|--|--|-----------------|
| minimální sklon trojúhelníků v oblasti převisů | $60^\circ, 70^\circ, 80^\circ, 85^\circ$ | 80° |
| minimální průměrný počet bodů v buňce N | 5, 10, 15, 20 | 10 |
| minimální rozsah výšek v buňce | $0,5 \cdot cs, cs, 2 \cdot cs$ | $2 \cdot cs$ |

5.2 Data pro hodnocení přesnosti

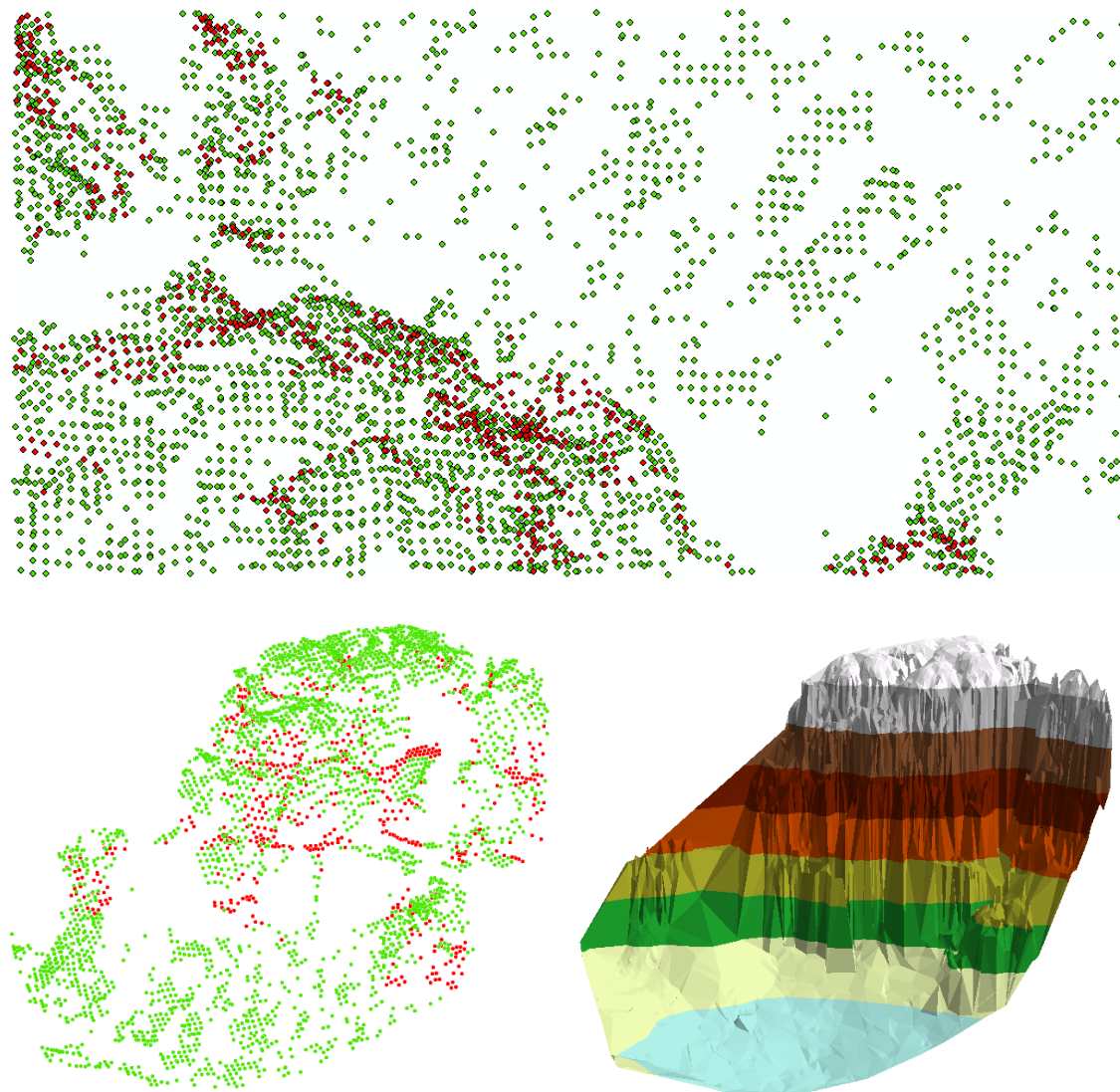
Pro podrobné hodnocení přesnosti výsledků navrženého algoritmu byl použit výřez z bodového mračna (podrobněji popsáno v kapitole 3.2). Pro správný běh algoritmu je důležité, aby bodové mračno obsahovalo skutečně pouze odrazy pocházející od terénu.

V průběhu testování algoritmu však bylo zjištěno, že v opraveném TIN zůstávají drobné „spike artefacts“, které jsou zřejmě způsobené přítomností bodů nerepresentujících terén. Po provedení terénního průzkumu oblasti bylo zjištěno, že by se mohlo jednat o neodstraněné body vegetace (obr. 15). Po jejich odstranění zůstalo v bodovém mračnu 3 538 bodů.



Obr. 15. Body, které pravděpodobně nerepresentují povrch.
Zdroj: vlastní tvorba.

Toto bodové mračno bylo následně manuálně klasifikováno v softwaru ArcScene na základě vytvořeného TIN. O každém bodu bylo postupně rozhodnuto, zda se nachází pod převisem a měl by tedy být při tvorbě 2,5D modelu terénu vyloučen, či ne (obr. 16).



Obr. 16. Manuálně klasifikované bodové mračno: 2D pohled (nahore), 3D pohled (vlevo dole) a 2,5D model terénu, vytvořený z vyhovujících bodů (vpravo dole). Zdroj: vlastní tvorba.
 Legenda: vyhovující body – zeleně, body k vyloučení – červeně

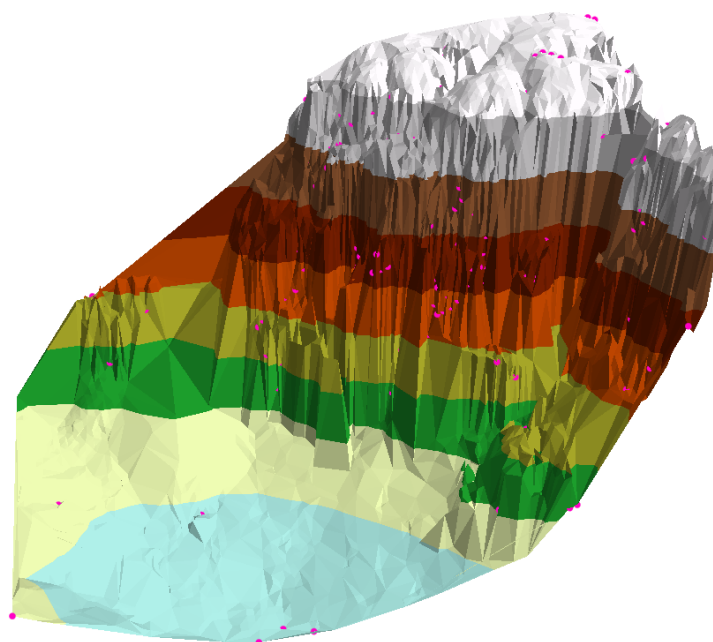
5.3 Hodnocení přesnosti

Na základě porovnání výsledků algoritmu *detekce.py* s výsledky manuální klasifikace byla vytvořena chybová matice (tab. 5).

