

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

Přírodovědecká fakulta

Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie

Studijní program: Geografie (navazující magisterské studium)

Studijní obor: Kartografie a geoinformatika



Bc. Marián JANČOVIČ

**FILTRÁCIA DÁT LETECKÉHO LASEROVÉHO
SKENOVANIA**

FILTRATION OF AIRBORNE LASERSCANNING DATA

Diplomová práce

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

Praha 2018

Vysoká škola: Univerzita Karlova v Praze

Fakulta: Přírodovědecká

Katedra: Aplikované geoinformatiky a kartografie

Školní rok: 2017/18

Zadání diplomové práce

pro Bc. Mariána JANČOVIČA

obor Kartografie a geoinformatika

Název tématu: Filtrácia dát leteckého laserového skenovania

Zásady pro vypracování

Hlavním cílem diplomové práce je analyzovat možnosti prostorově podmíněné filtrace dat LLS za účelem tvorby DMR v různých typech členitého terénu. Při práci budou využita zejména data DMR 5G a nástroje lastools. Dílčí cíle práce jsou následující:

- identifikovat a zhodnotit existující metody pro prostorově podmíněnou filtraci dat LLS,
- návrh vlastní metody, zaměřené zejména na automatickou tvorbu oblastí, kde budou použity určité parametry filtrace,
- implementace metody v podobě skriptů pro ArcGIS 10,
- testování navrženého postupu nad reálnými daty,
- zhodnocení přesnosti výstupů a jejich porovnání s existujícími DMR, zejména těmi vytvořenými s využitím manuální klasifikace bodového mračna.

Rozsah grafických prací: podle potřeby

Rozsah průvodní zprávy: cca 50 – 60 stran

Seznam odborné literatury:

BRIESE, CH., 2010: Extraction of digital terrain models. In: Vosselmann, G., Maas, H.-G.: *Airborne and terrestrial laser scanning*. Dunbeath, Scotland 2010: Whittles Pub., 318 s.

LYSÁK, J., 2016: Topografické mapování skalních útvarů s využitím dat leteckého laserového skenování. Dizertační práce. Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie PřF UK, Praha, 248 s.

TROMMLER, M., CSAPLOVICS, E., 2006: Geoinformationsnetzwerke für die grenzüberschreitende Nationalparkregion Böhmisches-Sächsische Schweiz. In: Strobl, J., Blaschke, T. & Griesebner, G. (Hrsg.): *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung, Beiträge zum 18. AGIT-Symposium*, Salzburg 2006, s. 657 – 662.

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

Datum zadání diplomové práce: 18. 1. 2017

Termín odevzdání diplomové práce: srpen 2018

Platnost tohoto zadání je po dobu jednoho akademického roku.

.....

Vedoucí diplomové práce

.....

Vedoucí katedry

V Praze dne

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval/a samostatně a že jsem uvedl/a 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. 2018

.....

podpis

Pod'akovanie

Na tomto mieste by som rád pod'akoval RNDr. Jakubovi Lysákovi za spoluprácu, poskytnuté rady a pripomienky a všetok venovaný čas. Taktiež by som rád pod'akoval Zeměměřickému úřadu za vypožičanie dát potrebných na vypracovanie tejto práce. Vďaka patrí aj mojim najbližším za podporu pri spracovaní práce a v priebehu celého štúdia.

Filtrácia dát leteckého laserového skenovania

Abstrakt

Práca sa zaoberá automatizovanou klasifikáciou oblastí s rôznymi typmi povrchu v skalných mestách. Tieto oblasti vstupujú do filtrácie dát leteckého laserového skenovania, pričom každá z oblastí je filtrovaná s inými parametrami. Dôvodom pre takýto prístup je extrémna členitosť a hustá vegetácia typická pre skalné mestá, čo zapríčiňuje nedostatočnosť väčšiny bežných filtračných algoritmov aplikovaných s rovnakými parametrami na celé územie. Nami navrhnutá metodika spočíva v rozdelení záujmového územia do troch oblastí: oblasti budov, oblasti skál a oblasti vegetácie (resp. oblasti, v ktorej nie sú ani skaly, ani budovy). Každá z nich má pri následnej filtrácii špecifické parametre, ktoré reflektujú charakter danej oblasti.

Kľúčové slová:

letecké laserové skenovanie, DMR, skalné mestá, priestorovo podmienená filtrácia

Filtration of Airborne Laserscanning Data

Abstract

The diploma thesis deals with automatized area classification with different surfaces in rocky towns. These areas are input into Airborne Laser-Scanning data filtration, where each of the areas is filtered with different parameters. The reason for this approach is the extreme height variety and dense vegetation typical for rocky towns, which causes the inadequacy of most common filtration algorithms applied with the same set of parameters for whole area. The methodic proposed by us consists of splitting the area of interest into three parts: Residential area, rocky area and area of vegetation (i.e. area that doesn't contain rocks or buildings). Each of these has special parameters applied during the following filtration, which reflect its characteristics.

Key words:

laser scanning, DTM, rocky towns, area based filtration

OBSAH

Prehľad použitých skratiek.....	9
Zoznam obrázkov.....	10
Zoznam tabuliek.....	11
1 Úvod.....	12
2 Filtrácia dát LLS.....	14
2.1 Morfológické filtre	15
2.2 Filtrácia postupným zahusťovaním	17
2.3 Povrchovo založená filtrácia	18
2.4 Segmentačne založená filtrácia	20
2.5 Priestorovo podmienená filtrácia.....	21
2.6 Filtrácia LLS v pieskovcových skalných mestách	22
2.6.1 Charakter bodového mračna.....	22
2.6.2 Filtrácia.....	24
3 Metodika spracovania	28
3.1 Záujmové územie	28
3.1.1 České Švajčiarsko	29
3.2 Dáta.....	30
3.3 Princíp algoritmu	32
3.4 Oblasť budov	34
3.5 Oblasť skál.....	35
3.5.1 Potenciálne skalné oblasti	35
3.5.2 Rekonštrukcia tvaru skál	37
3.6 Oblasť vegetácie	38
3.7 Použitý softvér.....	38
4 Verifikácia a výsledky.....	40
4.1 Verifikácia	40

4.1.1	Presnosť vymedzenia oblastí.....	40
4.1.2	Presnosť filtrácie	43
4.2	Výsledky.....	46
4.2.1	Presnosť vymedzenia oblastí.....	46
4.2.2	Presnosť filtrácie	49
5	Diskusia.....	53
6	Záver.....	59
	Zdroje	61
	Zoznam príloh	65

PREHĽAD POUŽITÝCH SKRATIEK

ČUZK	Český úřad zeměměřický a katastrální
DMP	digitální model povrchu
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
GeNeSiS	Geoinformationsnetzwerke für die grenzüberschreitende Nationalparkregion Sächsisch-Böhmische Schweiz (Geoinformačné siete pre cezhraničný región národných parkov České a Saské Švajčiarsko)
IMU	inertial measurement unit (inerciálna meračská jednotka)
LiDAR	Light Detection And Ranging
LLS	letecké laserové skenovanie
NP	národný park
OSM	OpenStreetMap
RMSE	root mean square error (stredná kvadratická chyba)
RÚIAN	registr územní identifikace, adres a nemovitostí
TIN	triangulated irregular network (nepravidelná sieť trojuholníkov)
TUD	Technische Universität Dresden (Technická univerzita v Drážďanoch)
UAV	Unmanned air vehicle (bezpilotný vzdušný prostriedok)
ZABAGED®	Základní báze geografických dat
ZÚ	Zeměměřický úřad

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1: Princíp leteckého laserového skenovania.	14
Obr. 2: Morfológické operácie na binárnom obraze	16
Obr. 3: Morfológický filter.....	17
Obr. 4: Reprezentatívny trojuholník TIN so znázornenými filtračnými kritériami	18
Obr. 5: Príklad váhovej funkcie robustnej interpolácie.....	19
Obr. 6: Priebeh hierarchickej robustnej interpolácie.....	20
Obr. 7: Segmentované dáta LLS	21
Obr. 8: Problém rozlíšenia skál a vegetácie	23
Obr. 9: Multipath efekt.....	24
Obr. 10: Vľavo: Tieňovaný reliéf z dát LLS v Českom Švajčiarsku, Vpravo: To isté územie. Vyčlenená oblasť s jednoduchou topografiou (biela) a oblasť skál (šedá)	26
Obr. 11: Záujmové územie.....	29
Obr. 12: Pravčická brána.....	30
Obr. 13: Oblasti snímania dát Projektu tvorby nového výškopisu ČR	31
Obr. 14: Terén (hnedá), definovaná oblasť skál projektu GeNeSiS (červená) a nami definovaná oblasť skál (modrá)	33
Obr. 15: Sokolí hnízdo- zámok v blízkosti Pravčickej brány	34
Obr. 16: Profil skalnatým územím	35
Obr. 17: Reklasifikovaný sklon terénu v okolí Pravčickej brány (prvá iterácia).....	36
Obr. 18: Reklasifikovaný sklon terénu v okolí Pravčickej brány (druhá iterácia).....	37
Obr. 19: Oblasť skál v okolí Pravčickej brány na podklade tieňovaného reliéfu	38
Obr. 20: Reklasifikovaný sklon terénu.....	42
Obr. 21: Testovacie podoblasti parametrov prvotnej filtrácie.....	43
Obr. 22: Rozloženie kontrolných bodov	44
Obr. 23: Dátové súbory testovacích oblastí	45
Obr. 24: Pravidelná bodová sieť pod terénom	51

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 1: Intervaly sklonu terénu	36
Tab. 2: Parametre variantov porovnávaných s vektorom oblastí TUD.....	46
Tab. 3: Parametre filtrácie variantov vymedzenia oblasti skál	47
Tab. 4: Presnosti vymedzenia skál	48
Tab. 5: Popis variantov filtrácie	50
Tab. 6: Parametre filtrácie jednotlivých variantov	50
Tab. 7: Chyby filtrácie	51

1 ÚVOD

Jednou z metód zberu polohových dát, ktorá je v poslednej dobe veľmi využívaná a intenzívne sa vyvíjajúca, je letecké laserové skenovanie (LLS). Laserový skener (LiDAR) pripevnený k lietadlu či UAV vie za krátky čas nasnímať relatívne veľké územie s vysokou hustotou bodového mračna s vyhovujúcou výškovou aj polohovou presnosťou. Využitie týchto dát je veľmi široké. S ich pomocou sa dá napríklad merať výška lesného porastu, mapovať komunikácie alebo drôty elektrického vedenia, no využitie nachádza aj v urbanizme či archeológii. Dôležitým produktom, pri ktorého tvorbe môžu byť dáta z LLS využité, je digitálny model reliéfu (DMR). Ten je podkladom pre rôzne morfometrické analýzy, ktoré sa používajú napríklad pri stavbe komunikácií či vodných nádrží. Okrem toho je potrebný aj pri tvorbe ortofotomáp, pri korekciách družicových či leteckých snímok alebo pri tvorbe 3D modelov miest. No lidar nesníma iba reliéf, ale aj objekty ležiace nad ním, ako vegetácia alebo zástavba. Odstránenie takýchto objektov sa nazýva filtrácia a využívajú sa na to rôzne automatizované postupy.

Väčšina filtračných algoritmov však počíta s tým, že terén je spojitý, pozvoľne sa meniaci povrch. To síce platí pre väčšinu zemského povrchu, no niektoré typy krajín tvoria výnimky. Príkladom sú pieskovcové skalné mestá so skalnými útvarmi, na ktorých rozmedzí je výškový rozdiel rádovo aj v desiatkách metrov pri posune o meter v horizontálnom smere. V takých miestach bežné filtračné algoritmy eliminujú aj značnú časť terénnych bodov, čo má za následok, že výsledná digitálna reprezentácia reliéfu je nepresná a tým pádom aj nespoľahlivá. Z toho dôvodu je v prostredí pieskovcových skalných miest nutné použiť špecifické prístupy k filtrácii dát LLS. Návrhu jedného z týchto prístupov sa venuje aj táto práca, konkrétne tzv. priestorovo podmienenej filtrácii, pri ktorej je skúmané územie rozdelené do podoblastí so špecifickými typmi objektov, pričom každá z týchto podoblastí je filtrovaná inak.

Hlavným cieľom diplomovej práce je teda klasifikácia areálov s rôznymi typmi povrchu a analýza možností ich využitia v priestorovo podmienenej filtrácii dát LLS za účelom tvorby DMR v rôznych typoch členitého terénu. Pri práci budú využité hlavne dáta DMR 5G a nástroje Lastools. Medzi čiastkové ciele patrí identifikácia a zhodnotenie existujúcich metód pre priestorovo podmienenú filtráciu dát LLS, návrh vlastnej metódy zameranej predovšetkým na automatickú tvorbu oblastí, kde budú použité určité parametre filtrácie. Okrem toho je cieľom aj implementácia metódy v podobe skriptov pre ArcGIS 10, testovanie navrhnutého postupu

nad reálnymi dátami a v neposlednej rade zhodnotenie presnosti výstupov a ich porovnanie s existujúcimi DMR, najmä tými, ktoré boli vytvorené s využitím manuálnej klasifikácie bodového mračna.

Úvodná kapitola sa venuje teórii využívanej vo filtrácii dát LLS. Okrem všeobecného uvedenia do tejto problematiky na začiatku kapitoly, sa v nej nachádza bližší popis rôznych filtračných metód. V závere kapitoly je zas rozobratá filtrácia v pieskovcových skalných mestách, spolu s jej špecifikami a postupmi, ktoré boli v minulosti použité na filtráciu v tomto jedinečnom type krajiny. Nasleduje kapitola venujúca sa teoretickej časti nášho experimentu. V jednotlivých podkapitolách je predstavená záujmová lokalita, použité dáta, no ťažiskom kapitoly je popis nami navrhnutého algoritmu slúžiaceho na automatizovanú tvorbu oblastí vstupujúcich do priestorovo podmienenej filtrácie. Štvrtá kapitola sa venuje jednak spôsobu overenia správnosti a účinnosti nášho postupu, v druhej časti sú však vypísané konkrétne výsledky, spoločne s príslušnými obrázkami a tabuľkami a ich interpretáciou. V posledných kapitolách sú zhrnuté výsledky spolu s návrhmi možných úprav postupu.

2 FILTRÁCIA DÁT LLS

LLS je metóda zberu dát, pri ktorej získavame polohu bodov na zemskom povrchu určením vzdialenosti medzi danými bodmi a laserovým skenerom. Táto vzdialenosť je vypočítaná na základe času, ktorý uplynie medzi vyslaním a prijatím zväzku laserových lúčov. Smer zväzku lúčov je určený za pomoci inerciálnej meracej jednotky (IMU) a polohu skeneru zistíme s využitím GNSS, ktorá zároveň tiež synchronizuje čas ostatných meracích systémov (Dolanský, 2004). Princíp leteckého lidararu je zobrazený na obrázku 1.



Obr. 1: Princíp leteckého laserového skenovania, zdroj: Hanus a Kasper, 2013.

Výsledkom merania je potom bodové mračno určené súradnicami X, Y, Z s doplnkovými údajmi o zachytených lúčoch, no chýba nám údaj o tom, akému typu krajinej pokrývky náležia jednotlivé body. Preto je pri procese tvorby DMR dôležitým krokom filtrácia, tj. rozdelenie bodového mračna na body náležiacie terénu a body nachádzajúce sa mimo terénu, ako sú napríklad budovy alebo vegetácia.