Tab. 5. Chybová matice srovnání výsledků skriptu *detekce.py* a manuální klasifikace

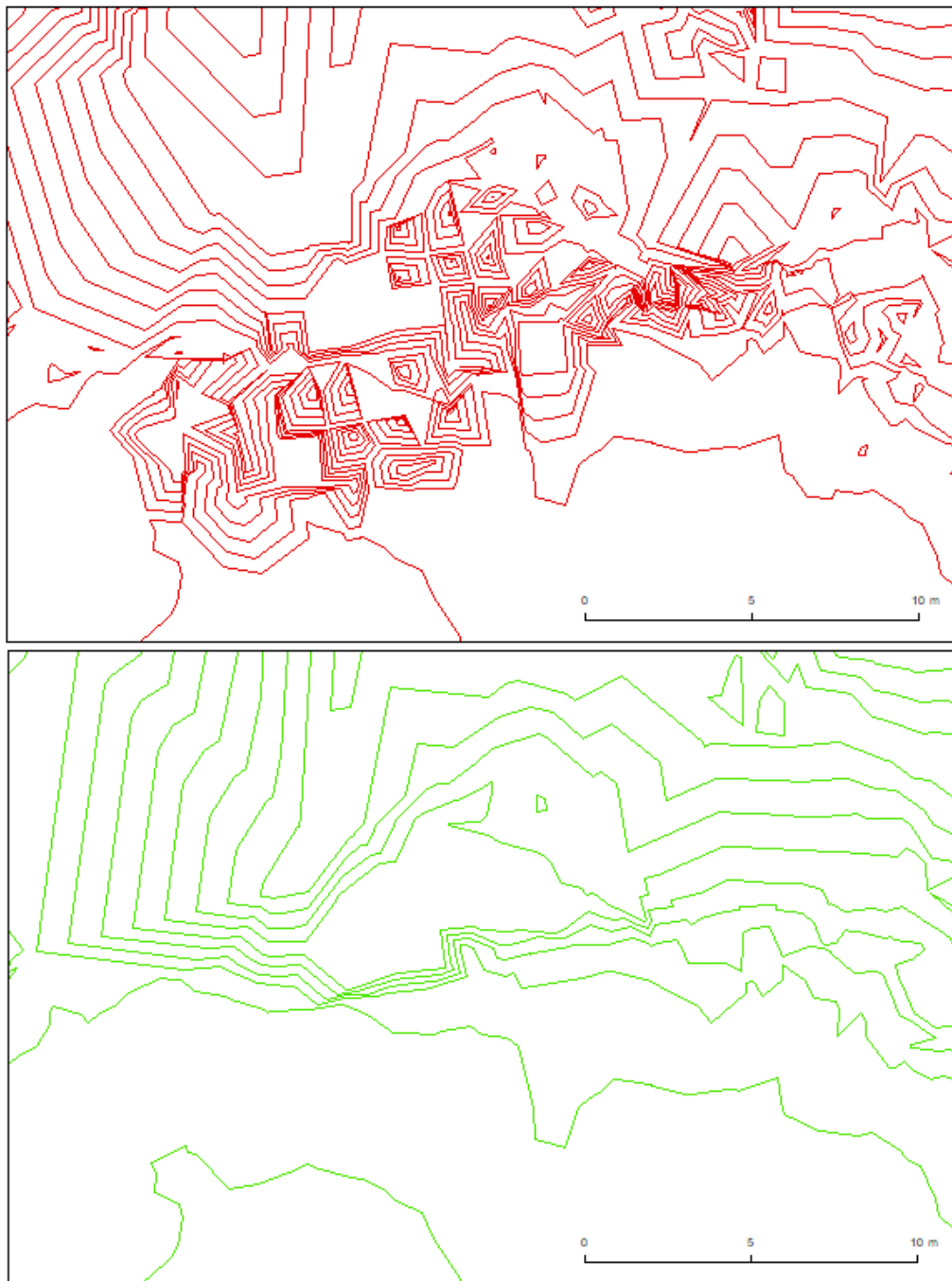
| | body vyhovující pro 2,5D model | body k vyloučení při tvorbě 2,5D modelu | celkem bodů | zpracovatelská přesnost |
|---------------------------------|---|--|------------------------|-------------------------------------|
| body vyhovující | 2 781 | 36 | 2 817 | 98,72 % |
| body k vyloučení | 168 | 553 | 721 | 76,70 % |
| celkem bodů | 2 949 | 589 | 3 538 | |
| uživatelská přesnost | 94,30 % | 93,89 % | | |
| | | | | celková přesnost 94,23 % |

Jak vyplývá z tabulky 5, algoritmus dosáhl při zpracovávání dané oblasti velmi dobrých výsledků a celková přesnost klasifikace dosáhla téměř 95 %. Z celkových 2 817 bodů, které byly algoritmem označeny jako vhodné pro vytvoření 2,5D modelu terénu, jich pouze 36 bylo označeno při manuální klasifikaci jako body k odstranění. Horších výsledků bylo dosaženo při hledání bodů k vyloučení při tvorbě 2,5D modelu. Z celkových 721 bodů, které algoritmus označil jako vhodné k odstranění, jich bylo 168 při manuální klasifikaci označeno jako vyhovujících při tvorbě 2,5D modelu. Algoritmus tedy odstranil více bodů, než bylo nutné. Jednalo se zejména o body na skalní stěně (obr. 17).



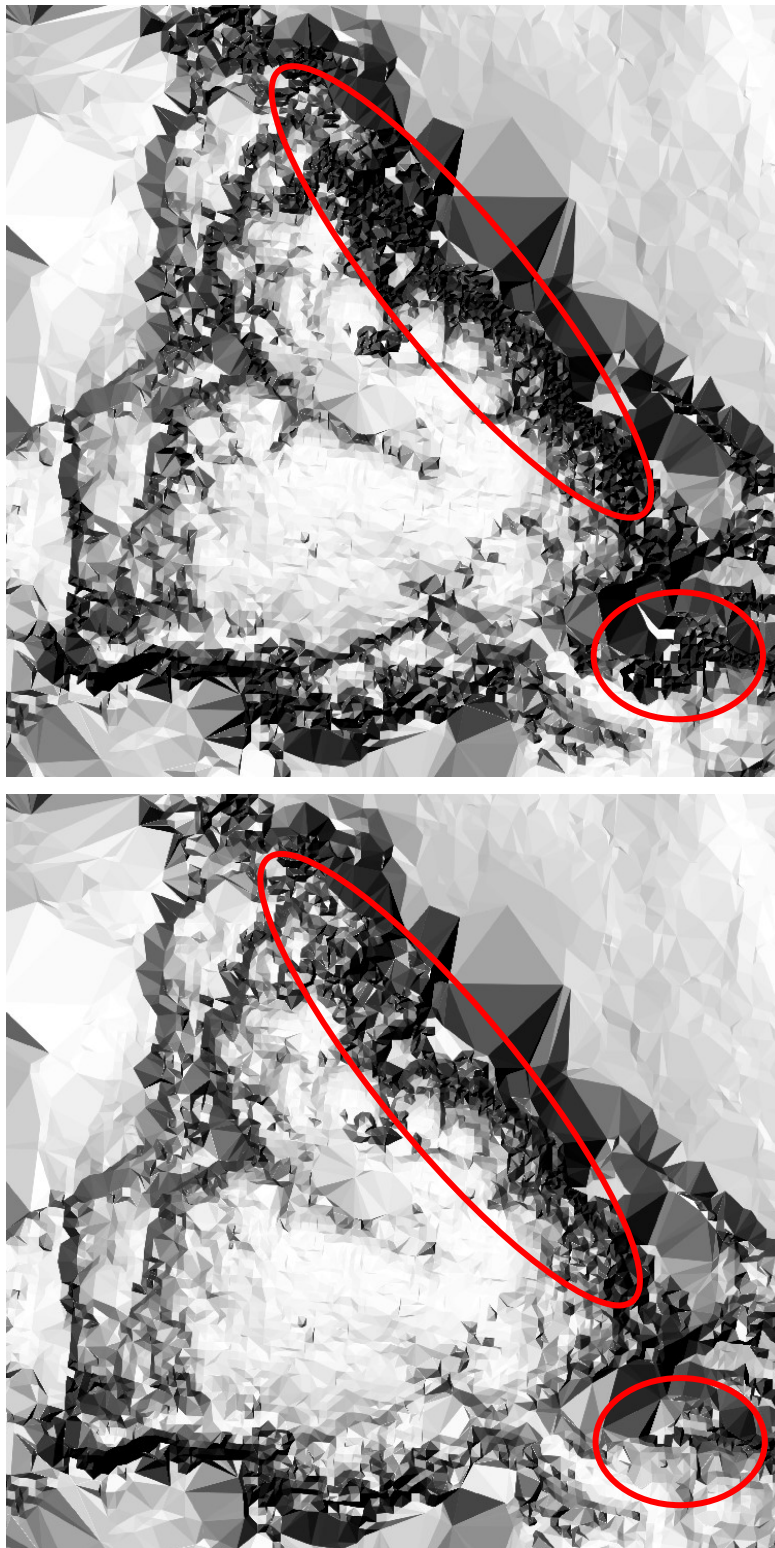
Obr. 17 Algoritmem nesprávně odstraněné body (růžově), podklad: TIN vytvořený po manuální klasifikaci