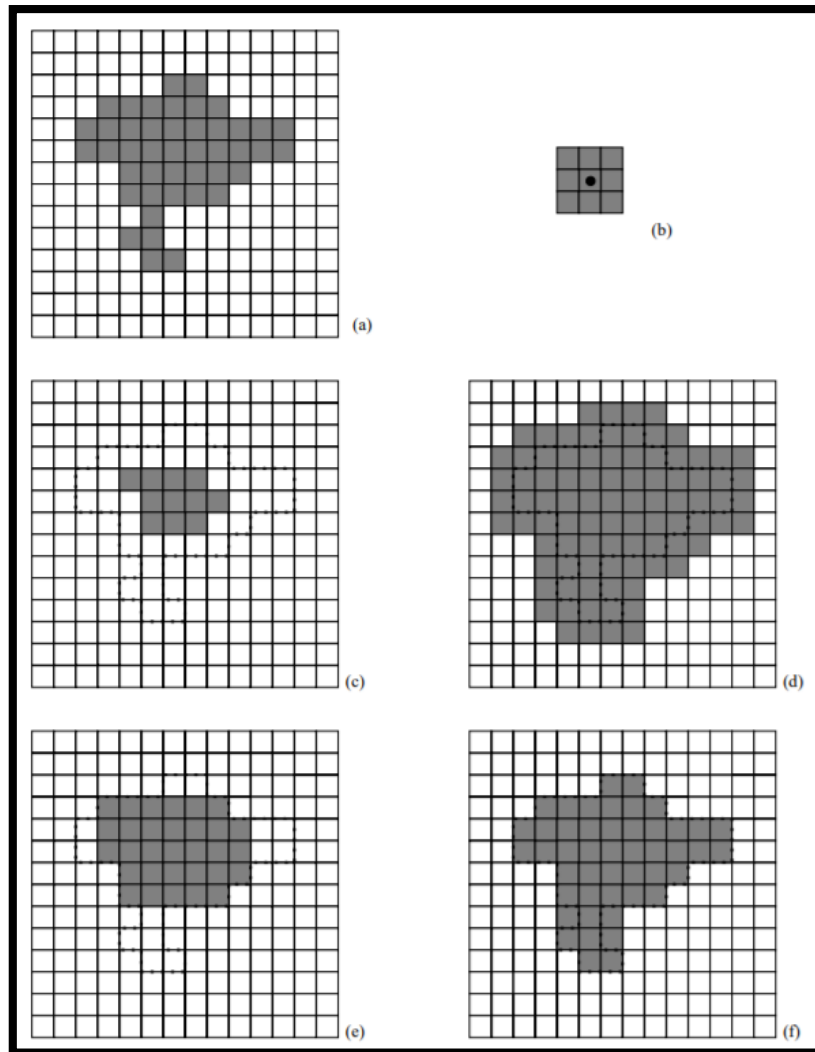
Manuálne riešenie filtrácie je síce teoreticky možné, no vzhľadom na obrovský objem dát by zabralo príliš veľa času. Preto sa už od počiatku vývoja LLS venuje značná pozornosť algoritmom na automatickú filtráciu bodového mračna (Sithole a Vosselman, 2004). Najčastejšie sa pri filtrácii dát LLS využívajú geometrické vlastnosti bodového mračna, ako napríklad rozdiel medzi najvyšším a najnižším bodom v oblasti, výškový rozdiel medzi bodom a jeho okolím, vzdialenosť bodov od parametrizovaného povrchu alebo roviny odvodenéj

z bodov terénu (Badea, Jacobsen, 2008). Niektoré filtračné algoritmy pracujú aj s údajom o intenzite odrazu. Tieto metódy však nie sú veľmi rozšírené hlavne kvôli tomu, že intenzita odrazu nie je u jednotlivých senzorov normalizovaná, a preto je náročnejšie vyvinúť metódu, ktorá by bola aplikovateľná na rôzne senzory (Höfle a Pfeifer, 2007). Ďalšou z možností je napríklad objektový prístup, ktorý využíva namiesto bodu ako základný prvok zhuk susediacich bodov s určitou mierou homogenity (Tóvári a Pfeifer, 2005).

Briese v roku 2010 klasifikoval filtračné metódy do nasledujúcich štyroch skupín: *morphological filtering* (morfologické filtre), *progressive densification* (filtrácia postupným zahusťovaním), *surface-based filtering* (povrchovo založená filtrácia), *segment-based filtering* (segmentačne založená filtrácia).

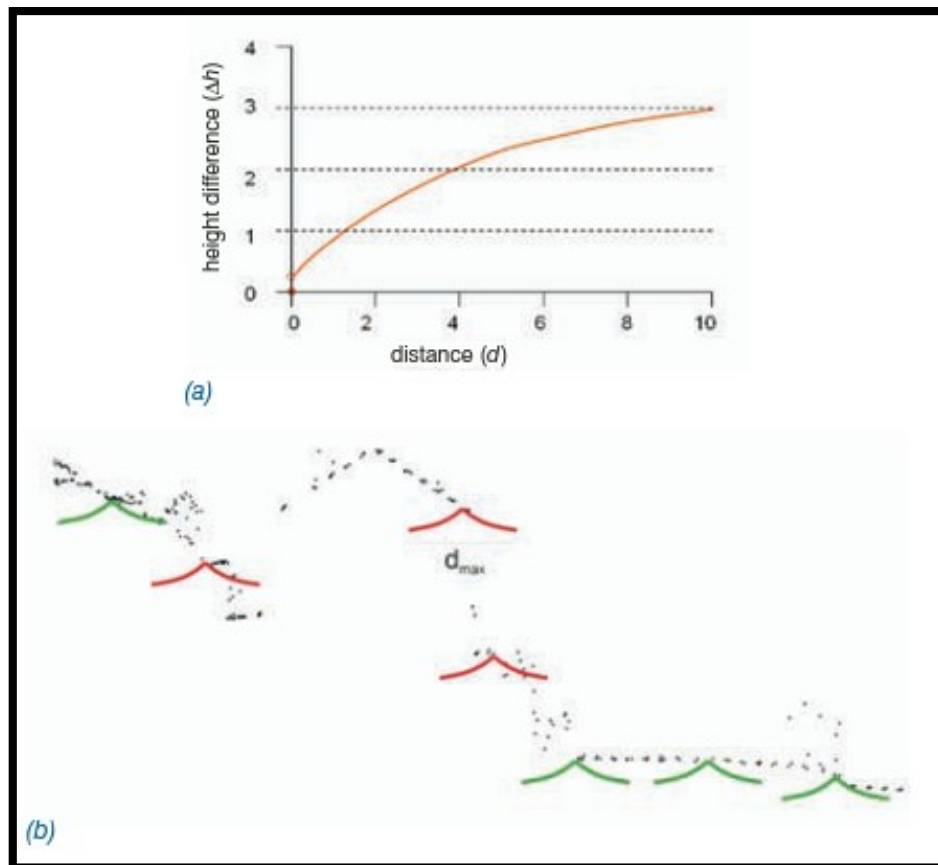
2.1 Morfologické filtre

Táto skupina filtračných algoritmov je založená na matematickej morfológii, čo je prístup k obrazovej analýze vychádzajúci z teórie množín, využívaný hlavne v binárnych obrazoch (Haralick a Shapiro, 1992). Základom tohto prístupu je štruktúrally element, ktorý vyčleňuje množinu obrazových prvkov, na ktoré sú použité operátory. V prípade práce s 3D dátami, môže byť štruktúrally element napríklad valec, guľa, kužeľ a podobne (Haralick a Shapiro, 1992). Operátor je funkcia, ktorá transformuje množiny v rámci štruktúrálneho elementu. Najbežnejšie využívanými operátormi sú erózia, ktorá množinu znižuje a jej doplnok dilatácia, ktorá danú množinu zväčšuje. Môžeme ich aj kombinovať, a keďže tieto operátory nie sú komutatívne, vzniknú dve operácie: otvorenie a uzavretie (obr. 2).



Obr. 2: Morfológické operácie na binárnom obraze, a) pôvodný obraz, b) štruktúrálny element, c) erózia, d) dilatácia, e) otvorenie, f) uzavretie, zdroj: Haralick a Shapiro, 1992

Príkladom je napríklad filter využívajúci sklon (Vosselman, 2000), ktorý vychádza z predpokladu, že výškový rozdiel objektov je priamo úmerný ich vzdialenosti (obr. 3). Ako štruktúrálny element bol použitý kužeľ, v ktorého vrchole je záujmový bod, pričom je klasifikovaný ako neterénny v prípade, že sa vo vnútri kužeľu nachádza iný bod. Takýmto spôsobom sú postupne prejdene všetky body v dátovej sade.



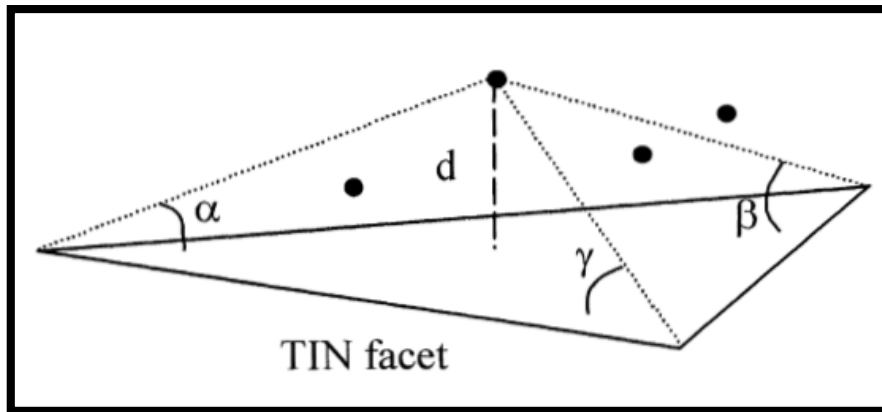
Obr. 3: a) očakávaný výškový rozdiel medzi dvoma bodmi ako funkcia vzdialenosti bodov, b) profil bodov LLS (čierne bodky) so znázornenými štruktúrnymi elementami. zelený element- terénny bod, červený element- neterénny bod, zdroj: Briese, 2010

2.2 Filtrácia postupným zahusťovaním

Táto skupina filtrov je založená na počiatocnom hrubom odhade terénu a jeho postupnom zahusťovaní. Najčastejšie sa na to využíva nepravidelná sieť trojuholníkov (TIN). Počiatocný odhad terénu môže byť založený na predošlej hrubej filtrácii (Axelsson, 2000) alebo je stanovený štyrmi bodmi ohraničujúcimi dátovú sadu (Sohn a Dowman, 2002).

Pri metóde postupného zahusťovania TIN (Axelsson, 2000) je prvotný odhad terénu dosiahnutý rozdelením dát do relatívne veľkých buniek, pričom najnižší bod z každej bunky je klasifikovaný ako terénny a z týchto bodov je následne generovaný TIN. Ďalej je každému trojuholníku pridaný nový bod, pokiaľ spĺňa nasledujúce kritéria (obr. 4):

- uhly medzi bodom, vrcholmi a rovinou trojuholníka sú menšie ako stanovená hodnota,
- vzdialenosť medzi bodom a rovinou trojuholníka je menšia ako stanovená maximálna vzdialenosť.



Obr. 4: Repräsentatívny trojuholník TIN so znázornenými filtračnými kritériami, zdroj: Axelsson, 2000

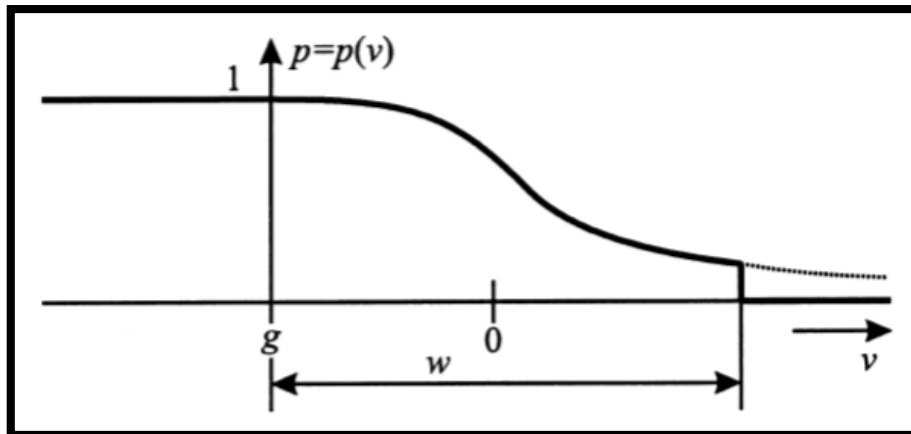
Tento proces je iteratívny, pričom je TIN prepočítané pri každom opakovaní a zastaví sa v okamihu, keď žiaden ďalší bod nespĺňa spomínané kritéria.

2.3 Povrchovo založená filtrácia

Podobne ako v prípade algoritmov založených na postupnom zahusťovaní, aj v tomto prípade prebieha filtrácia s využitím povrchu aproximovaného z bodového mračna. Rozdiel je v tom, že kým v predošlom prípade bolo spočiatku bodov označených ako terénne iba minimum a postupne pribúdali, povrchovo založené algoritmy pracujú opačne. V prvej fáze sú všetky body označené ako terénne a postupne sa znižuje a odstraňuje vplyv tých bodov, ktoré nevyhovujú danému modelu povrchu.

Príkladom je robustná interpolácia (Kraus a Pfeifer, 1998), ktorá kombinuje filtráciu s interpoláciou. Jednotlivým bodom je z definovanej váhovej funkcie (obr. 5) vypočítaná váha, ktorá vstupuje do interpolácie. Celý proces je iteratívny a prebieha v troch krokoch:

1. Interpolácia povrchu na základe váh jednotlivých bodov (v prvej iterácii majú všetky body rovnakú váhu),
2. Výpočet rezíduí bodov od povrchu (body pod povrchom majú negatívne hodnoty),
3. Prepočet váh bodov podľa hodnôt rezíduí a váhovej funkcie.



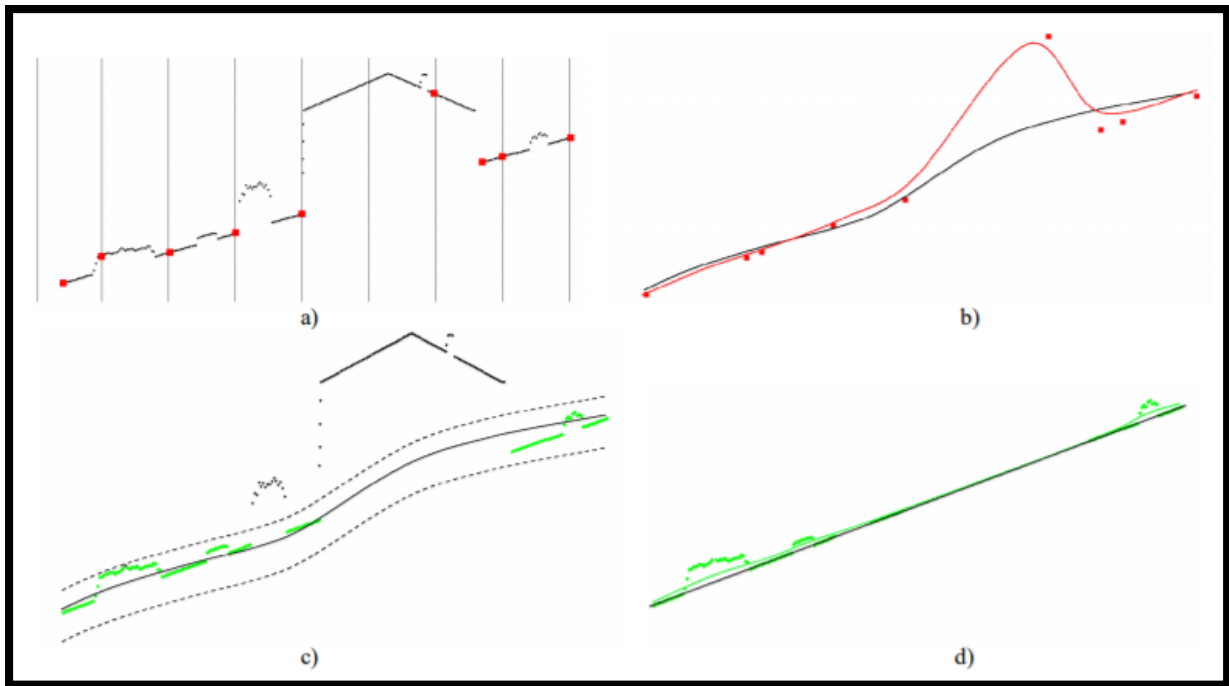
Obr. 5: Príklad váhovej funkcie robustnej interpolácie, zdroj: Kraus a Pfeifer, 1998

Pri bežne používanej váhovej funkcii (obr. 5) sú body nachádzajúce sa pod interpolovaným povrchom považované za terénne a majú hodnotu váhy až 1 a body nad povrchom majú váhu nižšiu, nepriamo úmernú vzdialenosti od povrchu. Proces prebieha dovtedy, kým váhy bodov nie sú stabilné, alebo nie je dosiahnutý maximálny počet iterácií. Výsledkom je okrem klasifikácie bodov na terénne a neterénne aj interpolovaný povrch.

Robustná interpolácia ako taká bola navrhnutá na aplikáciu slúžiaca na filtráciu v zalesnených oblastiach (Pfeifer a kol., 2001). Na jej správne fungovanie je potrebné, aby v jednotlivých mikroregiónoch bolo zastúpenie terénnych bodov. To spôsobuje problém s odstránením väčších súvislých neterénnych plôch, ako sú napríklad budovy, a preto dosahuje v zastavanej krajine horšie výsledky. Kvôli tomu bol pôvodný algoritmus robustnej interpolácie rozšírený o hierarchický prístup, ktorý zlepšuje filtráciu práve v týchto oblastiach (Briese a kol., 2002). Je založený na prístupe podobnom obrazovým pyramídami pri spracovaní obrazu. Celý proces prebieha v troch krokoch, ktoré sa opakujú:

1. Vytvorenie dátových pyramíd s nízkym rozlíšením (obr. 6a),
2. Použitie robustnej interpolácie na vytvorenie DMR, začína na dátových pyramídach s najnižším priestorovým rozlíšením (obr. 6b),
3. Porovnanie s dátovými pyramídami s vyšším priestorovým rozlíšením, pridanie bodov so vzdialenosťou menšou ako je prahová hodnota (obr. 6c).

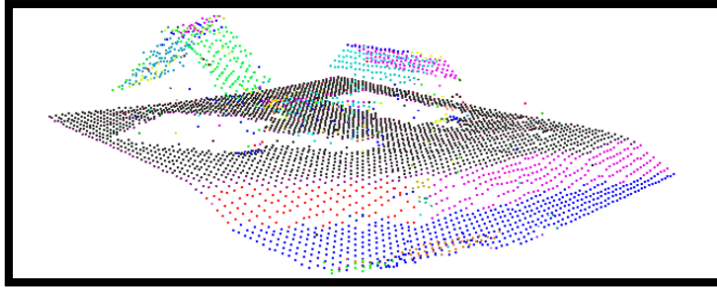
Kroky 2 a 3 sa opakujú pre každú úroveň.



Obr. 6: Priebeh hierarchickej robustnej interpolácie, a) Tvorba dátových pyramíd, čierne body sú pôvodné dáta, červené dátové pyramídy (najnižšie body v pravidelnej sieti), b) Tvorba DMR robustnou interpoláciou na najnižšej úrovni rozlíšenia. Prvá a posledná iterácia, c) Hrubé DMR s vyznačenou prahovou vzdialenosťou, d) Tvorba DMR robustnou interpoláciou na najvyššej úrovni rozlíšenia. Prvá a posledná iterácia. zdroj: Briese a kol., 2002

2.4 Segmentačne založená filtrácia

Na rozdiel od predchádzajúcich metód, ktorých základným klasifikovaným prvkom bol bod, segmentačne založené metódy pracujú so segmentom, čo je zhuk susediacich bodov s podobnými vlastnosťami. Výhodou tohto prístupu je, že neporovnávame iba bod s bodom, alebo bod s rovinou, ale vďaka vlastnostiam jednotlivých zhukov a ich vzťahu k susedným segmentom, vieme body lepšie zasadiť do kontextu krajiny. Tieto metódy pozostávajú z dvoch hlavných krokov. Prvým je proces tvorby segmentov, nazývaný segmentácia (obr. 7) a druhým samotná filtrácia. Na každú z týchto častí môžeme použiť viaceré metódy. V prípade segmentácie to je napríklad *seeded region growing* (Tóvári, Pfeifer, 2005), *scan line segmentation* (Sithole, Vosselmann 2005) alebo *clustering* (Filin, 2002) a na filtráciu sú použiteľné modifikované verzie väčšiny algoritmov spomínaných v predošlých kapitolách.



Obr. 7: Segmentované dáta LLS, zdroj: Tóvári a Pfeifer, 2005

Tóvári a Pfeifer (2005) napríklad použili na segmentáciu metódu seeded region growing. Pri tvorbe segmentov sa testuje, či by susedné body mohli tvoriť spojitý a hladký povrch. Zhluk sa rozširuje o susedné body ak je ich kolmá vzdialenosť k tomuto povrchu nižšia ako prahová hodnota. Proces prebieha dokiaľ niektoré body spĺňajú definované podmienky a segmenty s malým počtom bodov sú odstránené. Na filtráciu potom použili modifikovanú robustnú interpoláciu (kap. 2.3), ktorej váhy sa počítajú segmentom, nie bodom.

2.5 Priestorovo podmienená filtrácia

Každý typ krajiny má svoje špecifické charakteristiky, ktoré sa prejavujú aj na dátach LLS, a preto musíme k rôznym typom terénu pristupovať odlišne. Najčastejšie je tento problém riešený použitím určitých parametrov filtrácie na každý typ územia. To sa však stáva neefektívnym v prípade, že má územie zložitejšiu topografiu a striedajú sa v ňom rôzne typy terénu. Príkladom sú skalné mestá, kde sa striedajú rozličné skalné útvary s bežnými typmi terénu. Ako riešenie sa ponúka priestorovo podmienená filtrácia, pri ktorej najprv vyznačíme oblasti s jednotlivými typmi terénu a následne spustíme na každú z týchto oblastí filtráciu so špecifickými parametrami. Riešenie priestorovo podmienenej filtrácie sa takýmto spôsobom dá rozdeliť do dvoch častí:

- vyčlenenie jednotlivých oblastí,
- filtrácia: výber metódy a nastavenie parametrov filtrácie každej oblasti.

Správne vyčlenenie oblastí je základným problémom priestorovo podmienenej filtrácie. Pri jeho riešení je prvotnou otázkou definovanie jednotlivých typov územia. Je na to potrebná určitá znalosť záujmového územia a jeho konkrétnych špecifik. Každá takáto oblasť by mala zodpovedať jednému typu krajiny, tak aby na ňu boli použiteľné jednotné parametre filtrácie, aby výsledný DMR zodpovedal čo najviac skutočnému terénu. Ďalším krokom je potom samotné vyčlenenie oblastí. To môžeme uskutočniť buď manuálne, alebo automaticky. Manuálne riešenie však závisí od zručnosti osoby, ktorá areály vyznačuje, zatiaľ čo automatizovaný proces produkuje pri rovnakých dátach stabilné výsledky. Okrem toho môžeme

pri vyčleňovaní oblastí pracovať iba s informáciami obsiahnutými v bodovom mračne, ako je geometria bodov alebo doplnkové informácie. Tento prístup je síce nenáročný na vstupné dáta, no je limitovaný obsahom informácie. Nedostatočná hustota bodového mračna, dostupnosť doplnkových informácií, či celkový nedostatok informácie na rozlíšenie požadovaných typov krajiny sú možnými komplikáciami. Ako riešenie sa ponúka využitie rôznych pomocných dát, ako napríklad tieňovaný reliéf alebo snímky z optických senzorov. Takéto riešenie sa však príliš spolieha na ďalšie dáta, ktoré nemusia byť vždy v požadovanej kvalite, alebo môžu byť pre konkrétne územie nedostupné.

S vytýčenými oblasťami je ďalšou, nemenej dôležitou úlohou, správne nastavenie parametrov pre každú z oblastí. Nech by boli oblasti vyznačené akokoľvek presne, so zle nastavenými parametrami by to bolo zbytočné. Z toho dôvodu by mali byť parametre zvolené starostlivo tak, aby brali do úvahy charakter územia. Okrem toho je dôležitým faktorom aj výber filtračného algoritmu. Jednotlivé metódy dosahujú v odlišných typoch krajiny inú kvalitu výsledkov, čo treba mať na pamäti pri návrhu postupu spracovania dát LLS. Priestorovo podmienenú filtráciu využili pri tvorbe DMR napríklad Trommler a Csaplovics (2006).

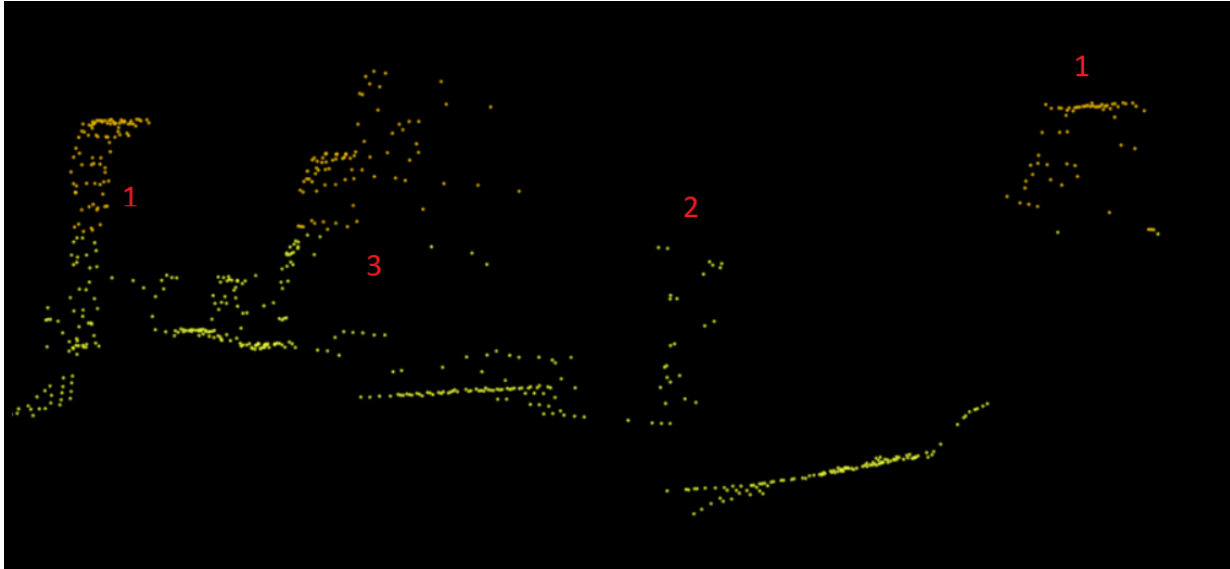
2.6 Filtrácia LLS v pieskovcových skalných mestách

Hlavnou témou tejto práce bola filtrácia dát LLS práve v pieskovcových skalných mestách. Pre tento typ krajiny sú typické formy reliéfu vyznačujúce sa výrazne vyššou výškovou členitosťou oproti bežnej krajine, následkom čoho je väčšina základných filtračných metód v podstate nepoužiteľná. To dáva priestor na experimenty s bežne používanými algoritmami a na ich prispôbenie danej topografii. Totiž práve lidarové dáta majú najväčší potenciál zachytiť tvar skalných štruktúr, pretože na rozdiel od optických dát dokážu z časti prekonať najmä ihličnatú vegetáciu, ktorá je v tejto krajine častým javom, nezávisle od ročného obdobia.

2.6.1 Charakter bodového mračna

Okrem typických foriem reliéfu, akými sú skalné veže, kaňony, či stolové hory, je rovnako pre pieskovcové skalné mestá prirodzenou súčasťou aj prítomnosť vysokej vegetácie. Jedná sa zväčša o ihličnaté stromy, ktoré počas celého roka neopadajú. To spôsobuje zníženie priepustnosť laserových lúčov, nezávisle od ročného obdobia. V prípade, že je táto vegetácia hustá, výrazne znižuje počet odrazov od terénu, čím sa znižuje úroveň detailu DMR. Týmto spôsobom môže byť zatienená aj skalná veža nižšia ako vegetácia, čo v niektorých prípadoch môže vyústiť až do niekoľkometrovej chyby. To však nie je jediný problém, ktorý spôsobuje

vegetácia pri spracovaní lidarových dát v skalných mestách. Výraznú nepresnosť môže napríklad zapríčiniť aj osamostatnený strom, pokiaľ sa nachádza na nesprávnom mieste, pretože je svojím tvarom ťažko odlišiteľný od skalnej veže. Taktiež je niekedy neľahké rozpoznať, kde končí skalná veža a kde začína strom (obr. 8).



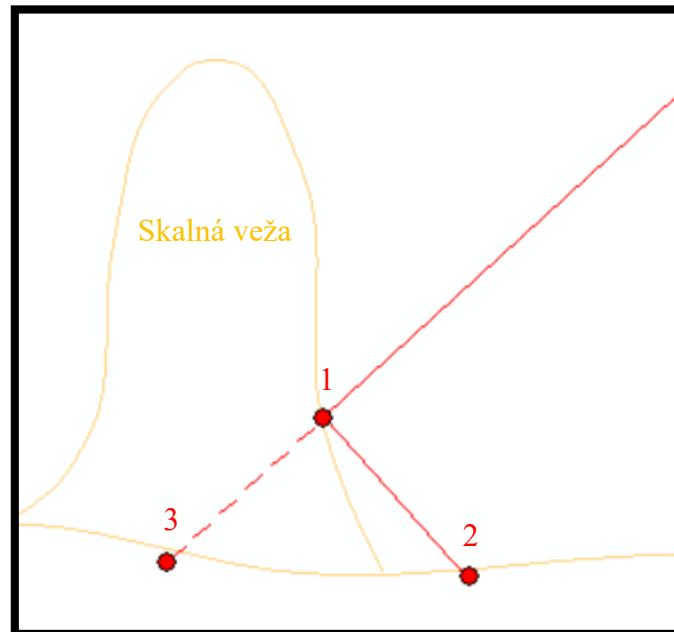
Obr. 8: Problém rozlíšenia skál a vegetácie. 1) skalná veža, 2) strom, 3) skalná veža so stromom - problém určenia čo je strom a čo skala, zdroj: ZÚ, vlastná tvorba

V pieskovcových skalných mestách sa stretávame aj s javom výraznej odlišnosti v hustote bodového mračna medzi príľahlou a odľahlou stenou skaly vzhľadom na polohu snímača. K zvýšeniu hustoty dochádza, keď sa skalná stena nenachádza priamo pod snímačom a je orientovaná približne rovnobežne so smerom letu nosiča. Táto stena potom odchyťava všetky lúče, ktoré smerujú týmto smerom, čo síce spôsobuje zahustenie bodov na privrátenej strane skaly, no na odvrátenej strane vzniká tieň, čo znamená, že odtiaľ nie sú žiadne odrazy. Tento jav je často redukovaný vplyvom prekrytia jednotlivých letových pásov.

Špecifikom skalných miest sú taktiež nezriedka sa vyskytujúce previsy. Pri LLS môžu byť z boku zachytené aj ich spodné časti, čo pri filtrácii zapríčini elimináciu bodov z vrchnej časti previsu. Ak by sme tieto body manuálne opätovne označili ako terénne a vytvorili z toho DMR, vznikli by v týchto miestach špicaté artefakty. Dôvodom je, že triangulácia pri tvorbe DMR prebieha iba podľa súradníc x a y (Lysák, 2016).

Okrem toho môže pri snímaní metódou LLS dôjsť k tzv. multipath efektu. To nastáva vtedy, keď sú lúče niekoľkonásobne odrazené od okolitých objektov, čo zapríčini predĺženie času medzi odoslaním a prijatím signálu, ktoré je interpretované ako zvýšenie vzdialenosti medzi senzorom a miestom odrazu (obr. 9). Súradnice tohto bodu potom neodpovedajú reálnemu stavu a bod je zobrazený nižšie, ako by mal. Tento jav nie je špecifickým len pre

skalné mestá, no je veľmi častým napríklad aj v zastavaných oblastiach. Rieši sa odstránením bodov výrazne nižších, ako je ich okolie.