U digitálních modelů terénu, které obsahují „spike artefacts“ vzniklé přítomností bodů „nad“ i „pod“ převisem, vznikají problémy při odvozování dalších produktů, jako jsou například vrstevnice či stínovaný reliéf. Právě řešení tohoto problému bylo jedním z cílů této diplomové práce. Jak je patrné z obr. 18, vrstevnice s intervalem 5 m vytvořené z opraveného TIN (zeleně) reprezentují 2,5D reliéf v oblasti převislé skalní stěny daleko lépe než vrstevnice odvozené z původního TIN (červeně), který obsahoval „spike artefacts“.



Obr. 18. Vrstevnice vytvořené z původního TIN (nahore) a z opraveného TIN (dole).
Zdroj: vlastní tvorba.

Po nastavení parametrů algoritmu a zhodnocení výsledků v rámci výřezu dat ze zájmového území byl algoritmus spuštěn nad celým bodovým mračnem, obsahujícím 69 694 bodů a výsledek zhodnocen pomocí vizuální interpretace. Rozdíly lze pozorovat například po vytvoření stínovaného reliéfu. K jeho tvorbě byla použita funkce *Hillshade* (obr. 19).



Obr. 19. Výřez stínovaného reliéfu vytvořeného z původního (nahore) a opraveného TIN (dole).
Zdroj: vlastní tvorba.

6 Diskuze

Po navržení základního principu metodiky byly při vytváření finální verze algoritmu testovány různé kombinace parametrů. Celý proces a parametry jsou podrobněji popsány v kapitole 5.2. Tyto parametry jsou závislé na charakteru zpracovávaného území a použitých dat. Pro data s nižší hustotou bodového mračka je vhodné použít nižší mez sklonitosti trojúhelníků (např. 70°). Sklon trojúhelníků totiž definuje oblast potenciálního převisu, která bude zpracovávána, a je tedy nutné zajistit, aby vybrané trojúhelníky obsahovaly pokud možno všechny body „pod převisem“. To by při použití příliš vysokého sklonu nemuselo platit. Stejný princip platí i pro ostatní parametry. Naopak pro bodové mračno s vysokou hustotou bodů může být vhodné uvažovat o navýšení minimálního počtu bodů v buňce, aby nebyla výsledná velikost buňky příliš malá a počet odstraněných bodů nedostatečný.

Kromě různých kombinací parametrů byly také testovány různé možnosti zpracování dat. Jednou z možností bylo rozdělit zpracované území na jednotlivé oblasti s možným výskytem převisů a každou oblast převisu pak zpracovávat zvlášť. Pro každou z oblastí by tedy byla vytvořena síť s odlišnou velikostí buňky, závisící na hustotě bodů v oblasti konkrétního převisu. Po implementaci tohoto postupu (*detekce2.py*) však mnohonásobně vzrostl výpočetní čas, nutný k běhu skriptu, zatímco výsledná přesnost se téměř nezlepšila, či někdy byla i horší. Bylo tedy rozhodnuto, že se celá zpracovávaná oblast bude zpracovávat najednou se stejnou velikostí buňky sítě.

V další alternativní verzi skriptu (*detekce3.py*) byly zjišťovány možnosti vyřešení problému, kdy jsou algoritmem odstraňovány body, které se nenacházejí pod převisem, a mohou být při tvorbě 2,5D modelu terénu použity. Cílem tedy bylo snížit počet chybně odstraněných bodů na skalní stěně. Po prvním výpočtu mediánu výšek v buňce a označení bodů pod ním jako kandidátů k odstranění, byl opět zjišťován medián výšek buňky, ale tentokrát pouze pro tyto kandidátní body. Jako body „pod převisem“, které je skutečně vhodné odstranit, dále byly označeny pouze body pod tímto novým mediánem výšek. V tomto případě však došlo k odstranění příliš nízkého počtu bodů a uživatelská přesnost klasifikace bodů „pod převisem“ klesla na 64 %. Druhého výpočtu statistiky proto nebylo ve finální verzi využito.

Byla také testována kombinace obou výše uvedených alternativ algoritmu (*detekce4.py*), kdy bylo území nejdříve rozděleno na jednotlivé oblasti převisů, pro něž byla vytvořena specifická síť s individuální velikostí buňky pro každou oblast, a dále byl pro body, které byly označeny jako „pod převisem“, opětovně spočítán medián a odstraněny

byly pouze body pod tímto novým výškovým mediánem. To sice zvýšilo uživatelskou přesnost klasifikace bodů „pod převisem“ z 64 % při použití verze *detekce3.py* na 79 %, ale nadále zůstal problém s dlouhým výpočetním časem při zpracování území po jednotlivých oblastech převisů a následném spojení všech dílčích výsledků. Z tohoto důvodu byla jako finální verze vybrána verze skriptu, která je označena jako *detekce.py*, a jejíž průběh je podrobněji popsán v kapitole 4.8. Skripty *detekce2-4.py* se nacházejí na přiloženém CD, jejich chybové matice lze nalézt v příloze (příloha 4).

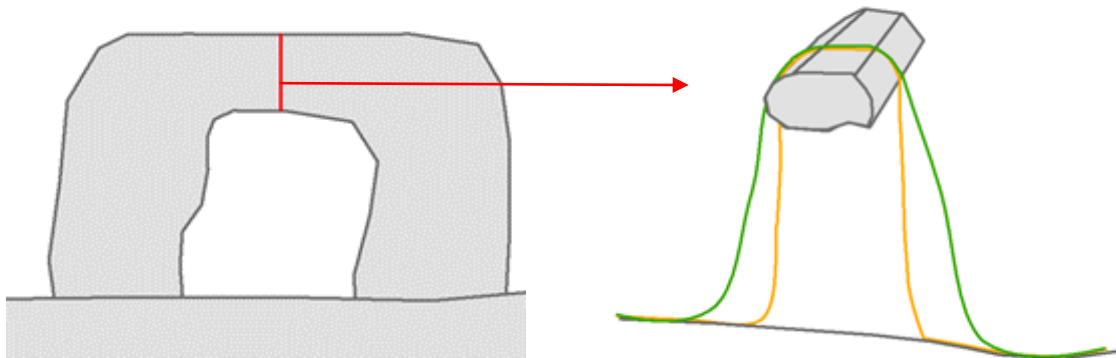
Pro účely hodnocení výsledků algoritmu bylo testovací bodové mračno manuálně klasifikováno na body vhodné k vytvoření 2,5D DMR a na body „pod převisem“, které je vhodné při tvorbě 2,5D DMR vyloučit. Finální verze algoritmu *detekce.py* dosáhla celkové přesnosti 94,23 %. Jelikož algoritmus pracuje na principu odstraňování bodů pod mediánem výšek ve vymezené oblasti a odstraňování bodů na dně prohlubní, body na okrajích plošiny jsou zachovány. Hlavní cíl diplomové práce byl splněn.

Mezi nesprávně klasifikovanými body převládají body s chybou II. typu, došlo tedy k odstranění více bodů, než bylo potřeba. Jedná se zejména o body, nacházející se na skalní stěně. Jejich odstranění nemusí až tolik vadit, jak je patrné například po vytvoření vrstevnic z opraveného TIN, na jejichž podobu nemá odstranění bodů ze stěny velký vliv. Problém nastává, pokud jsou odstraněny body na patě stěny.

I přes vysokou celkovou úspěšnost výsledku má algoritmus stále své nedostatky. Navržený algoritmus je velmi citlivý na vlastnosti vstupních dat. V první řadě je důležité, aby se jednalo o data reprezentující skutečně pouze odrazy pocházející od terénu. Pokud se v datech nacházejí body, které nerepresentují terén, je možné, že způsobí vznik „spike artefacts“, které algoritmus neodstraní. Toto zároveň představuje největší omezení navrženého algoritmu. Nabízí se, že by při manuální klasifikaci dat mohly být body pod převisem odstraněny ručně v rámci kontroly chyb. Při manuální editaci dat však operátor často sleduje pouze bezprostřední okolí bodu a body pod převisem tak mohou i v manuálně upravených datech zůstat. Právě v takovýchto situacích by se dal navržený algoritmus použít. Hlavní problém nastává, pokud dojde k odstranění bodů na patě stěny a v důsledku toho dojde k posunutí celé stěny, a tedy polohové nepřesnosti celého výsledného DMR. Tento problém byl řešen zpracováním celého území dvakrát s využitím posunuté sítě a odebráním pouze bodů, které jsou označeny jako pod mediánem výšek v obou sítích. Tímto krokem sice došlo k zachování některých bodů na patě stěny, které by byly jinak odebrány, v některých oblastech však k jejich odstranění může stále docházet. Může se

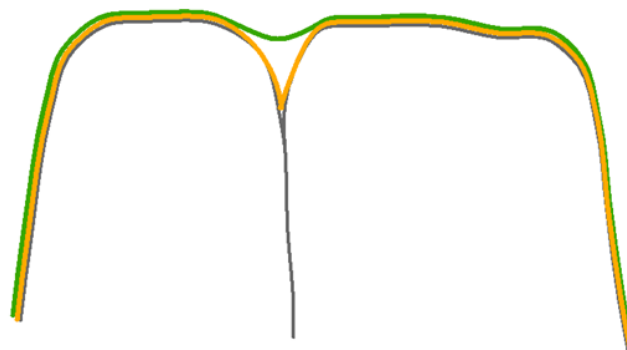
jednat o oblasti, které jsou širší, než je velikost posunu použité sítě (tedy se šířkou větší než je polovina velikosti buňky).

Specifická verze tohoto problému může nastat v oblastech skalních bran a mostů. V rámci 2,5D modelu by prostor pod bránou/mostem měl být vyplněn a nahrazen téměř kolmou stěnou (obr 20, oranžově). Body, které by tvořily patu takové stěny, však nemusí v datech být či jsou algoritmem odstraněny jako pod převisem. Pata výsledné stěny (obr. 20, zeleně), která nahrazuje prostor pod bránou/mostem tak není ortogonálním průmětem brány/mostu, ale je posunutá.



Obr. 20. Průřez skalní branou. Podrobnější vysvětlení v textu. Zdroj: vlastní tvorba.

Povrch skal může být velmi členitý a může obsahovat reálné prohlubně, které algoritmus vyplní a zarovná. To samé se může stát v případě, že je v datech zachycena mezera mezi dvěma skalními útvary, která by ve výsledném 2,5D modelu mohla a měla být zobrazena (obr. 21). Jak je vidět na obrázku 21, ačkoli možnosti 2,5D zobrazení umožňují mezeru zachytit (oranžově), algoritmus ji vyplní a povrch zarovná (zeleně).



Obr. 21. Mezera mezi dvěma skalními útvary. Podrobnější vysvětlení v textu. Zdroj: vlastní tvorba.

Ze stejného důvodu může také dojít ke spojení samostatných balvanů či skalních suků nebo jejich začlenění do skalní stěny. Řešením by mohlo být nastavení minimální hloubky prohlubně, kterou by algoritmus měl vyplnit, zatímco prohlubně nesplňující danou

podmínku by ve výsledném modelu terénu zůstaly. Mohlo by ale být obtížné rozlišit mezi prohlubní, způsobenou přítomností bodu „pod převisem“, a mezerou mezi dvěma skalními útvary.

Hlavní slabinou algoritmu je fakt, že je navržen ke zpracování již filtrovaného bodového mračka, které obsahuje pouze odrazy od povrchu, včetně bodů na okraji plošin a „pod převisem“. Je tedy vhodný pro úpravu bodového mračka, které již bylo po automatizované filtraci (která odstranila body na okraji plošiny), manuálně editováno a body na okraji plošiny byly vráceny zpět. Algoritmus by mohl být rozšířen tak, aby šlo použít jako vstupní soubor nefiltrované bodové mračno. Nejprve by byla provedena automatizovaná filtrace dat, která by odstranila body z okrajů plošin. Následně by z takto filtrovaných dat byl vytvořen TIN a vybrány trojúhelníky s určitým sklonem (v závislosti na hustotě bodového mračka). Tyto trojúhelníky by tvořily potenciální oblast převisu a v jejich blízkém okolí by následně byly hledány body, odstraněné automatizovanou filtrací z okraje plošiny, které by byly označeny jako body povrchu. Poté by již bylo možné použít navržený algoritmus.

Jak již bylo zmíněno v rešeršní části, problematika převisů je v literatuře řešená většinou jen okrajově, proto je obtížné srovnávat získané výsledky s již publikovanými metodami. Jediný, kdo se konkrétně tímto problémem zabýval, byl Lysák (2016) ve své disertační práci. Právě z jeho navrženého postupu vycházela metodika této diplomové práce. Na rozdíl od Lysáka, který používal jako vstup nefiltrované bodové mračno, algoritmus navržený v této práci zpracovává již filtrované a manuálně upravené bodové mračno. Pro případné rozšíření navrženého algoritmu o možnosti zpracování nefiltrovaného bodového mračka by proto nejdříve musely být vyřešeny problémy, se kterými se Lysák setkal. Jednalo se především o problémy při rámcovém vymezení stěn a případy, kdy je ve zpracovávané jednotce více stěn nad sebou či je stěna tvarově komplikovaná.

Dalším způsobem, jakým by se dal algoritmus rozšířit o možnost vstupu nefiltrovaného bodového mračka, je možnost využití metody rotace bodového mračka, kterou navrhl Pack et al. (2012). Po aplikaci této metody na nefiltrované bodové mračno by výsledkem mělo být nové bodové mračno, představující odrazy pouze od povrchu. V oblastech převisů by mělo dojít k zachování bodů na okrajích plošin i bodů „pod převisem“. Toto bodové mračno by pak vstupovalo do algoritmu, navrženého v této diplomové práci, který by odstranil body „pod převisem“ a zabránil tak vzniku „spike artefacts“. Celková úspěšnost daného postupu by závisela na kvalitě filtrace bodového

mračna metodou rotace. Pokud by v bodovém mračnu zůstaly body, které nerepresentují odrazy od povrchu, navržený algoritmus by si s nimi neporadil a vedly by ke vzniku drobných „spike artefacts“, které by v DMR zůstaly i po odstranění bodů „pod převisem“.