Obr. 9: Multipath efekt. 1) prvý odraz, 2) druhý odraz, 3) chybný výsledný bod, zdroj: vlastná tvorba

2.6.2 Filtrácia

Pomenovanie pieskovcové skalné mestá nie je iba náhodné. Tento termín sa používa kvôli ich podobe skutočným mestám. Skalné veže pripomínajú budovy a úzke pukliny s kolmými stenami ulice obklopené budovami. Spolu s všadeprítomnou vegetáciou to spôsobuje veľké problémy pri filtrácii dát LLS. Filtračné algoritmy nie sú takémuto usporiadaniu terénnych bodov uspôsobené. S jedným súborom parametrov vieme síce úspešne odstrániť vegetáciu, no spolu s ňou aj podstatnú časť skál. Ak zvolíme parametre, ktoré majú zachovať skaly, zachová sa spolu s nimi aj vegetácia. Okrem toho sú aj pri filtrácii s jemnými parametrami odstránené okraje plošín na vrchole skál, pretože neodpovedajú princípu filtračných algoritmov. Tie stoja na predpoklade, že terén je spojitý povrch, meniaci sa iba pozvoľne.

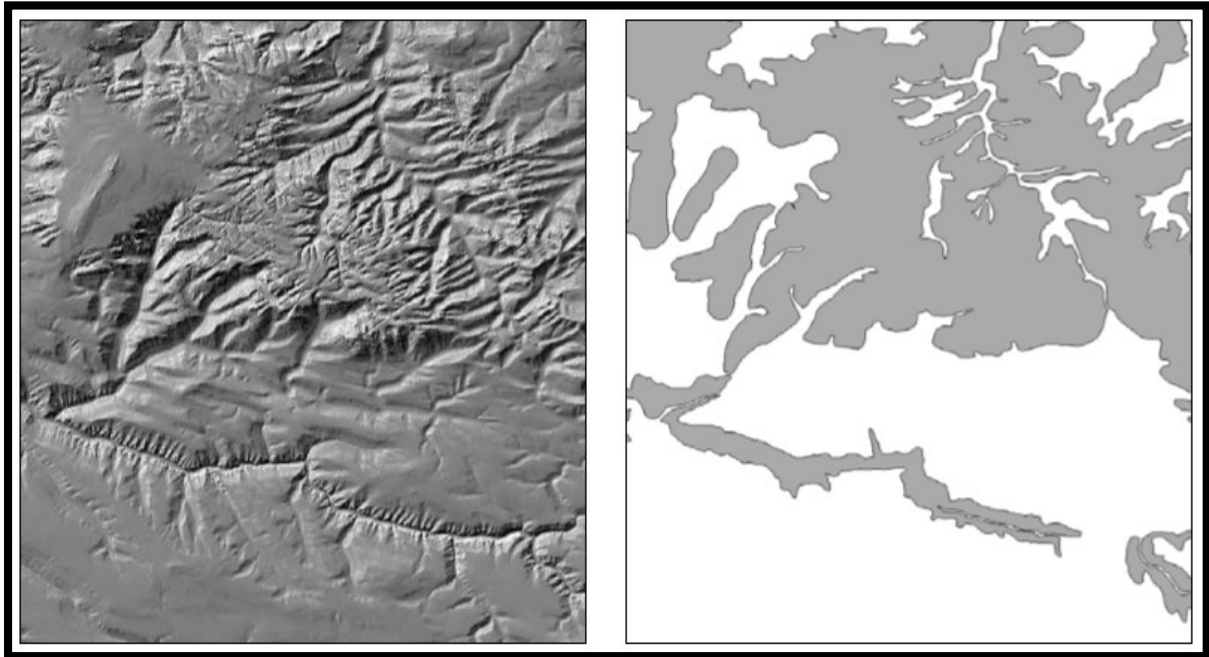
Riešením môže byť napríklad dodatočná manuálna editáciu uskutočnená po automatizovanej filtrácii. Tento prístup môže dosahovať veľmi dobré výsledky, no je časovo veľmi náročný a závislý od zručnosti osoby, vykonávajúcej manuálnu úpravu. Okrem toho sa s klesajúcou hustotou bodového mračna znižuje aj schopnosť vizuálne identifikovať či sa jedná o strom alebo skalú. Táto metodika bola použitá aj pri tvorbe DMR 5G (Brázdil, 2016b). Najprv bola aplikovaná hierarchická robustná interpolácia (kap. 2.3), no keďže v pieskovcových skalných mestách nedosahovala požadovanú presnosť, bola následne doplnkovo manuálne upravená.

Užitočným môže byť aj využitie už existujúceho, klasifikovaného bodového mračna. Typickým príkladom, kedy sa to dá použiť, je uskutočnenie podrobnejšieho lokálneho snímania na území, ktoré bolo predtým spracované menej detailne. Celý proces potom spočíva v porovnávaní súradníc nanovo nasnímaných odrazov so súradnicami už klasifikovaných terénnych bodov. V prípade, že sú body oboch dátových súborov blízko, lokálny odraz je polohový a výškový súlad oboch dátových súborov. Táto metodika bola použitá v práci L. Holmana (2013), a to v okolí Pravčickej brány. Dosiahla uspokojujúce výsledky a to aj v miestach s hustou vegetáciou, alebo aj na miestach, kde bola hustota klasifikovaného bodového mračna nízka.

Využiť sa dajú aj dáta vyhotovené optickými senzormi. Ich klasifikáciou vieme rozlíšiť, kde sa nachádzajú skaly, čo sa dá použiť ako pomocná informácia pri filtrácii. Predpokladom na úspešnosť tohto prístupu je presná ortorektifikácia optických dát. Avšak nevýhodou tohto prístupu je, že optické senzory nie sú schopné zachytiť terén v miestach s hustou vegetáciou. V takom prípade sú skaly zatienené a areál je klasifikovaný ako vegetácia. Ortofotomapu využil pri filtrácii dát LLS v pieskovcových skalných mestách aj Lysák (2016). Slúžila hlavne na identifikáciu okrajov vrcholových plošín skál, ktoré sú na vegetáciu príliš exponované. Body, ktoré sa nachádzali v týchto oblastiach dostali špeciálny príznak, s ktorým vstupovali do robustnej interpolácie (kap. 2.3). Okrem toho boli v rámci robustnej interpolácie v tomto pokuse využité doplnkové informácie, ktoré sú popísané v ďalšom odstavci.

Medzi doplnkové informácie rátame údaje o vyslanom pulze a jeho odrazoch, ktoré získame okrem súradníc jednotlivých odrazov. Patrí sem napríklad počet a poradie odrazov a pokiaľ senzor obsahuje *fullwaveform* technológiu, pri snímaní je získaná informácia o priebehu pulzu, z ktorej je s využitím Gaussovej dekompozície vypočítaná napríklad poloha a intenzita jednotlivých odrazov. Doplnkové informácie využil pri filtrácii dát LSS v pieskovcových skalných mestách Lysák (2011, 2016) a Poláková (2016). Všetky uvedené práce vychádzali z predpokladu, že body, ktoré nie sú posledné odrazy, predstavujú vegetáciu a posledné odrazy predstavujú zmes vegetácie a terénu. Ak sa posledné odrazy podarí rozdeliť do dvoch skupín tak, že prvá skupina bude mať rovnakú štatistickú charakteristiku ako odrazy, ktoré nie sú posledné a druhá skupina bude mať charakteristiku štatisticky odlišnú od bodov, ktoré nie sú posledné odrazy, druhá skupina bude pravdepodobne predstavovať body odrazené od terénu. To môže byť využité napríklad pri úprave váh jednotlivých bodov vstupujúcich do robustnej interpolácie (Lysák, 2016) alebo môžu doplnkové údaje poslúžiť ako príznak pri segmentácii bodového mračna (Poláková, 2016). Vo výsledku sú doplnkové informácie

užitočné ako doplnok k inej filtračnej metóde, no autori experimentov konštatujú, že samotná informácia o vlastnostiach prijímaného signálu k spoľahlivej filtrácii nepostačuje.



Obr. 10: Vľavo: Tieňovaný reliéf z dát LLS v Českom Švajčiarsku, Vpravo: To isté územie. Vyčlenená oblasť s jednoduchou topografiou (biela) a oblasť skál (šedá), zdroj: Trommler a Csaplovics, 2006

Poslednou z uvedených metód je využitie priestorovo podmienenej filtrácie, podrobnejšie popísanej v kapitole 2.5. To spočíva v rozdelení celej záujmovej oblasti do viacerých podoblastí. Na každú z podoblastí je potom použitá filtrácia s inak nastavenými parametrami. Tento prístup bol použitý aj pri realizácii projektu GeNeSiS (Geoinformationsnetzwerke für die grenzüberschreitende Nationalparkregion Sächsisch-Böhmische Schweiz), ktorého nositeľom bola Technická Univerzita v Drážďanoch (TUD) (Trommler a Csaplovics, 2006). Pri počiatočných snahách o filtráciu zistili, že ak majú parametre filtrácie nastavené tak, aby odstraňovali budovy, boli spolu s nimi odstránené aj skaly. Ak bolo nastavenie parametrov ponechávajúce skaly, nebola eliminovaná ani väčšina budov. Preto sa rozhodli pre rozdelenie celého územia do dvoch oblastí (obr. 10). Prvá oblasť odpovedala územi, na ktorom sa nachádzali skaly a bola filtrovaná so súborom parametrov ponechávajúcim aj skaly, aj budovy. V druhej oblasti sa skaly nenachádzali, a preto tu boli použité bežné parametre filtrácie odstraňujúce aj budovy, aj skaly. Oblasti vyznačovali manuálne na podklade tieňovaného reliéfu vytvoreného z dát filtrovaných s parametrami ponechávajúcimi aj skaly, aj budovy. Ako filtračnú metódu použili hierarchickú robustnú interpoláciu (kap. 2.3) podporovanú softvérom SCOP+. Výsledným produktom bol rastrový

DMR s priestorovým rozlíšením 1 m so strednou výškovou chybou c rozmedzí 0,1 m na rovnom teréne až po 4 m na horných hranách pieskovcových skál.

Aplikácia priestorov podmienenej filtrácie na pieskovcové skalné mestá je hlavným cieľom aj tejto práce. Na rozdiel od projektu GeNeSiS však chceme oblasti vytýčiť automaticky, nie manuálne a na filtráciu využijeme voľne dostupný softvér, nie komerčný produkt.

3 METODIKA SPRACOVANIA

V úvode tejto kapitoly je popísané územie, na ktorom budeme uskutočňovať náš experiment spolu s dátami, ktoré sme pri tom použili. Ťažiskom kapitoly (kap. 3.3 – 3.6) je popis nami navrhnutej metódy tvorby oblastí vstupujúcich do priestorovo podmienenej klasifikácie. V závere je spomenutý softvér, ktorý sme na náš experiment použili.

3.1 Zájmové územie

Keďže cieľom práce je zistiť možnosti priestorovo podmienenej filtrácie, dôležitým aspektom bol výber zájmového územia. Toto územie by malo mať zložitejšiu topografiu terénu, na ktorej mali predchádzajúce pokusy o filtráciu problémy, tzn. že neodstránili podstatnú časť neterénnych bodov. Tieto podmienky spĺňa územie Českého Švajčiarska, kde boli už v predchádzajúcich rokoch pokusy o priestorovo podmienenú filtráciu (Trommler a Csaplovics, 2006).

Testovacie územie, na ktoré budeme aplikovať našu metodiku, je ohraničené obcou Janov z juhu a Tetřevími stenami zo severu, obcou Hřensko zo západu a obcou Mezná z východu. Rozloha testovacej lokality je 4 x 2 km, so stredom o súradniciach 50° 52' 31,8'' s.š., 14° 16' 36,48'' v.d. a nachádza sa tu napríklad kaňon rieky Kamenice, symbol NP České Švajčiarsko Pravčická brána či rieky Suchá a Dlouhá Belá. Testovacia lokalita je zobrazená na obr. 11, s podkladovou vrstvou ZM 25.



Obr. 11: Zaujmové územie, zdroj: ČÚZK, 2018

3.1.1 České Švajčiarsko

České Švajčiarsko je súčasťou širšej oblasti Děčínska vrchovina, nazývanej aj Labské pieskovce. Výraznou črtou tejto oblasti je pieskovcový reliéf, ktorý má pôvod už vo vrchnej kriede. V tomto období sa v celej oblasti nachádzalo more, ktoré po svojom ústupe vplyvom treťohorného alpínskeho vrásnenia zanechalo vrstvu pieskových a ílových nánosov, miestami mocnú až 700 m (České Švýcarsko, 2005). Pri procese vrásnenia vzniklo množstvo zlomov, ktoré krajinu rozdrobili na pieskovcové kryhy. Niektoré z nich boli vplyvom vrásnenia vyzdvihnuté vyššie ako ostatné, čím vytvorili stolové hory a kvesty. Tieto formy reliéfu sú však

náchylné na zvetrávanie a v priebehu ďalších tisícov rokov vývinu Zeme z nich vznikli rozličné skalné útvary, ako napríklad skalné veže, skalné okná alebo skalné brány (obr. 12). Okrem toho sa mnohé korytá vodných tokov prehĺbili do takej miery, že vytvorili kaňony. Výsledkom je členitý terén, bohatý na rozličné formy skalného reliéfu tvoriaci niekoľko skalných miest, ktorý je súčasťou najmladšieho Národného parku v Českej republike, NP České Švajčiarsko.



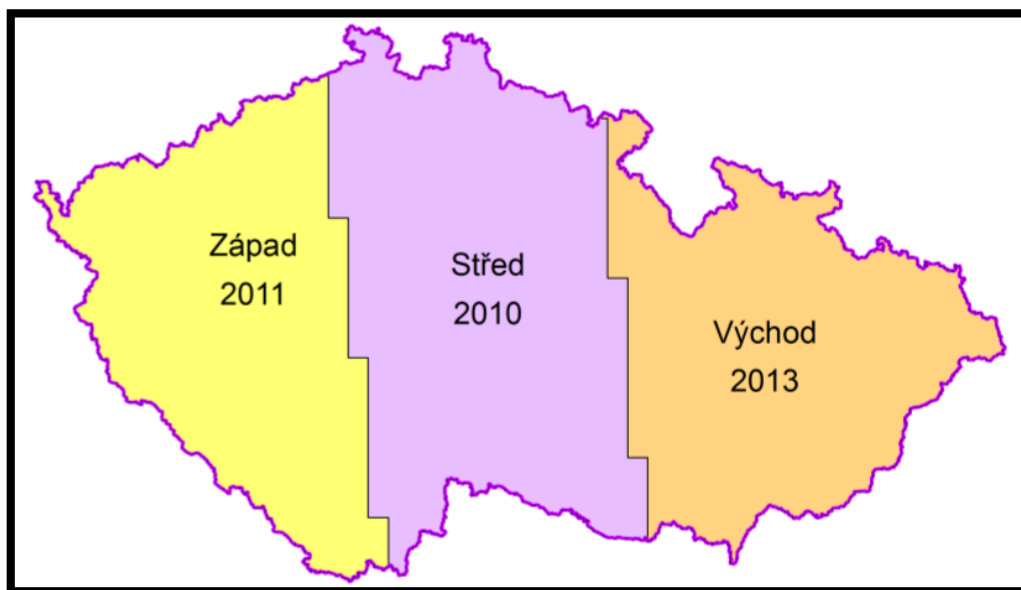
Obr. 12: Pravčická brána, zdroj: iTras, 2018

3.2 Dáta

Primárnymi dátami potrebnými na našu prácu boli dáta LLS. Za týmto účelom nám poslúžili dáta vyhotovené v rámci Projektu tvorby nového výškopisu ČR. Z nich vznikol aj produkt DMR 5G, ktorý nám poskytuje príležitosť na verifikáciu celej metodiky, pretože ho môžeme použiť ako kontrolnú vrstvu. Za účelom verifikácie sme taktiež použili aj dáta LLS vyhotovené v rámci projektu GeNeSiS, ktoré sú výsledkom lokálneho skenovania a poskytujú podrobnejší model. Dátové sady sú popísané v nasledujúcich kapitolách.