7 Závěr

Při získávání dat metodou LLS může v pořizovaných datech dojít k zachycení převisů. To je z pohledu 2,5D modelu nežádoucí a při následném zpracování těchto dat a odvozování dalších produktů, jako jsou 2,5D digitální modely terénu, mohou v oblastech převisů nastat problémy. Při použití běžných filtračních algoritmů může dojít k odebrání bodů na okraji plošiny, a tedy k odstranění často významné terénní hrany. Pokud je bodové mračno následně manuálně doklasifikováno a obsahuje všechny zachycené body terénu – „nad“ i „pod“ převisem, dochází při následném vytvoření digitálního modelu terénu ke vzniku tzv. „spike artefacts“ a „rozbití“ okrajů plošin.

Hlavním cílem předložené diplomové práce bylo navrhnout a zhodnotit metodu zpracování bodového mračna, obsahující body „nad“ i „pod“ převisem tak, aby ze zpracovaného bodového mračna bylo možné vytvořit realitě co nejpodobnější 2,5D model terénu. Zvlášť byl kladen důraz na zachování bodů na okraji plošiny a odstranění „spike artefacts“. Navržený algoritmus vychází z postupu, který ve své disertační práci navrhl Lysák (2016).

Navržená metoda pracuje na principu odebírání bodů pod mediánem výšek v buňkách pravidelné sítě. Vstupním souborem pro algoritmus je filtrované 3D bodové mračno, představující odrazy pocházející od terénu. Celková úspěšnost klasifikace pro dané modelové území dosáhla 94,23 %. Bylo tedy potvrzeno, že navržená metodika aspoň na zvoleném testovacím území funguje v praxi. Při vytvoření odvozených produktů z opraveného DMR, jako jsou například vrstevnice, lze pozorovat oproti produktům, odvozených z původního TIN, znatelné zlepšení.

V praxi by mohl být algoritmus použit na kontrolu manuálně klasifikovaných dat, představujících odrazy od povrchu. Pro jeho širší využití při filtraci dat v oblasti převisů by však musel být nejdříve rozšířen o možnost vstupu nefiltrovaného bodového mračna.

Ačkoli 3D model poskytuje nejvíce realistickou reprezentaci terénu, není jeho použití vždy možné. Množství používaných GIS softwarů funguje na principu 2D, kde lze k jedné dvojici souřadnic (x, y) přiřadit pouze jednu hodnotu atributu, vyjadřujícího výšku z . Pro účely topografického mapování v praxi 2,5D reprezentace terénu většine případů postačuje, neumožňuje ale reprezentaci útvarů, které mají pro jednu dvojici souřadnic (x, y) více než jednu souřadnici z , jako jsou například převisy či skalní brány. Pokud mají být oblasti takovýchto útvarů přesto zobrazeny ve 2,5D modelu, je nutné vstupní data nejdříve vhodně upravit tak, aby splňovala podmínku 2,5D. Mělo by ale také dojít k zachování důležitých

terénních hran, které okraje plošin převisu můžou představovat. Právě za tímto účelem byl vytvořen algoritmus, navržený v této diplomové práci.

Použitá literatura

ACKERMANN, F. 1999. *Airborne laser scanning - present status and future expectations*. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, vol. 54. Elsevier, p. 64–67.

AOPK ČR 200-?. *NP České Švýcarsko: Základní údaje*. [cit. 14. 7. 2019]. Dostupné z URL: http://www.cittadella.cz/europarc/index.php?p=index&site=NP_ceske_svycarsko_cz

BRÁZDIL, K. 2009. *Projekt tvorby nového výškopisu území České republiky*. Geodetický a kartografický obzor, roč. 55/97, č. 7, s. 145–151.

BRÁZDIL K. et al. 2016a: *Technická zpráva k digitálnímu modelu reliéfu 4. generace (DMR 4G)* [online]. Zeměměřický úřad, Vojenský geografický a hydrometeorologický úřad. Pardubice 2012. [cit. 18. 7. 2019]. Dostupné z URL: http://geoportal.cuzk.cz/Dokumenty/TECHNICKA_ZPRAVA_DMR_4G.pdf

BRÁZDIL K. et al. 2016b: *Technická zpráva k digitálnímu modelu reliéfu 5. generace (DMR 5G)* [online]. Zeměměřický úřad, Vojenský geografický a hydrometeorologický úřad. Pardubice 2012. [cit. 18. 7. 2019]. Dostupné z URL: http://geoportal.cuzk.cz/Dokumenty/TECHNICKA_ZPRAVA_DMR_5G.pdf

ČÚZK 2019. *Prohlížečí služba WMS ZM 10*. [cit. 14. 7. 2019]. Dostupné z URL: http://geoportal.cuzk.cz/WMS_ZM10_PUB/WMSservice.aspx

DEMEK J., MACKOVČIN P. 2006. *Zeměpisný lexikon ČR*. Vyd. 2. Brno: AOPK ČR. ISBN 80-86064-99-9.

DURRIEU, S. 2010. *Design of a European space borne LiDAR System for vegetation mapping - LEAF: LiDAR for Earth And Forests*. In: Silvilaser. Freiburg, Germany, 14-17 September 2010.

DOLANSKÝ, T. 2004. *Lidary a letecké laserové skenování*. Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně. ISBN 80-7044-575-0.

DOLANSKÝ, T. 2008. *Porovnání přesnosti DMT z laserového skenování s pozemními měřeními*. In: *Sborník GIS Ostrava 2008*. 6 s.

DUŠÁNEK, P. 2014. *Nové výškopisné mapování české republiky*. Zeměměřický Úřad. [cit. 16. 7. 2019]. Dostupné z URL: http://gis.vsb.cz/GIS_Ostrava/GIS_Ova_2014/sbornik/papers/gis2014526faa8a434ef.pdf

- KILIAN J., HAALA N., ENGLISH M. 1996. *Capture and evaluation of airborne laser scanner data*. In : International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing [online]. kongres Vídeň, 2005, roč. 31, č. B3, s. 383–388 [cit. 20. 7. 2019]. Dostupné z URL: http://www.isprs.org/proceedings/XXXI/congress/part3/383_XXXI-part3.pdf.
- LYSÁK, J. 2016. *Topografické mapování skalních útvarů s využitím dat leteckého laserového skenování*. Praha, 2016. 248 s. Disertační práce na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy v Praze na katedře aplikované geoinformatiky a kartografie.
- MORIN K. W. 2002: *Calibration of Airborne Laser Scanners* [online]. Calgary, Alberta : Department of geomatics engineering, 2002, 125 str., Diploma thesis. University of Calgary. [cit. 20. 7. 2019]. Dostupné z URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.73.5013&rep=rep1&type=pdf>
- NÁRODNÍ PARK ČESKÉ ŠVÝCARSKO 200-?. *Geologie*. [cit. 16. 7. 2019]. Dostupné z URL: <http://www.npcs.cz/geologie>
- ORŠULÁK T., PACINA J. 2010. *3D modelování a virtuální realita* [online]. Ústí nad Labem: Centrum pro virtuální realitu a modelování krajiny, vydání první, 2010, 64 str [cit. 20. 7. 2019]. Dostupné z URL: <http://gis.fzp.ujep.cz/DTM/3d.pdf>.
- PACK, R. T.; BLONQUIST, K.; CARTER, B. 2012. *Lidar Bare-Earth Modeling Of Overhanging Cliffs – Extending 2.5-D Lidar Classifiers To Handle 3D Surface Classification Problems*. In: Proceedings of ASPRS Annual Conference 2012, Sacramento, California. 10 p.
- PALEČEK V., KUBÍČEK P. 2018. *Assessment of Accuracy in the Identification of Rock Formations from Aerial and Terrestrial Laser-Scanning Data*. ISPRS International Journal of Geo-Information, Basel: MDPI AG, Basel, Switzerland, 2018, roč. 7, č. 4, s. nestránkováno. ISSN 2220-9964. doi:10.3390/ijgi7040142.
- PFEIFER, N. 2005. *A subdivision algorithm for smooth 3D terrain models*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 59, p. 115–127.
- RUIZ, A.; KORNUS, W.; TALAYA, J.; COLOMER, J. L. 2004. *Terrain modeling in an extremely steep mountain: A combination of airborne and terrestrial lidar*. In: *Proceedings of the XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey*, vol. 35, part B3, p. 281–284.