Projekt tvorby nového výškopisu ČR

Projekt tvorby nového výškopisu ČR bol zahájený v roku 2008, pretože podľa analýz z predošlých rokov vtedajšie výškopisné modely nedostačovali potrebám štátnej a územnej správy (Dušánek, 2014). V spolupráci Českého úřadu zeměměřického a katastrálního (ČÚZK), Ministerstva obrany a Ministerstva zemědělství ČR tak bolo medzi rokmi 2010 a 2013 v troch fázach (obr. 13) nasnímané metódou LLS celé územie ČR. Výslednými produktmi boli DMR 4G, DMR 5G a DMP 1G, ktoré sú v súčasnosti dostupné pre územie celej republiky a sú naplánované ich pravidelné aktualizácie.



Obr. 13: Oblasti snímání dat Projektu tvorby nového výškopisu ČR s roky ich nasnímania, zdroj: Dušánek, 2014

DMR 4G bol z týchto produktov ako prvý dostupný pre celú ČR. Na filtráciu bola použitá robustná interpolácia, po ktorej boli následne z terénu vybrané reprezentatívne body. Tie boli definované ako najnižšie body zo štvorcových oblastí o rozmere 5 x 5 m. Ak sa bod výškou extrémne odlišoval od okolia, bol nájdený taký bod, ktorý spĺňal túto podmienku. Vzniknutý reliéf bol potom manuálne upravený na základe interaktívnej vizuálnej kontroly, a to v miestach neprirodzených anomálii terénu, akými sú aj skalné oblasti. Na záver bol produkt ešte interpolovaný do siete 5 x 5 m, s použitím adaptabilnej lineárnej predikcie. DMR 4G vzhľadom na mieru generalizácie nemôže podrobne vystihnúť lokálnu členitosť a výskyt terénnych anomálií, medzi ktoré patria aj formy reliéfu v skalných oblastiach. ČÚZK garantuje dosiahnutú strednú chybu výšky (RMSE) 0,30 m v teréne bez súvislej vegetácie a zástavby a 1 m v terénoch pokrytých hustou vegetáciou (Brázdil, 2016a).

Podobne ako v predchádzajúcom prípade, aj pri tvorbe DMR 5G bola na filtráciu dát najprv použitá robustná interpolácia. Výsledok tentokrát nebol generalizovaný, ale prešiel rovno do fázy manuálnej úpravy pomocou interaktívnej vizuálnej kontroly. Body priradené terénu boli následne hlavne kvôli nízkej vegetácii preriedené, no neprebehla žiadna interpolácia do pravidelnej siete. DMR 5G dosiahlo garantovanú presnosť, a to RMSE 0,18 m v teréne bez súvislej vegetácie a zástavby a 0,30 m v terénoch pokrytých hustou vegetáciou (Brázdil, 2016b).

Posledným produktom bol DMP 1G. Ten obsahuje na rozdiel od predošlých výstupov aj objekty nachádzajúce sa na zemskom povrchu, ako sú budovy a vegetácia. Aj v tomto prípade nad dátami prebehla filtrácia s využitím metódy robustná interpolácia, no cieľom nebolo separovať terénne a neterénne body, ale odstrániť chybné merania (napr. letiaci vták). Na určenie terénu bol využitý DMR 5G a na odhalenie budov príslušná vrstva ZABAGED®. Nakoľko bolo overenie presnosti DMP 1G na budovách a vrchných plochách súvislej vysokej vegetácie prakticky nerealizovateľné, deklarovaná hodnota presnosti bola 0,40 m na pevných plochách a 0,70 m na vrchných plochách korún stromov (Dušánek, 2016).

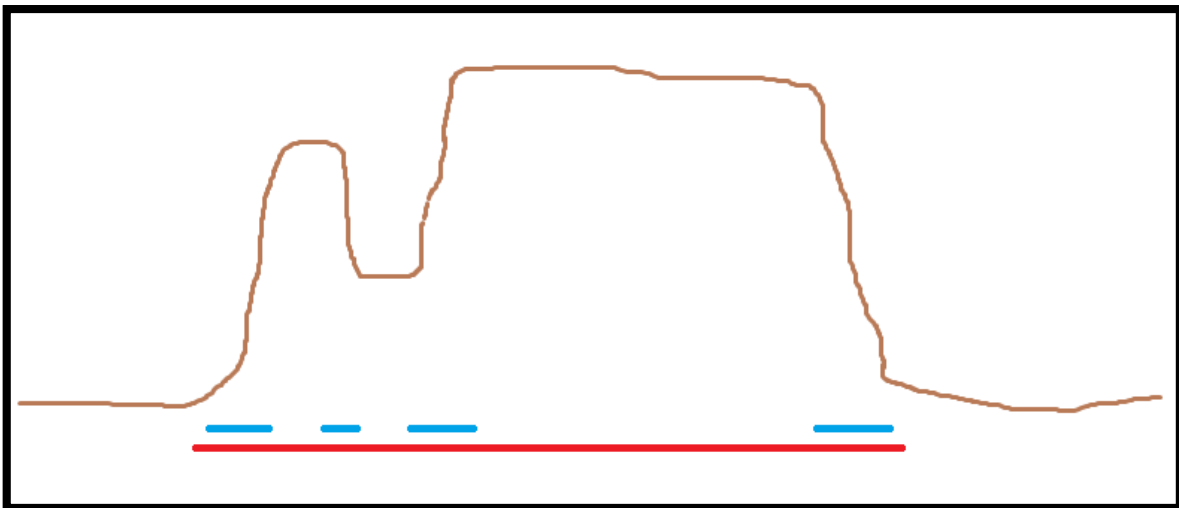
Naša záujmová oblasť bola nasnímaná v rámci oblasti Stred a to v letnom období roku 2010 (Dušánek, 2014). Dáta LLS získané v rámci Projektu tvorby nového výškopisu ČR nám síce poskytujú viacero doplnkových informácií, no pri našej práci sme využili iba informáciu o súradniciach jednotlivých bodov. Keďže snímanie bolo uskutočnené počas vegetačného obdobia, zapríčinilo to zníženie počtu odrazov od terénu na úkor odrazov od vegetácie. Celkový počet bodov bol 7 222 561 na 8 km², čo odpovedá hustote 0,9 bodu/m², pričom v južnej časti s obcou Janov a kaňonom Kamenice bolo 5 676 545 bodov na 4 km² s hustotou 1,4 bodu/m² a v severnej časti s Pravčickou bránou a skalnými mestami bolo 1 546 016 bodov na 4 km² s hustotou 0,4 bodu/m².

Okrem dát LLS sme použili aj voľne dostupnú vrstvu budov OpenStreetMap (GEOFABRIK, 2018). Tá vychádza z dát RÚIAN a v našom prípade sme ju použili pri vymedzovaní oblasti s budovami v okolí obce Janov.

3.3 Princíp algoritmu

Hlavnou inšpiráciou pri návrhu metodiky spracovania dát bola práca tímu ľudí z TUD (Trommler a Csaplovics, 2006). V rámci projektu GeNeSiS dokázali, že v prípade skalného terénu dosahuje priestorovo podmienená filtrácia presnejšie výsledky ako filtrácia s jedným súborom parametrov, a keďže jednotlivé oblasti vyznačovali manuálne, poskytli priestor na

naviazanie na ich prácu automatizáciou celého postupu. Okrem samotnej automatizácie sme metodiku TUD pozmenili aj v ďalších veciach. Oblasť s bežnými parametrami filtrácie sme rozdelili na dve podoblasti, a to podľa prítomnosti zástavby. Takto vznikla trieda budov, v ktorej sa nachádza vegetácia, ale je tu aj značné zastúpenie budov, a trieda vegetácie, kde sa nachádza iba vegetácia, no budovy sa tu nenachádzajú. Ďalším špecifikom je, že nami vytvorené oblasti majú tvar štvorca s nastaviteľnou dĺžkou strany. Výnimkou je oblasť skál, do ktorej sú zaradené iba strmé svahy skál, pretože práve v týchto miestach nastáva problém s ich filtráciou (kap. 2.6.2). Aj v tomto sa naša metodika odlišuje od postupu pri projekte GeNeSiS. V ich práci zahrnuli do skalnej oblasti celé skalné štruktúry, vrátane ich vrcholových plošín (obr. 14).



Obr. 14: Terén (hnedá), definovaná oblasť skál projektu GeNeSiS (červená) a nami definovaná oblasť skál (modrá), zdroj: vlastná tvorba

Rozlišovať oblasť bez skál podľa prítomnosti zástavby na oblasť budov a oblasť vegetácie je vhodné najmä v prípade, že potrebujeme spracovať väčší územný celok (napr. celý národný park). V takomto prípade je bežné, že sa na skúmanom území nachádzajú aj obce či iné zastavané oblasti, ktoré sú charakteristické inou topografiou ako lesná krajina, a preto je treba použiť iný súbor parametrov. Štvorec sme si ako základný tvar vybrali hlavne kvôli jednoduchosti a výpočtovej rýchlosti. Jediný parameter, ktorý tu nastavujeme je veľkosť strany, ktorá udáva mieru generalizácie. Oblasť sú usporiadané v pravidelnej štvorcovej sieti pokrývajúcej celé skúmané územie, ktorá je prehľadná, čo sa ukázalo užitočným pri testovaní funkčnosti postupu. Výnimkou je oblasť skál. U skál sú pri filtrácii hlavným problémom strmé svahy a okraje skalných štruktúr, ktoré bývajú klasifikované ako neterénne. Práve v týchto miestach je nutné použiť parametre filtrácie, ktoré označia väčšinu bodov za terénne. Ak by

sme takéto parametre použili na celú štvorcovú oblasť, neodfiltrovalo by to vegetáciu v miestach, kde sa žiadne strmé svahy nevyskytujú.

Procesný diagram, znázorňujúci priebeh celého algoritmu, sa nachádza v Prílohe 1.

3.4 Oblasť budov

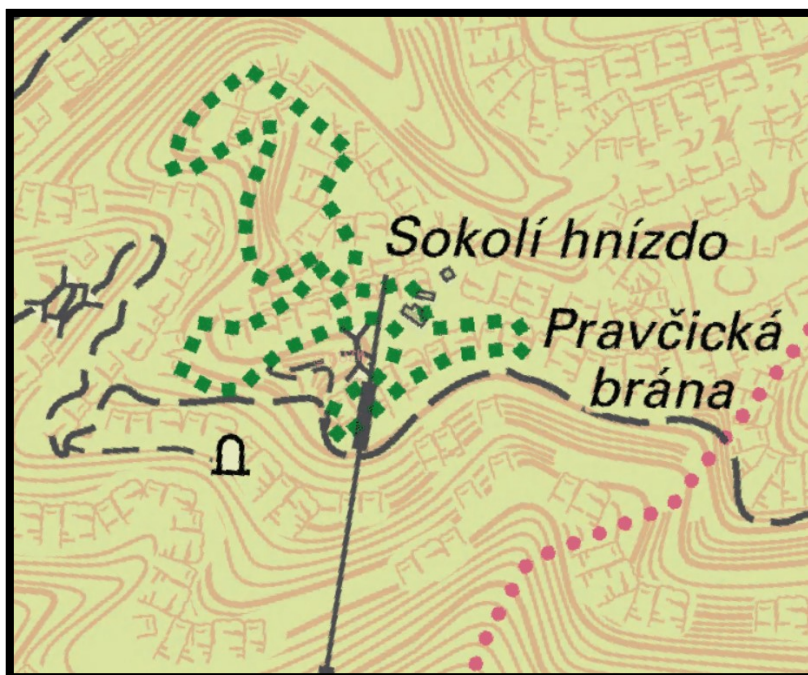
Ako prvé sa posudzovalo, či sa v oblasti nachádzajú budovy. To sme uskutočnili s využitím pomocnej vrstvy budov OSM. Ak sa nejaká budova prekrývala s danou oblasťou, jej plocha bola pripočítaná do celkovej plochy budov v oblasti. Následne bol vypočítaný podiel budov v oblasti podľa vzorca

$$M_b = \frac{\sum S_b}{S_s},$$

kde S_b je plocha budovy a S_s je celková plocha štvorca. Ak bola táto miera vyššia ako prahová hodnota, oblasť bola klasifikovaná do triedy budov. Tento mechanizmus bol do algoritmu zaradený preto, aby boli odignorované osamostatnené budovy (napr. infostánok alebo toalety), ktoré sa ojedinele vyskytujú aj v oblastiach skál (obr. 15) a správny výber prahovej hodnoty závisí od najväčšej plochy najväčšej budovy v skalách a dĺžky strany štvorcovej oblasti. Vypočítame ju podľa vzorca

$$\min M_b \doteq \frac{S_{bm}}{S_s},$$

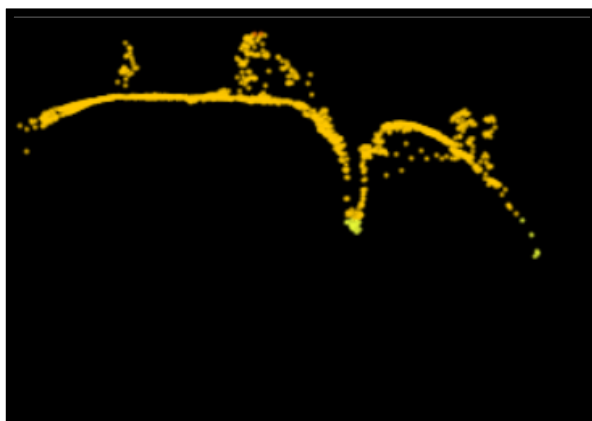
kde $\min M_b$ je optimálna prahová hodnota, S_{bm} je plocha najväčšej budovy v skalách a S_s je plocha štvorcovej oblasti.



Obr. 15: Sokolí hnízdo – výletný zámoček pod Pravčickou bránou, zdroj: ČÚZK

3.5 Oblasť skál

Špecifickým rysom pieskovcových skalných oblastí je náhla zmena výšky, sprevádzaná strmým svahom. Častým javom je pritom relatívne nízka vertikálna členitosť na samotnom vrchole skaly (obr. 16), typická pre stolové hory alebo náhorné plošiny s jednoduchšou topografiou. Preto je v týchto oblastiach použiteľná rovnaký súbor parametrov ako na bežnú krajinu a jedinou problémovou oblasťou sú skalné svahy s okrajmi vrcholových plošín.



Obr. 16: Profil skalnatým územím, zdroj: ZÚ, vlastná tvorba

Z toho dôvodu sme v prípade skalných oblastí narušili štvorcový tvar a nahradili ho polygónmi vyčleňujúcimi svahy skál. Toto sme dosiahli v dvoch krokoch. Najprv sme v rámci štvorcovej oblasti pomocou sklonu terénu vypočítaného z hrubo filtrovaných dát indikovali, či sa tam nachádzajú skaly, a ak sa tam nachádzali, označili sme ako oblasť skál iba tú časť, v ktorej sa nachádzali plochy skalných útvarov.

3.5.1 Potenciálne skalné oblasti

Na určenie toho, či sa v danom štvorci vyskytujú skaly, sme podobne ako pri klasifikácii oblasti budov (kap. 3.4) použili pomer plochy, ktorú hľadaný krajinný prvok zaberá. Avšak na rozdiel od predošlého scenáru sme tentoraz nemali žiadnu pomocnú vrstvu, ktorá by nám poskytla informáciu o rozlohe skál. Skaly zo ZABAGED by v tomto prípade neposlúžili, pretože nemajú dostatočnú polohovú presnosť (Lysák, 2016). Preto sme si túto informáciu museli odvodiť priamo z dát LLS.