ŠÍMA, J. 2011. *Nové zdroje geoprostorových dat pokrývajících celé území státu od roku 2010 – První výsledky výzkumu jejich kvalitativních parametrů*. Sborník – Symposium GIS Ostrava 2011, Ostrava, 23. - 26. ledna, VŠB-TU Ostrava (nestránkováno).

Seznam příloh

Příloha 1: Chybové matice pro různé hodnoty parametru sklon

Příloha 2: Chybové matice pro různé hodnoty minimálního počtu bodů v buňce N

Příloha 3: Chybové matice pro různé hodnoty výškového rozsahu buňky *ran*

Příloha 4: Chybové matice pro různé alternativy skriptu *detekce.py*

Příloha 5: Skript *detekce.py*

Příloha 1: Chybové matice pro různé hodnoty parametru sklon

| sklon > 60° | | | | |
|-------------------------|---|--|----------------|-----------------------------|
| | body vyhovující pro 2,5D model | body k vyloučení při tvorbě 2,5D modelu | celkem bodů | zpracovatelská přesnost |
| body vyhovující | 2 756 | 51 | 2 807 | 98,18 % |
| body k vyloučení | 193 | 538 | 731 | 73,60 % |
| celkem bodů | 2 949 | 589 | 3 538 | |
| uživatelská přesnost | 93,46 % | 91,34 % | | |
| | | | | celková přesnost 93,10 % |

| sklon > 70° | | | | |
|-------------------------|---|--|----------------|-----------------------------|
| | body vyhovující pro 2,5D model | body k vyloučení při tvorbě 2,5D modelu | celkem bodů | zpracovatelská přesnost |
| body vyhovující | 2 776 | 37 | 2 813 | 98,68 % |
| body k vyloučení | 173 | 552 | 725 | 76,14 % |
| celkem bodů | 2 949 | 589 | 3 538 | |
| uživatelská přesnost | 94,13 % | 93,72 % | | |
| | | | | celková přesnost 94,06 % |

| sklon > 80° | | | | |
|-------------------------|---|--|----------------|-----------------------------|
| | body vyhovující pro 2,5D model | body k vyloučení při tvorbě 2,5D modelu | celkem bodů | zpracovatelská přesnost |
| body vyhovující | 2 781 | 36 | 2 817 | 98,72 % |
| body k vyloučení | 168 | 553 | 721 | 76,70 % |
| celkem bodů | 2 949 | 589 | 3 538 | |
| uživatelská přesnost | 94,30 % | 93,89 % | | |
| | | | | celková přesnost 94,23 % |

| sklon > 85° | | | | |
|-------------------------|---|--|----------------|-----------------------------|
| | body vyhovující pro 2,5D model | body k vyloučení při tvorbě 2,5D modelu | celkem bodů | zpracovatelská přesnost |
| body vyhovující | 2 796 | 72 | 2 868 | 97,49 % |
| body k vyloučení | 153 | 517 | 670 | 77,16 % |
| celkem bodů | 2 949 | 589 | 3 538 | |
| uživatelská přesnost | 94,81 % | 87,78 % | | |
| | | | | celková přesnost 93,64 % |

Příloha 2: Chybové matice pro různé hodnoty minimálního počtu bodů v buňce N

| $N = 5$ | | | | |
|-------------------------|---|--|----------------|-----------------------------|
| | body vyhovující pro 2,5D model | body k vyloučení při tvorbě 2,5D modelu | celkem bodů | zpracovatelská přesnost |
| body vyhovující | 2 792 | 64 | 2 856 | 97,76 % |
| body k vyloučení | 157 | 525 | 682 | 76,98 % |
| celkem bodů | 2 949 | 589 | 3 538 | |
| uživatelská přesnost | 94,68 % | 89,13 % | | |
| | | | | celková přesnost 93,75 % |

| $N = 10$ | | | | |
|-------------------------|---|--|----------------|-----------------------------|
| | body vyhovující pro 2,5D model | body k vyloučení při tvorbě 2,5D modelu | celkem bodů | zpracovatelská přesnost |
| body vyhovující | 2 781 | 36 | 2 817 | 98,72 % |
| body k vyloučení | 168 | 553 | 721 | 76,70 % |
| celkem bodů | 2 949 | 589 | 3 538 | |
| uživatelská přesnost | 94,30 % | 93,89 % | | |
| | | | | celková přesnost 94,23 % |

| <i>N</i> = 15 | | | | |
|-------------------------|---|--|----------------|-----------------------------|
| | body vyhovující pro 2,5D model | body k vyloučení při tvorbě 2,5D modelu | celkem bodů | zpracovatelská přesnost |
| body vyhovující | 2 714 | 49 | 2 763 | 98,23 % |
| body k vyloučení | 235 | 540 | 775 | 69,68 % |
| celkem bodů | 2 949 | 589 | 3 538 | |
| uživatelská přesnost | 92,03 % | 91,68 % | | |
| | | | | celková přesnost 91,97 % |

| <i>N</i> = 20 | | | | |
|-------------------------|---|--|----------------|-----------------------------|
| | body vyhovující pro 2,5D model | body k vyloučení při tvorbě 2,5D modelu | celkem bodů | zpracovatelská přesnost |
| body vyhovující | 2 742 | 54 | 2 796 | 98,07 % |
| body k vyloučení | 207 | 535 | 742 | 72,10 % |
| celkem bodů | 2 949 | 589 | 3 538 | |
| uživatelská přesnost | 92,98 % | 90,83 % | | |
| | | | | celková přesnost 92,62 % |

Příloha 3: Chybové matice pro různé hodnoty výškového rozsahu buňky *r*

| <i>r</i> = 0,5· <i>cs</i> | | | | |
|---------------------------|---|--|----------------|-----------------------------|
| | body vyhovující pro 2,5D model | body k vyloučení při tvorbě 2,5D modelu | celkem bodů | zpracovatelská přesnost |
| body vyhovující | 2 735 | 32 | 2 767 | 98,84 % |
| body k vyloučení | 214 | 557 | 771 | 72,24 % |
| celkem bodů | 2 949 | 589 | 3 538 | |
| uživatelská přesnost | 92,74 % | 94,57 % | | |
| | | | | celková přesnost 93,05 % |

| <i>r = cs</i> | | | | |
|-------------------------|---|--|----------------|-----------------------------|
| | body vyhovující pro 2,5D model | body k vyloučení při tvorbě 2,5D modelu | celkem bodů | zpracovatelská přesnost |
| body vyhovující | 2 748 | 33 | 2 781 | 98,81 % |
| body k vyloučení | 201 | 556 | 757 | 73,45 % |
| celkem bodů | 2949 | 589 | 3538 | |
| uživatelská přesnost | 93,18 % | 94,40 % | | |
| | | | | celková přesnost 93,39 % |

| <i>r = 2·cs</i> | | | | |
|-------------------------|---|--|----------------|-----------------------------|
| | body vyhovující pro 2,5D model | body k vyloučení při tvorbě 2,5D modelu | celkem bodů | zpracovatelská přesnost |
| body vyhovující | 2 781 | 36 | 2 817 | 98,72 % |
| body k vyloučení | 168 | 553 | 721 | 76,70 % |
| celkem bodů | 2 949 | 589 | 3 538 | |
| uživatelská přesnost | 94,30 % | 93,89 % | | |
| | | | | celková přesnost 94,23 % |