Využili sme na to sklon terénu. Vychádzali sme z predpokladu, že na miestach skalných svahov bude hodnota sklonu vysoká. No ak by sme na to použili sklon vypočítaný zo surových dát, dostali by sme vysoké hodnoty aj všade tam, kde je hustá vegetácia. Aby sme tomu predišli, najprv sme celú dátovú sadu filtrovali z použitím modulu *lasground* knižnice *LAStools*, ktorá využíva metódu zahusťovania TIN (kap. 2.2). Parameter veľkosti bunky počiatočného TIN sme

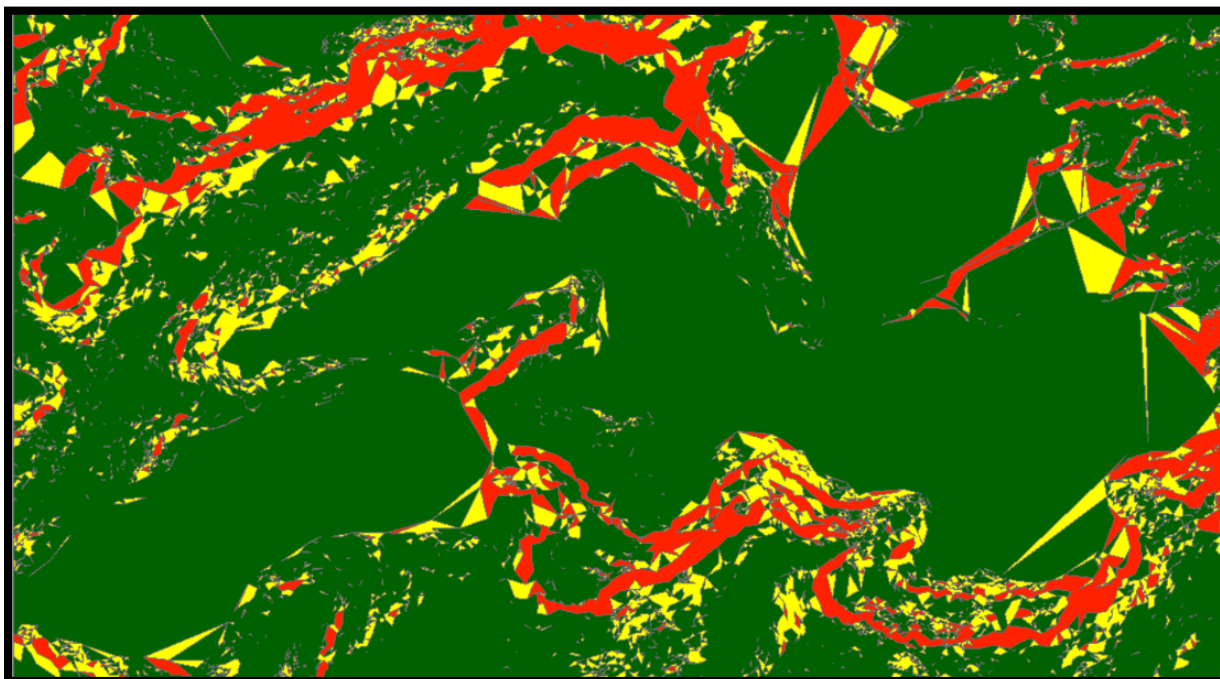
nastavili na 1/10 dĺžky strany oblasti, čo zabezpečilo odfiltrovanie vegetácie. Spolu s vegetáciou sa pri tom odfiltrovala aj časť skál, no v tomto prípade to nebolo veľmi dôležité, pretože sme výsledok využili iba na hrubý odhad ich výskytu. Sklony terénu získané z týchto dát sme reklasifikovali do troch intervalov (tab. 1). Tieto hodnoty sme zvolili experimentálne tak, aby vzniknuté skalné areály čo najviac zodpovedali okrajom a svahom pieskovcových štruktúr.

Tab. 1: Intervaly sklonu terénu

Trieda	Interval	Popis
1	< 35°	Nepočíta sa pri výpočte podielu skál v oblasti
2	35 - 42°	Počíta sa pri výpočte podielu skál v oblasti iba ak susedí s triedou 3
3	> 42°	Počíta sa pri výpočte podielu skál v oblasti

Zdroj: vlastná tvorba

Pri výbere skál sme použili prahovanie s hysteréziou, využívané napríklad pri detekcii hrán. Dôvodom bola variabilita hustoty bodového mračna v skalách. Z reklasifikovanej vrstvy sklonu terénu (obr. 17) sme vybrali všetky polygóny s najvyššou hodnotou atribútu sklonu a všetky areály so sklonom 35 – 42°, ktoré sa dotýkali aspoň časťou hraničnej línie polygónu s triedou sklonu s hodnotou 3.



Obr. 17: Reklasifikovaný sklon terénu v okolí Pravčickej brány (prvá iterácia), < 35° (zelená), 35 – 42° (žltá), > 42° (červená), zdroj: ZÚ, vlastná tvorba

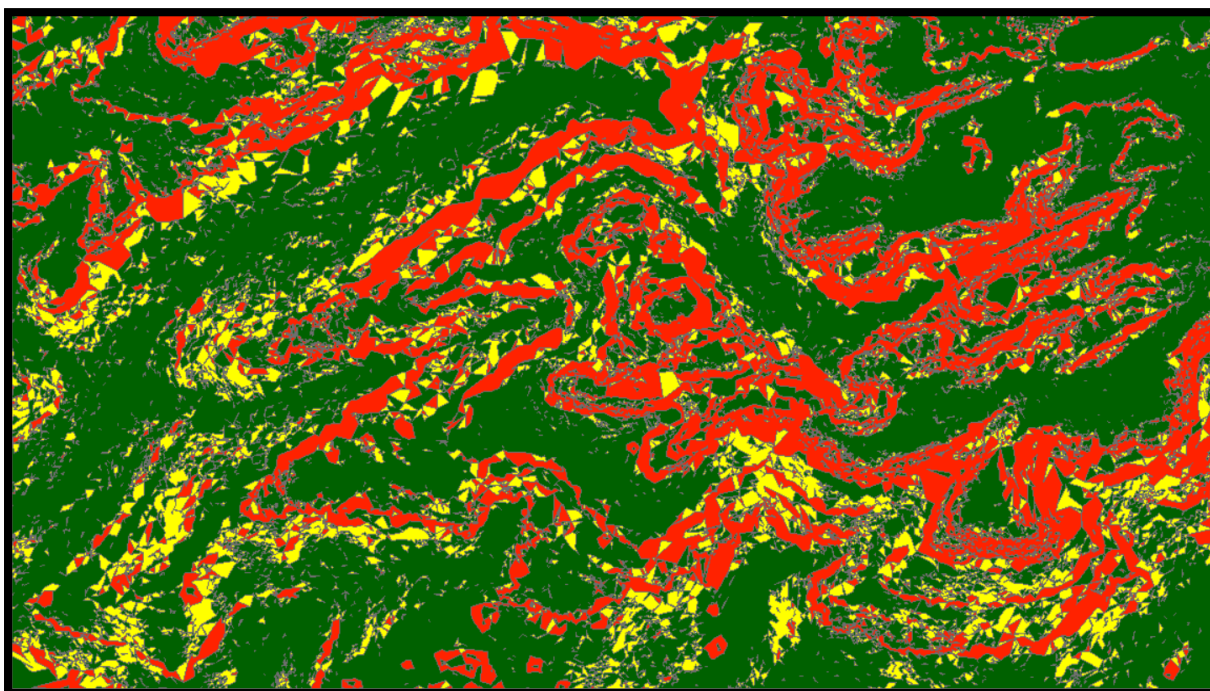
Tieto polygóny sme označili ako potenciálne skaly a na základe vzťahu

$$M_s = \frac{\sum S_s}{S_{\text{š}}},$$

kde M_s je podiel skál v oblasti, S_s je plocha skaly a $S_{\text{š}}$ je celková plocha štvorcovej oblasti, sme vypočítali podiel skál v oblasti. Ak táto miera prekročila prahovú hodnotu, v štvorci sa nachádzali skaly, a preto bol posunutý do ďalšej iterácie, kde sa rekonštruoval ich presnejší tvar.

3.5.2 Rekonštrukcia tvaru skál

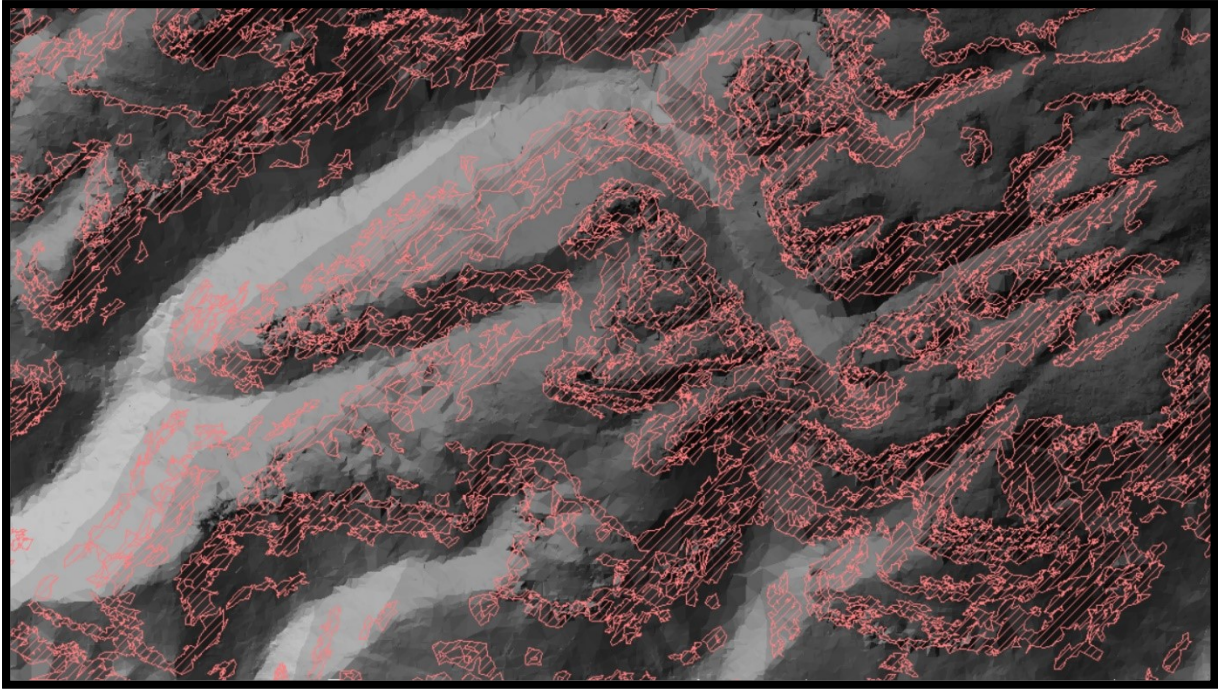
V prípade, že bola štvorcová oblasť klasifikovaná do triedy skaly, v ďalšej fáze algoritmu bola vytýčená presnejšia poloha skál a do konečnej oblasti skál boli zaradené iba tie časti štvorca, ktoré odpovedali vytýčenej oblasti. Na presnejšie vytýčenie polohy a tvaru skál sme použili podobný postup ako v predošlej kapitole. Surové dáta sme najprv filtrovali pomocou *lasground*, tentokrát s jemnejšími nastavenými parametrami. Následne sme výsledok použili ako vstup pri výpočte sklonu terénu s intervalmi tried nastavenými rovnako ako v predošlej podkapitole (kap. 3.5.1, tab. 1). Takto nastavené parametre filtrácie spôsobili, že bolo zachovaných viac skál, no zároveň nebola eliminovaná všetka vegetácia. To sa prejavilo aj na sklone terénu (obr. 18).



Obr. 18: Reklasifikovaný sklon terénu v okolí Pravčickej brány (druhá iterácia), $< 35^\circ$ (zelená), $35 - 42^\circ$ (žltá), $> 42^\circ$ (červená), zdroj: ZÚ, vlastná tvorba

Ako skalné územie boli vybraté všetky areály so sklonom viac ako 42° a areály so sklonom $35 - 42^\circ$ dotýkajúce sa triedy sklonu 3. Keďže sklon terénu bol tentoraz počítaný na

dátach odfiltrovaných s jemnejšími parametrami, boli by v takto nastavenej podmienke zarátané aj artefakty neodfiltrovanej vegetácie. Aby sme sa týchto artefaktov zbavili, využili sme predpoklad, že neodfiltrovaná vegetácia netvorí väčšie súvislé plochy a vyradili sme z výberu všetky areály s rozlohou menšou ako 200 m². Výsledný výber bol klasifikovaný ako oblasť skál (obr. 19).



Obr. 19: Oblasť skál v okolí Pravčickej brány na podklade tieňovaného reliéfu, zdroj: ZÚ, vlastná tvorba

3.6 Oblasť vegetácie

Do tejto triedy mali byť zaradené všetky oblasti, ktoré nemajú členitý terén, nenachádzajú sa tu ani skaly, ani budovy a ich hlavným prvkom je prítomnosť nízkej či vysokej vegetácie. Algoritmus sem preto zaradzoval všetky nezaradené a neprázdne oblasti, tzn. že sa tu vôbec alebo v dostatočnej miere nenachádzali ani budovy, ani skaly, alebo to boli doplnky polygónov skál z oblastí s dostatočným podielom skál.

3.7 Použitý softvér

Na uskutočnenie väčšiny práce sme použili skripty v programovacom jazyku Python. Tento programovací jazyk je voľne šíriteľný, vďaka čomu je dostupných množstvo knižníc pre najpoužívanejšie platformy (Windows, UNIX).

V našom prípade bola najdôležitejšia knižnica *ArcPy*, ktorá umožňuje použiť širokú škálu funkcií na geografické dátové analýzy, konverziu a spravovanie dát a automatickú tvorbu

máp (ArcGIS, 2018). Na jej použitie je potrebná platená ArcGIS licencia. V našej práci boli prospešné najmä funkcie na spracovanie dát, ktoré podporujú aj formát *.las* (spôsob uloženia dát LLS).

Keďže Python podporuje aj používanie externých podprogramov, mohli sme v našich skriptoch použiť aj LAStools. Je to voľne dostupná kolekcia nástrojov zameraná na prácu s dátami získanými technológiou LiDAR. Podľa ich tvorca je to najrýchlejší a pamäťovo najšetrnejší spôsob spracovania lidarových dát (rapidlasso, 2018) a umožňuje mimo iného filtráciu, klasifikáciu a konverziu týchto dát.

4 VERIFIKÁCIA A VÝSLEDKY

Táto kapitola pozostáva z dvoch základných podkapitol. V prvej z nich, s názvom Verifikácia, je rozpísaná teoretická časť stanovenia presnosti výstupov nášho experimentu. Pozostáva z popisu súboru kvantitatívnych, ale aj kvalitatívnych ukazovateľov, ktoré sme na to využili. V druhej podkapitole, ktorá má názov Výsledky, sú potom konkrétne hodnoty týchto ukazovateľov spolu s ich rozborom.