Příloha 4: Chybové matice pro různé alternativy skriptu detekce.py

| skript <i>detekce2.py</i> | | | | |
|---------------------------|---|--|----------------|-----------------------------|
| | body vyhovující pro 2,5D model | body k vyloučení při tvorbě 2,5D modelu | celkem bodů | zpracovatelská přesnost |
| body vyhovující | 2 672 | 65 | 2 737 | 97,63 % |
| body k vyloučení | 277 | 524 | 801 | 65,42 % |
| celkem bodů | 2 949 | 589 | 3 538 | |
| uživatelská přesnost | 90,61 % | 88,96 % | | |
| | | | | celková přesnost 90,33 % |

| skript <i>detekce3.py</i> | | | | |
|---------------------------|---|--|----------------|-----------------------------|
| | body vyhovující pro 2,5D model | body k vyloučení při tvorbě 2,5D modelu | celkem bodů | zpracovatelská přesnost |
| body vyhovující | 2 849 | 213 | 3 062 | 93,04 % |
| body k vyloučení | 100 | 376 | 476 | 78,99 % |
| celkem bodů | 2 949 | 589 | 3 538 | |
| uživatelská přesnost | 96,61 % | 63,84 % | | |
| | | | | celková přesnost 91,15 % |

| skript <i>detekce4.py</i> | | | | |
|---------------------------|---|--|----------------|-----------------------------|
| | body vyhovující pro 2,5D model | body k vyloučení při tvorbě 2,5D modelu | celkem bodů | zpracovatelská přesnost |
| body vyhovující | 2 805 | 126 | 2 931 | 95,70 % |
| body k vyloučení | 144 | 463 | 607 | 76,28 % |
| celkem bodů | 2 949 | 589 | 3 538 | |
| uživatelská přesnost | 95,12 % | 78,61 % | | |
| | | | | celková přesnost 92,37 % |

Příloha 5: Skript *detekce.py*

```

import arcpy
import sys
import os
import math
from arcpy import env
from arcpy.sa import *
arcpy.env.overwriteOutput = 1

def sit (ws):
    arcpy.env.workspace = ws
    arcpy.MakeFeatureLayer_management("input.shp", "mracno")
    sr = arcpy.Describe("mracno").spatialReference
    arcpy.CreateFolder_management(ws, "mezisoubory")
    print 'pracuji'
    # vytvori puvodni TIN a vrstevnice
    arcpy.CreateTin_3d("tin_puvodni", sr, "mracno Shape.Z Mass_Points
    POINT_Z", "DELAUNAY")
    arcpy.SurfaceCountour_3d("tin_puvodni", "vrstevnice_puv.shp", "5", "0",
    "Contour")
    arcpy.DelineateTinDataArea_3d("tin_puvodni", 10, "PERIMETER_ONLY")
    arcpy.TinTriangle_3d("tin_puvodni", "mezisoubory\\trian.shp",
    "DEGREE", "1", "", "")
    arcpy.TinRaster_3d("tin_puvodni", "mezisoubory\\t2r_puv", "FLOAT",
    "LINEAR", "CELLSIZE 0,05", "1")
    arcpy.HillShade_3d("mezisoubory\\t2r_puv", "hs_puvodni", 315, 70)
    print 'puvodni TIN, vrstevnice a hillshade vytvoren'
    # vytvori vrstvu bodu z trojuhelniku se sklonem vetsim nez 80 stupnu
    - vstupni vrstva
    arcpy.MakeFeatureLayer_management("mezisoubory\\trian.shp",
    "trian_80", "\"Slope_Deg\" >80", "", "OID OID VISIBLE NONE;Shape
    Shape VISIBLE NONE;Slope_Deg Slope_Deg VISIBLE NONE;Aspect Aspect
    VISIBLE NONE;Tri_Index Tri_Index VISIBLE NONE")
    arcpy.Clip_analysis("mracno", "trian_80", "mezisoubory\\body_80.shp")
    arcpy.MakeFeatureLayer_management("mezisoubory\\body_80.shp",
    "vstup")
    print 'vstupni vrstva vytvorena'

    #vytvoreni site a
    extent = arcpy.Describe("vstup").extent
    width = extent.width
    height = extent.height
    area = width * height
    count = int(arcpy.GetCount_management("vstup").getOutput(0))
    dens = area/count
    #vypocet velikosti bunky site
    vel = math.sqrt(10/dens)
    print 'velikost bunky:' + str(vel)
    r = int(height/vel) + (height % vel > 0)
    c = int(width/vel) + (width % vel > 0)
    desc = desc = arcpy.Describe("vstup")
    arcpy.CreateFishnet_management("mezisoubory\\sit_a.shp",
    str(desc.extent.XMin) + " " + str(desc.extent.YMin),
    str(desc.extent.XMin) + " " + str(desc.extent.YMax), vel, vel, r, c,
    "", "NO_LABELS", "", "POLYGON")
    arcpy.DefineProjection_management("mezisoubory\\sit_a.shp", sr)

```

```

#intersect
arcpy.Intersect_analysis(["vstup","mezisoubory\\sit_a.shp"],
"mezisoubory\\sit_aint.shp", "ALL", "", "INPUT")
print 'sit a vytvorena'
# rozsah vysek bodu v bunce
arcpy.Statistics_analysis("mezisoubory\\sit_aint.shp",
"mezisoubory\\sita_range_std", "POINT_Z RANGE;POINT_Z STD",
"FID_sit_a")

arcpy.MakeFeatureLayer_management("mezisoubory\\sit_a.shp",
"mezisoubory\\sita_layer.shp")
arcpy.AddJoin_management("mezisoubory\\sita_layer.shp", "FID",
"mezisoubory\\sita_range_std", "FID_sit_a","KEEP_ALL")
arcpy.CopyFeatures_management("mezisoubory\\sita_layer.shp",
"mezisoubory\\sita_add.shp")
ran = vel*2

arcpy.MakeFeatureLayer_management("mezisoubory\\sita_add.shp",
"mezisoubory\\sita_w_r.shp", '"sita_add.sita_ran_4">' + "%s" %ran)
arcpy.CopyFeatures_management("mezisoubory\\sita_w_r.shp",
"mezisoubory\\sita_w_range.shp")
print 'spocitan vyskovy rozsah v siti a'

#sit a median
arcpy.Intersect_analysis(["vstup","mezisoubory\\sita_w_range.shp"],
"mezisoubory\\sita_r.shp", "ALL", "", "INPUT")
arcpy.CopyFeatures_management("mezisoubory\\sita_r.shp",
"mezisoubory\\sita_ri.shp")

arcpy.MedianCenter_stats("mezisoubory\\sita_ri.shp",
"mezisoubory\\sita_med.shp", "", "FID_sita_w", "POINT_Z")

arcpy.MakeFeatureLayer_management("mezisoubory\\sita_ri.shp",
"mezisoubory\\sita_ri_l.shp")
arcpy.AddJoin_management("mezisoubory\\sita_ri_l.shp", "FID_sita_w",
"mezisoubory\\sita_med.shp", "FID_sita_w","KEEP_ALL")
arcpy.CopyFeatures_management("mezisoubory\\sita_ri_l.shp",
"mezisoubory\\sita_m_add.shp")
print 'spocitan median v siti a'
# oznaceni bodu pod medianem
arcpy.MakeFeatureLayer_management("mezisoubory\\sita_m_add.shp",
"mezisoubory\\sita_pod_med.shp", '"sita_m_add.sita_ri_PO" <
"sita_m_add.sita_med_P"')
arcpy.AddField_management("mezisoubory\\sita_pod_med.shp", "med_a",
"LONG", "", "", "", "", "NULLABLE", "NON_REQUIRED", "")
arcpy.CopyFeatures_management("mezisoubory\\sita_pod_med.shp",
"mezisoubory\\sita_p_m.shp")
arcpy.CalculateField_management("mezisoubory\\sita_p_m.shp", "med_a",
"1", "PYTHON", "")
print 'nalezeny body pod medianem v siti a'

#vytvoreni posunute site b
vp = ((vel)/2)
arcpy.CreateFishnet_management("mezisoubory\\sit_b.shp",
str(desc.extent.XMin - vp) + " " + str(desc.extent.YMin - vp),
str(desc.extent.XMin+ vp) + " " + str(desc.extent.YMax+ vp), vel,
vel, r+1, c+1, "", "NO_LABELS", "", "POLYGON")