4.1 Verifikácia

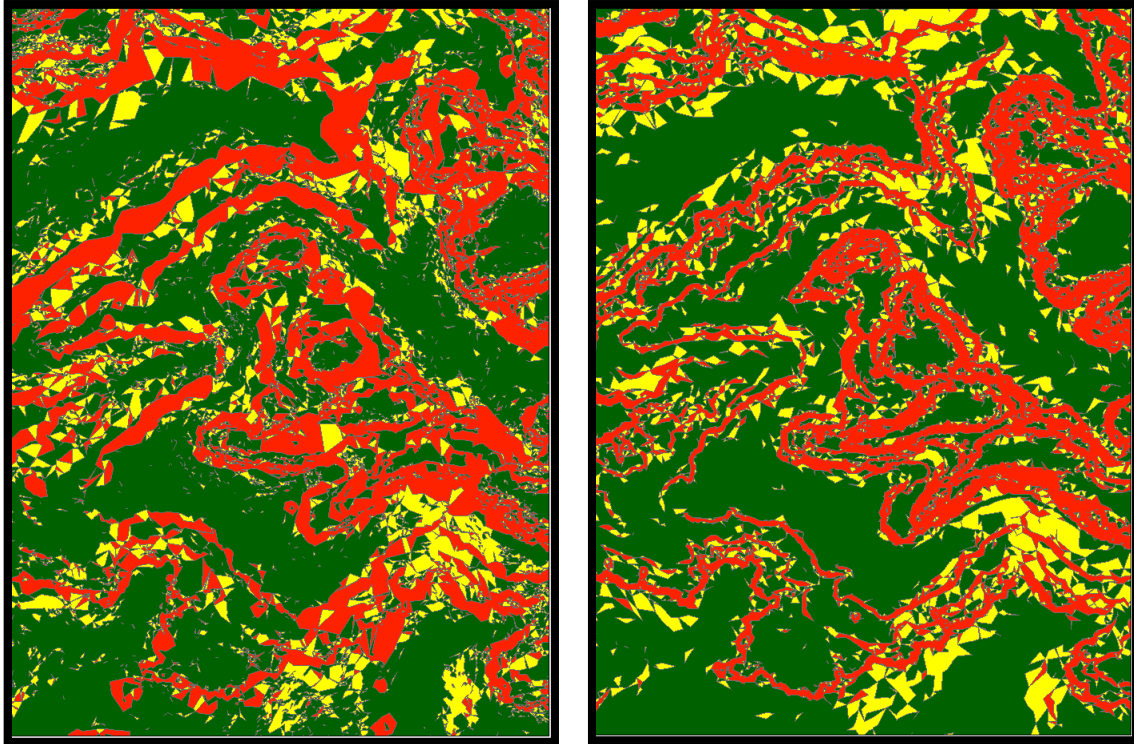
Keďže výstupom našej práce boli vytýčené oblasti potrebné pre priestorovo podmienenú filtráciu a nie DMR, bolo nutné verifikovať náš prístup hneď v dvoch rovinách. Prvou je presnosť vytýčenia oblastí a v druhej rovine sme museli overiť nakoľko dokáže priestorovo podmienená filtrácia zlepšiť výsledky spracovania dát LLS. Vytýčenie oblastí sme kontrolovali vizuálne, porovnaním s oblasťami vytvorenými v rámci projektu GeNeSiS. No nakoľko v tomto projekte mali oblasť skál definovanú inak (zahrňovali celé skaly, nielen ich svahy), presnosť výstupu sme overili aj porovnaním s DMR vyprodukovaným TUD. Z neho sme za použitia postupu z kapitoly 3.5.2 vytvorili novú vrstvu oblastí, ktorá mala areál skál definovaný rovnako ako my. To umožnilo overenie presnosti aj pomocou spoľahlivejších metód. Druhá rovina verifikácie vychádzala priamo z tej prvej. Práve vytýčenie oblastí najviac ovplyvňuje charakter dát jednotlivých areálov, a tým pádom aj parametre filtrácie potrebné na čo najpresnejší výsledok. Presnosť DMR sme určili výpočtom strednej a priemernej chyby porovnaním s výstupným DMR projektu GeNeSiS.

4.1.1 Presnosť vymedzenia oblastí

Poloha a tvar skalných polygónov sú v našom algoritme ovplyvniteľné viacerými parametrami. Pri prvotnom určení štvorcovej oblasti sem patrí súbor pravidiel na určenie skál, ktoré budú započítané do podielu skál v oblasti, ako napríklad kritéria reklasifikácie sklonu a určenie, ktoré triedy sklonu budú označené ako skaly. Sklon je ovplyvnený povrchom, ktorý vstupuje do jeho výpočtu, a preto sú veľmi dôležité aj parametre filtrácie, ktoré vytvoria tento povrch. V neposlednej rade je to aj prahová hodnota podielu skál v oblasti, ktorá určuje, či budú v danom štvorci vyhľadávané polygóny konkrétnych skál. Pri druhej iterácii je vyčlenená presnejšia poloha a tvar skál. Tento proces je ovplyvnený rovnakými parametrami, s výnimkou

podielu skál v oblasti, a navyše závisí aj od minimálnej plochy areálu potrebnej na zaradenie do oblasti skál.

Základné dáta, ktoré sme v tejto fáze použili na verifikáciu, sú výstupné DMR projektu GeNeSiS a vektorová vrstva oblastí vstupujúca do priestorovo podmienenej filtrácie použitá na vznik tohto modelu. Keďže táto vektorová vrstva obsahuje iba 2 triedy (skaly a ostatné) aj naša verifikácia bola tým pádom obmedzená iba na rozlíšenie týchto oblastí. To však nepredstavovalo problém, pretože budovy boli aj tak vyčlenené s využitím pomocnej vrstvy, vďaka ktorej bol ich výskyt indikovaný relatívne spoľahlivo. Okrem toho chyba spôsobená použitím súboru parametrov určených pre budovy na oblasť vegetácie a vice versa, je oproti ich aplikácii na skaly alebo naopak, optimálnych parametrov pre skaly na vegetáciu alebo budovy, minimálna. Z týchto dôvodov nepredstavuje rozdielna legenda v prípade oboch vrstiev vážny problém. Väčšou nevýhodou bolo, že vo vrstve slúžiacej na verifikáciu sú skaly definované rozdielnym spôsobom ako v našej práci. Kým našou snahou bolo, aby do tejto triedy bola zaradená iba tá časť krajiny, ktorá odpovedá strmým svahom skál a okrajom vrcholových plošín, vo verifikačnej vrstve sem boli zaradené skalné oblasti ako celok, vrátane častí s relatívne nízkou vertikálnou členitosťou. Z toho dôvodu táto vrstva poslúžila hlavne orientačne pri vizuálnej kontrole a mohli sme z nej vyvodit' či sa nami identifikovaná oblasť skál nachádza v oblasti skál vrstvy slúžiacej na verifikáciu. To je ovplyvnené najmä hodnotou dĺžky strany štvorcových oblastí a podielu skál v oblasti, a preto sme pri našich experimentoch skúšali rôzne hodnoty týchto parametrov.

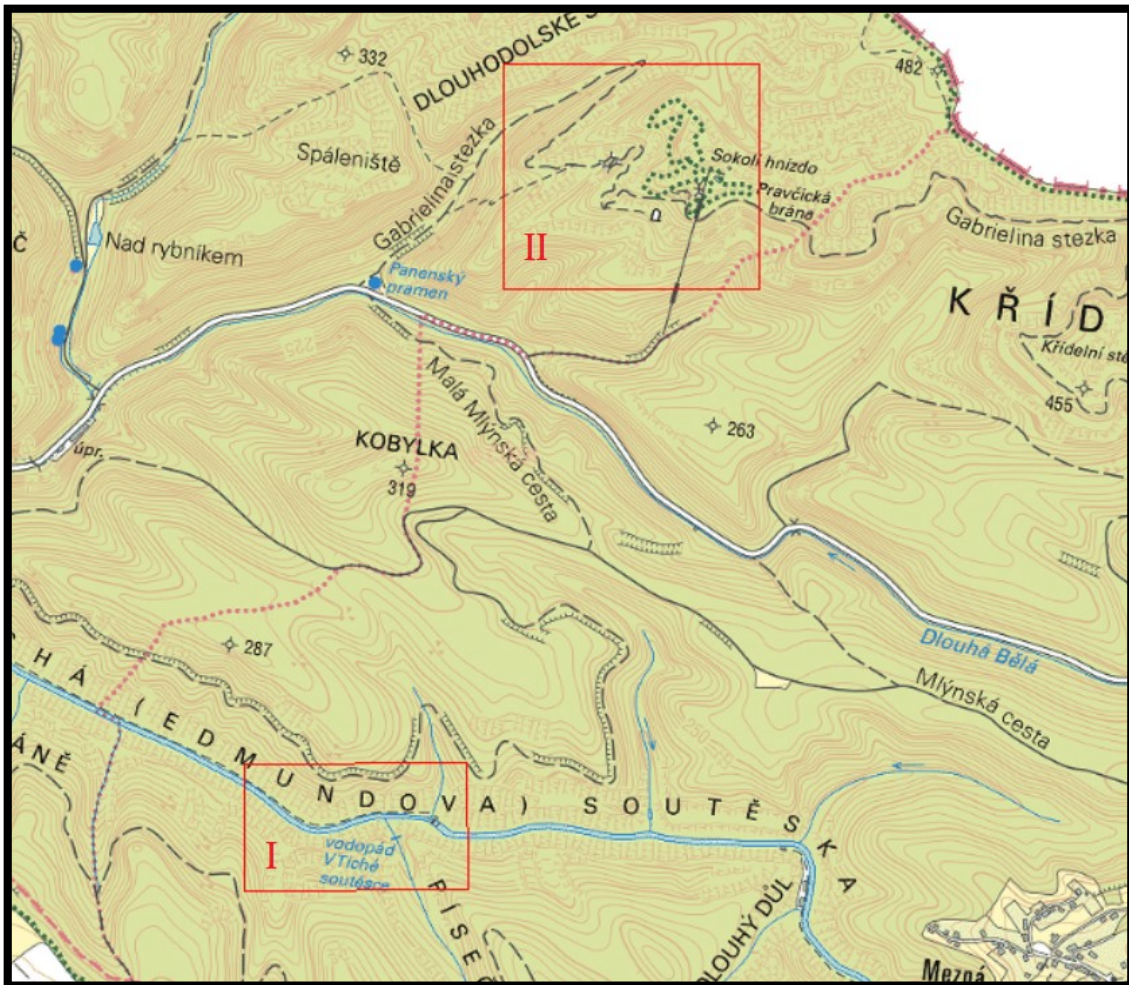


Obr. 20: Reklasifikovaný sklon terénu z nami filtrovaných dát (vľavo) a z DMR projektu GeNeSiS (vpravo), zdroj: ZÚ, TUD, vlastná tvorba

Pri určovaní presnosti vymedzenia skál sme preto museli použiť ďalšiu vrstvu. Poslúžil nám na to DMR vytvorený ako jeden z produktov GeNeSiS. Tento model vznikol s využitím priestorovo podmienenej filtrácie, berúc do úvahy aj skaly, a preto ho môžeme brať ako vzorový produkt. Postupom z kapitoly 3.5.2 sme z tohto DMR vytvorili oblasti skál, ktoré svojím charakterom vyhovovali našej definícii skál, a preto sme ich mohli vzájomne porovnať (obr. 20). Ako nástroj na validáciu sme použili kontingenčnú tabuľku, no v tomto prípade bola iba ukazovateľ správnosti filtrácie, na ktorej základe sme vymedzovali skaly, no nijak nereflektovala kritéria výberu sklonov terénu, ktoré sme stanovili na vymedzenie oblasti skál. Polygóny oboch porovnávaných oblastí sme previedli do rastru s pixelom veľkosti 1x 1 m tak, aby výsledná kontingenčná tabuľka udávala počet pixelov, ktoré boli správne či nesprávne zaradené. Z kontingenčnej tabuľky sme vypočítali aj tri typy presností: užívateľskú, spracovateľskú a celkovú. Užívateľská presnosť odpovedá pomeru rovnako zaradených pixelov v danej triede u oboch vrstiev k celkovému počtu pixelov zaradených do náležitej triedy v kontrolnej vrstve. Spracovateľská presnosť je spočítaná podobne, akurát v menovateli je celkový počet pixelov zaradených do danej triedy v kontrolovanej vrstve. Celková presnosť predstavuje podiel rovnako zaradených pixelov zo všetkých tried k celkovému množstvu pixelov. Túto analýzu, pri ktorej bol zisťovaný vplyv parametrov filtrácie na vymedzenie oblasti skál, sme uskutočnili nad menšími lokalitami. Prvá zachytáva kaňon Kamenice, má

4 Verifikácia a výsledky

rozlohu 16 ha a súradnice stredu sú $50^{\circ} 52' 13,089''$ s.š., $14^{\circ} 16' 25,290''$ v.d. (obr. 21/I). Na druhej je okolie Pravčickej brány, jej plocha je 32 ha a súradnice stredu sú $50^{\circ} 53' 5,592''$ s.š., $14^{\circ} 16' 47,459''$ v.d. (obr. 21/II).



Obr. 21: Testovacie lokality parametrov prvotnej filtrácie, I) kaňon Kamenice, II) Pravčická brána, zdroj: ČÚZK, vlastná tvorba

4.1.2 Presnosť filtrácie

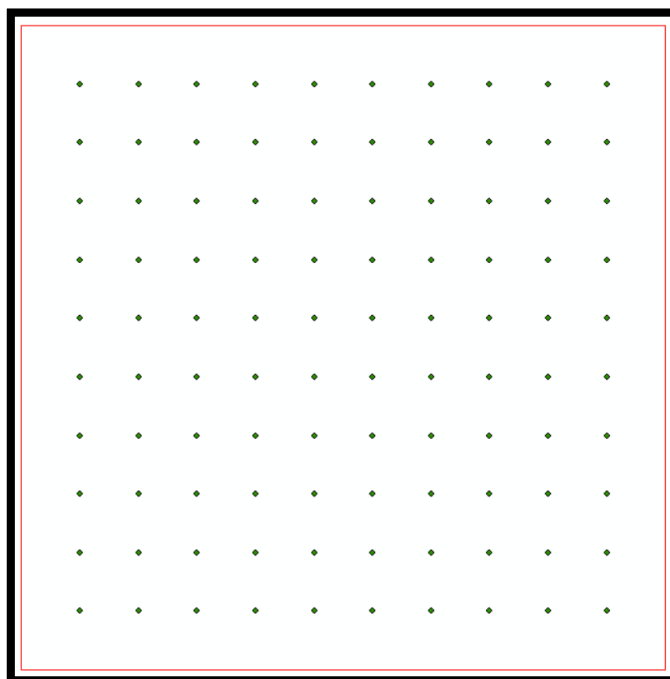
Samotné presné vyčlenenie jednotlivých oblastí by bolo zbytočné, ak by sa nepreukázalo, že priestorovo podmienená filtrácia s ich využitím nedosahuje presnejšie výsledky. Dokázať to môžeme uskutočnením priestorovo podmienenej filtrácie s dobre nastavenými súbormi parametrov pre jednotlivé oblasti a porovnaním výsledku s referenčným terénom. Tak isto zistíme odchýlku od kontrolného terénu aj u DMR vytvorených za pomoci filtrácie s len jedným súborom parametrov. Ak bude chyba DMR s využitím priestorovo podmienenej filtrácie dokázateľne nižšia ako v ostatných prípadoch, potvrdí sa jej účinnosť.

Na zistenie čo najlepších parametrov pre jednotlivé oblasti sme použili skript s názvom *tesp_param.py*, ktorý sme napísali. Vstupom je výsek oblasti, pre ktorú budú vypočítané čo

najpresnejšie parametre. Presnosť je určená hodnotou strednej chyby od kontrolného terénu. Počíta sa podľa vzorca

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_1^n \Delta h^2}{n}},$$

kde $RMSE$ je stredná chyba, Δh je výškový rozdiel v kontrolnom bode a n je počet kontrolných bodov. Množstvo kontrolných bodov bolo nastaviteľné a boli usporiadané v pravidelnej sieti (obr. 22). Pri zisťovaní najmenej chybových nastavení parametrov filtrácie jednotlivých oblastí sme kvôli výpočtovej a časovej náročnosti použili oblasti s rozlohou približne 1 ha a so 121 kontrolnými bodmi.