```

```
arcpy.DefineProjection_management("mezisoubory\\sit_b.shp", sr)
#intersect
arcpy.Intersect_analysis(["vstup","mezisoubory\\sit_b.shp"],
"mezisoubory\\sit_bint.shp", "ALL", "", "INPUT")
print 'sit b vytvorena'
# rozsah vysek bodu v bunce
arcpy.Statistics_analysis("mezisoubory\\sit_bint.shp",
"mezisoubory\\sitb_range_std", "POINT_Z RANGE;POINT_Z STD",
"FID_sit_b")

arcpy.MakeFeatureLayer_management("mezisoubory\\sit_b.shp",
"mezisoubory\\sitb_layer.shp")
arcpy.AddJoin_management("mezisoubory\\sitb_layer.shp", "FID",
"mezisoubory\\sitb_range_std", "FID_sit_b","KEEP_ALL")
arcpy.CopyFeatures_management("mezisoubory\\sitb_layer.shp",
"mezisoubory\\sitb_add.shp")

arcpy.MakeFeatureLayer_management("mezisoubory\\sitb_add.shp",
"mezisoubory\\sitb_w_r.shp", '"sitb_add.sitb_ran_4">' + "%s" %ran)
arcpy.CopyFeatures_management("mezisoubory\\sitb_w_r.shp",
"mezisoubory\\sitb_w_range.shp")
print 'spocitan vyskovy rozsah v siti b'

#sit b median
arcpy.Intersect_analysis(["vstup","mezisoubory\\sitb_w_range.shp"],
"mezisoubory\\sitb_r.shp", "ALL", "", "INPUT")
arcpy.CopyFeatures_management("mezisoubory\\sitb_r.shp",
"mezisoubory\\sitb_ri.shp")
arcpy.MedianCenter_stats("mezisoubory\\sitb_ri.shp",
"mezisoubory\\sitb_med.shp", "", "FID_sitb_w", "POINT_Z")

arcpy.MakeFeatureLayer_management("mezisoubory\\sitb_ri.shp",
"mezisoubory\\sitb_ri_l.shp")
arcpy.AddJoin_management("mezisoubory\\sitb_ri_l.shp", "FID_sitb_w",
"mezisoubory\\sitb_med.shp", "FID_sitb_w","KEEP_ALL")
arcpy.CopyFeatures_management("mezisoubory\\sitb_ri_l.shp",
"mezisoubory\\sitb_m_add.shp")
print 'spocitan median v siti b'

# oznaceni bodu pod medianem
arcpy.MakeFeatureLayer_management("mezisoubory\\sitb_m_add.shp",
"mezisoubory\\sitb_pod_med.shp", '"sitb_m_add.sitb_ri_PO" <
"sitb_m_add.sitb_med_P"')
arcpy.AddField_management("mezisoubory\\sitb_pod_med.shp", "med_b",
"LONG", "", "", "", "", "NULLABLE", "NON_REQUIRED", "")
arcpy.CopyFeatures_management("mezisoubory\\sitb_pod_med.shp",
"mezisoubory\\sitb_p_m.shp")
arcpy.CalculateField_management("mezisoubory\\sitb_p_m.shp", "med_b",
"1", "PYTHON", "")

arcpy.Clip_analysis("vstup", "mezisoubory\\sita_w_range.shp",
"mezisoubory\\body_range.shp", "")
arcpy.MakeFeatureLayer_management("mezisoubory\\body_range.shp",
"vstup2")
print 'nalezeny body pod medianem v siti b'
```

```

#finalni addjoin
arcpy.AddJoin_management("vstup2", "ID", "mezisoubory\\sita_p_m.shp",
"sita_ri_ID", "KEEP_ALL")
arcpy.AddJoin_management("vstup2", "ID", "mezisoubory\\sitb_p_m.shp",
"sitb_ri_ID", "KEEP_ALL")
arcpy.CopyFeatures_management("vstup2",
"mezisoubory\\hledam_med.shp")
arcpy.MakeFeatureLayer_management("mezisoubory\\hledam_med.shp",
"p_m.shp", '"sita_p_m_m" = "sitb_p_m_m" AND "sitb_p_m_m" = 1')
arcpy.CopyFeatures_management("p_m.shp", "pod_med.shp")
arcpy.Erase_analysis("mracno", "pod_med.shp", "n_vstup.shp", "")
print 'odstraneni bodu pod medianem dokonceno'

# vyuziti nastroju archydrotools
arcpy.CreateTin_3d("mezisoubory\\tin2", sr, "n_vstup.shp Shape.Z
Mass_Points POINT_Z", "DELAUNAY")
arcpy.TinRaster_3d("mezisoubory\\tin2", "mezisoubory\\t2r", "FLOAT",
"LINEAR", "CELLSIZE 0,05", "1")
arcpy.gp.Fill_sa("mezisoubory\\t2r", "mezisoubory\\fill", "")
rc_fi_m_t2r = Raster("mezisoubory\\fill") -
Raster("mezisoubory\\t2r")
rc_fi_m_t2r.save("rc_fi_m_t2r")
arcpy.Reclassify_3d("rc_fi_m_t2r", "VALUE", "0 0 0;0,0001 1000 1",
"mezisoubory\\reclass", "DATA")
arcpy.RasterToPolygon_conversion("mezisoubory\\reclass",
"mezisoubory\\recl_poly_shp", "NO_SIMPLIFY", "VALUE")
arcpy.MakeFeatureLayer_management("mezisoubory\\recl_poly_shp.shp",
"recl_poly_lay", "\"GRIDCODE\" =0", "", "")
arcpy.Intersect_analysis("n_vstup.shp #;recl_poly_lay #", "body_ok",
"ALL", "", "INPUT")
arcpy.Erase_analysis("mracno", "body_ok.shp", "body_pryc.shp", "")
# vytvori opraveny TIN, vrstevnice a hillshade
print 'vytvareni opraveného TIN, vrstevnic a hillshade'
arcpy.CreateTin_3d("tin_opraveno", sr, "body_ok.shp Shape.Z
Mass_Points POINT_Z", "DELAUNAY")
arcpy.TinRaster_3d("tin_opraveno", "mezisoubory\\t2r_opr", "FLOAT",
"LINEAR", "CELLSIZE 0,05", "1")
arcpy.HillShade_3d("mezisoubory\\t2r_opr", "hs_opraveno", 315, 70)
arcpy.SurfaceContour_3d("tin_opraveno", "contour.shp", "5", "0",
"Contour")

print 'hotovo'

```

```
sit(sys.argv[1])
```