Obr. 22: Rozloženie kontrolných bodov, zdroj: vlastná tvorba

Na dáta je opakovane spúšťaná filtrácia s využitím modulu *lasground* (modul využíva filtračnú metódu zahusťovania TIN, popísanú v kapitole 2.2), pričom sa pri každej iterácii zmení hodnota niektorého z troch parametrov: *step*, *spike*, *offset*. *Step* je veľkosť bunky počiatočného TIN, *spike* maximálna veľkosť zachovaného ostňa nad povrchom (10-násobok tejto hodnoty platí pre ostne pod povrchom) a *offset* je maximálna vzdialenosť bodu od roviny trojuholníka. Pri každom opakovaní je vypočítaná stredná chyba, ktorá je následne spolu s parametrami filtrácie zapísaná do externého súboru formátu *.xls*. Počet iterácií je stanovený rozsahom hodnôt jednotlivých parametrov a intervalmi týchto hodnôt. Celkový počet je vypočítaný zo vzťahu

$$i_i = i_{st} * i_{sp} * i_o,$$

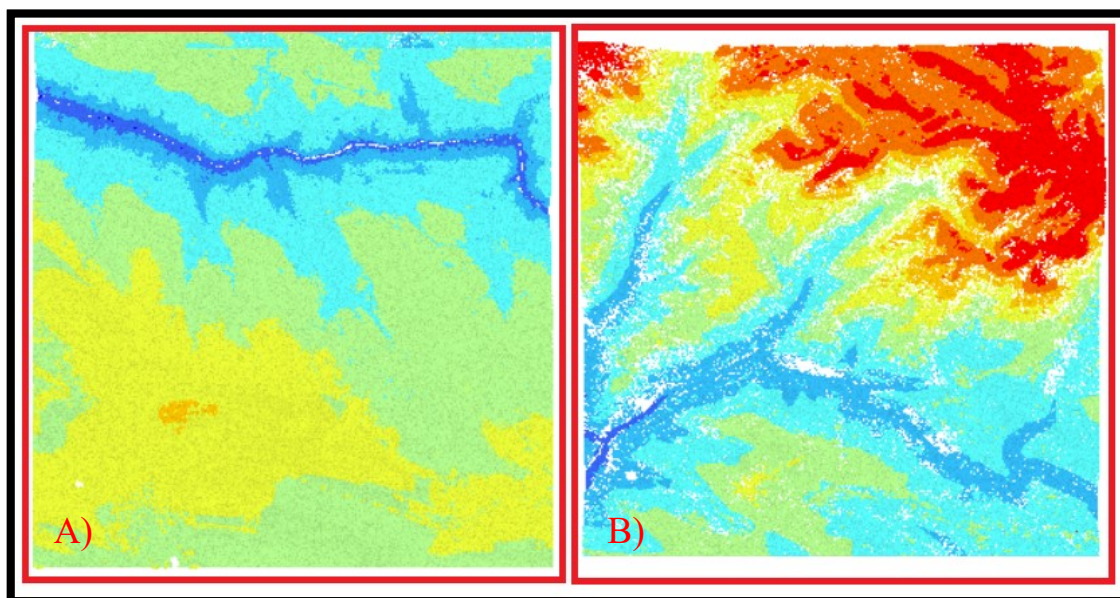
4 Verifikácia a výsledky

kde i_i je celkový počet opakovaní a i_{st}, i_{sp}, i_o sú počty rôznych hodnôt jednotlivých parametrov. Tie sú zrátané zo vzorca

$$i = \frac{(p_{max} - p_{min})}{k},$$

kde p_{max} je maximálna hodnota parametra, p_{min} minimálna hodnota parametra a k je krok, o ktorý sa hodnota parametra pri každej iterácii zmení. Z .xls súboru je potom vybratý súbor parametrov s najnižšou RMSE, ktorý sa použije na danú oblasť pri priestorovo podmienenej filtrácii.

Tento skript sme použili na zistenie najmenej chybových parametrov filtrácie u jednotlivých typov oblastí. Tieto parametre boli potom použité v priestorovo podmienenej filtrácii. Tak isto sme ho použili aj na územie, ktoré obsahovalo všetky typy oblastí, čím sme zistili najmenej chybné nastavenie parametrov filtrácie s iba jedným súborom parametrov.



Obr. 23: Dátové súbory testovacích oblastí, A) Janov a kaňon Kamenice, B) skalné mestá v okolí Pravčickej brány, zdroj: ZÚ, vlastná tvorba

Účinnosť priestorovo podmienenej filtrácie sme testovali na troch dátových súboroch. Prvý obsahuje obec Janov a kaňon Kamenice, má rozmery 2 x 2 km a súradnice stredu 50° 51' 54,91'' z.š., 14° 16' 25'' v.d. (obr. 23A), druhý obsahuje skalné mestá v okolí Pravčickej brány, tiež má rozmery 2 x 2 km a jeho stred má súradnice 50° 52' 59,73'' s.š., 14° 16' 34,41'' v.d. (obr. 23B) a tretí obsiahol celé územie (obr. 23A+B). So zistenými parametrami filtrácie sme uskutočnili priestorovo podmienenú filtráciu za pomoci nami napísaného skriptu *area_based_filter.py*. Ten má na vstupe vektorovú vrstvu oblastí a dáta LLS orezané podľa týchto oblastí. Dáta sú potom filtrované podľa oblastí, v ktorých sa nachádzajú a majú príslušné parametre. Nakoniec sú všetky filtrované dáta zlúčené a uložené do LAS Dataset-u. Ten

vstupuje do ďalšieho skriptu, ktorý sa volá *rmse.py* a vypočíta strednú a priemernú chybu vstupného LAS Dataset-u v porovnaní s DMR TUD. To dosiahne konverziou bodového mračna do rastru s priestorovým rozlíšením 1 m (rovnaké rozlíšenie má DMR TUD). Od tohto rastru je potom odpočítané DMR TUD a z ich rozdielu je vypočítaná priemerná a stredná chyba. Priemernú chybu sme dostali zo vzťahu

$$\bar{\Delta h} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta h_i}{n}$$

kde $\bar{\Delta h}$ je priemerná chyba, Δh je výškový rozdiel v kontrolnom bode a n je počet kontrolných bodov, čo v tomto prípade zodpovedalo počtu spoločných pixelov porovnávaných DMR. Tento ukazovateľ nám posluží na to, aby sme zistili, či je nami vytvorený terén podhodnotený alebo nadhodnotený. Stredná chyba je spočítaná z rovnakého vzorca ako v úvode podkapitoly, avšak kontrolné body sú tentoraz všetky spoločné pixely porovnávaných rastrov.

4.2 Výsledky

4.2.1 Presnosť vymedzenia oblastí

Pri vizuálnom porovnaní s vektorovou vrstvou oblastí projektu GeNeSiS sme obmieňali parameter dĺžky strany štvorcových oblastí a podielu skál v oblasti, čím sme dosiahli 4 rôzne varianty, popísané v tabuľke 2. Mapové výstupy zobrazujúce všetky varianty s komparačnou vrstvou na oboch čiastkových testovacích lokalitách (kap. 4.1.2, obr. 23) sa nachádzajú v Prílohe 3.

Tab. 2: Parametre variantov porovnávaných s vektorom oblastí TUD

Variant	Dĺžka strany štvorca [m]	Podiel skál v oblasti
1	100	0,18
2	100	0,22
3	200	0,17
4	400	0,09

Zdroj: vlastná tvorba

Z mapových výstupov si môžeme všimnúť, že dĺžka strany štvorca má generalizačnú rolu. Čím je jej hodnota vyššia, tým hrubšie sú stanovené výsledné oblasti. Dobrým príkladom je porovnanie variant 1 a 2 s variantom 4 na testovacej lokalite A. Oblasti budov sú pri prvých variantoch menšie a presnejšie vyznačujú priebeh obce Janov, zatiaľ čo pri variante 3 je do tejto oblasti začlenené aj širšie okolie obce. Obdobným príkladom je aj oblasť skál. Pri vyšších hodnotách dĺžky strany štvorca býva do prvotného odhadu skál zaradený celý štvorec, vrátane častí mimo skalných území. V takom prípade môže byť ako skala klasifikovaná napríklad aj

vegetácia, ktorá nebola filtráciou s jemnejšími parametrami odstránená. Výhodou variant s dlhšou stranou je okrem výrazného zrýchlenia procesu tvorby oblastí aj jednoduchšia voľba parametru podielu skál v oblasti. Ten totiž v takom prípade dosahuje významnejšie hodnoty iba ak sa tam vyskytuje značný podiel skalných areálov, ako je to v prípade skalných miest alebo kaňonov. Ak je štvorcová oblasť menšia, zvyšuje sa vplyv menších areálov, označených po hrubej filtrácii za skaly na podielu skál v oblasti. Kvôli tomu nastávajú situácie, kedy majú oblasti nachádzajúce sa priamo v skalnom meste nižší podiel skál v oblasti, ako niektoré areály ležiace úplne mimo skál. Všimnúť si to môžeme na mapových výstupoch variantov 1 a 2 v lokalite B. Ak je minimálny podiel skál v oblasti nižší, skaly sú lepšie zachytené, no do tejto oblasti je zaradených aj viacero polygónov ležiacich mimo oblasť skál vytýčenú pri tvorbe DMR TUD. Ak zvýšime jej hodnotu, mimo ležiacich polygónov je síce menej, no strácame aj areály skál.

Ďalším faktorom ovplyvňujúcim presnosť tvorby oblastí skál boli v našom pokuse parametre filtrácie. Pri prvotnom odhade postačovala pevná hodnota parametru *step* rovná 1/10 strany štvorca, no pri druhej iterácii bolo potrebné nájsť presnejšiu hodnotu. Pri našich experimentoch sme menili parameter *step*, čím sme dosiahli tri rôzne varianty (tab. 3). Tento parameter mal na výsledok najvyšší dopad. Okrem toho sme vo všetkých variantoch navýšili oproti predvoleným nastaveniam aj hodnotu *spike*, aby sme podrobnejšie zachovali skalné steny. Výsledky sme porovnávali formou kontingenčnej tabuľky s príslušným mapovým výstupom s oblasťou skál vytvorenou našou metodikou z DMR TUD (Príloha 4).

Tab. 3: Parametre filtrácie variantov vymedzenia oblastí skál

variant	step	spike	offset
1	3	1,5	0,05
2	4	1,5	0,05
3	5	1,5	0,05

Zdroj: vlastná tvorba

Ako je vidieť na výsledných mapách, v oboch testovacích lokalitách sa so znížením parametru *step* zvýšila plocha skál. V rámci tohto zvýšenia okrem väčšieho množstva zachytených skál pribudla aj neodfiltrovaná vegetácia. Vidieť to je napríklad v testovacej lokalite I, v ktorej je pri použití variantu 1 neodfiltrovaná vegetácia v spodnej časti kaňonu, ale aj v jeho okolí, a pri použití variant 2 a 3 sa tieto areály zmenšujú. Druhým príkladom je naopak skalná veža vo východnej časti testovacej lokality II, ktorá je pri filtrácii s parametrami z variantu 1 zachovaná a jej svahy sú klasifikované ako skaly, no pri filtrácii s parametrami z ostatných variantov je odstránená.

Kontingenčné tabuľky potvrdzujú úbytok pixelov klasifikovaných ako skaly s narastajúcou hodnotou parametra *step*. Tento pokles však nie je konštantný v oboch testovacích lokalitách. Kým v oblasti I pokleslo množstvo pixelov klasifikovaných ako skaly medzi hodnotami *step*-u 3 a 5 o 4,35%, v lokalite II to bolo 7,3%. Dáta z oboch testovacích území dosahovali odlišné výsledky aj pri presnostiach klasifikácie (tab. 4). Kým v lokalite I sa s narastajúcou hodnotou parametra *step* výrazne zvyšovala užívateľská presnosť, spracovateľská presnosť sa výrazne nemenila. V lokalite II sa naopak s nárastom *step*-u výrazne znižovala spracovateľská presnosť, no hodnota užívateľskej presnosti narástla iba nepatrne. V prvej oblasti to bolo spôsobené poklesom celkového počtu pixelov klasifikovaných ako skaly pri vyššej hodnote parametra, ktorá bola sprevádzaná zvýšením množstvom pixelov klasifikovaných do triedy skaly v oboch dátových súboroch. V druhej lokalite poklesol počet pixelov klasifikovaných ako skaly ešte výraznejšie, no okrem toho v tomto prípade došlo aj k poklesu dobre zaradených pixelov. Pomerovo ich ubudlo o niečo menej ako zle klasifikovaných, čo spôsobilo mierny nárast užívateľskej presnosti. Celková presnosť bola v oblasti I najvyššia pri parametroch z variantu 3 a najnižšia pri variante 1, čo zodpovedá trendu užívateľskej presnosti. Dôvodom je nemeniac sa hodnota spracovateľskej presnosti. V lokalite II nebol pozorovaný podobný trend. V jej prípade bol pokles spracovateľskej presnosti s narastajúcou hodnotou parametra *step* sprevádzaný nárastom užívateľskej presnosti, takže vo výsledku bola najnižšia celková presnosť pri použití parametrov filtrácie z variantu 2.

Tab. 4: Presnosti vymedzenia skál

oblasť	variant	spracovateľská presnosť [%]	užívateľská presnosť [%]	celková presnosť [%]
I	1	75,31	76,40	78,36
	2	75,20	79,45	80,04
	3	75,71	80,29	80,66
II	1	75,78	71,20	81,62
	2	71,69	72,65	81,48
	3	71,95	72,92	81,65

Zdroj: ZÚ, TUD, vlastná tvorba

Rozdiely v klasifikácii skál medzi jednotlivými testovacími lokalitami sú spôsobené viacerými faktormi. Najdôležitejším z nich je charakter pieskovcových skál v danej oblasti. Kým lokalite I dominuje kaňon rieky, podstatnú časť oblasti II predstavujú skalné mestá. V tých zvýšenie sledovaného parametra spôsobí zaradenie väčšieho množstva odrazov od skál do triedy neterénnych bodov, čím môže dôjsť k eliminácii niektorých skalných útvarov takým spôsobom, že sklon vypočítaný v tých miestach nebude dosahovať hodnoty požadované na

klasifikáciu do triedy skaly. V prípade kaňonu s okolím dosahuje vyššie nadmorské výšky práve bežný terén okolia, od ktorého je väčšina odrazov, tvoriaci kompaktný celok. Filtračný algoritmus pracuje s predpokladom, že k terénu patria body nachádzajúce sa najnižšie. To sa uplatňuje aj pri výbere iniciálnych bodov o hustote nastavenej parametrom *step*, takže odrazy od spodku kaňonu sú klasifikované ako terénne a ostávajú zachované. Zároveň ostáva neodfiltrované aj okolie, od ktorého je väčšina odrazov. Reliéf tak ostáva zachovaný nezávisle na parametroch filtrácie, ktorá ovplyvňuje iba svahy kaňonu a okrajové plošiny okolitého terénu. Vo výsledku je pri vyššej hodnote parametru *step* odfiltrovaná iba väčšia časť okrajovej plošiny, ktorá si zachováva dostatočnú strmosť na zaradenie do triedy skaly, čím sa paradoxne zväčšuje plocha oblasti skál.

Ďalším dôležitým faktorom spôsobujúcim rozdielne výsledky v oboch lokalitách je prítomnosť vegetácie. Tá je v kaňone v oblasti I veľmi hustá a pri nižších hodnotách parametru *step* nie je odfiltrovaná. To by samo o sebe v tomto prípade nebol problém, ak by to platilo iba pre vegetáciu na svahu kaňonu. Nepresnosť nastane v okamihu, keď nie je odfiltrovaná vegetácia nad dnom kaňonu. V takom prípade to spôsobí vysokú hodnotu sklonu na dne kaňonu, ktorá plynule prechádza až ku svahu, čím sa rozšíri plocha skál o chybné areály. Obdobne sa vegetácia chovala aj v lokalite II, no zachovanie skalných útvarov tu bolo dôležitejšie a eliminácia pieskovcových skál zapríčinila väčšiu chybu ako zachovanie vegetácie.

4.2.2 Presnosť filtrácie

Pri stanovení presnosti filtrácie sme skúšali filtráciu s rôznymi parametrovými súbormi, následne sme z výsledku spravili DMR v rastrovom formáte s priestorovým rozlíšením 1 m (podľa priestorového rozlíšenia DMR TUD) a pomocou mapovej algebry sme tento model porovnali s DMR TUD. Toto porovnanie sme uskutočnili na troch rôznych DMR (tab. 5), pričom na prvý bola použitá filtrácia iba s jedným súborom parametrov, ktoré boli určené s využitím skriptu *test_param.py*, druhý je výsledkom priestorovo podmienenej filtrácie s parametrami zistenými pomocou skriptu *test_param.py* a tretí model mal rovnaké parametre filtrácie ako druhý, iba oblasť skál bola filtrovaná jemnejšie (tab. 6) kvôli lepšiemu zachovaniu skalných stien. Priestorovo podmienená filtrácia bola v oboch prípadoch uskutočnená s využitím oblastí vytvorených použitím týchto parametrov: strana štvorca 400 m, minimálny podiel skál 0,09, *step* pri vytyčovaní oblasti skál 3 m. Výsledné DMR sa spolu s rastrami ich rozdielov vo výške oproti DMR TUD nachádzajú v Prílohe 5.

Tab. 5: Popis variantov filtrácie

Variant	Priestorovo podmienená filtrácia	Popis
1	Nie	najnižšie RMSE s jedným súborom parametrov
2	Áno	najnižšie RMSE s viacerými súbormi parametrov
3	Áno	ako variant 2, ale odstraňuje menej bodov v oblasti skál

Zdroj: vlastná tvorba

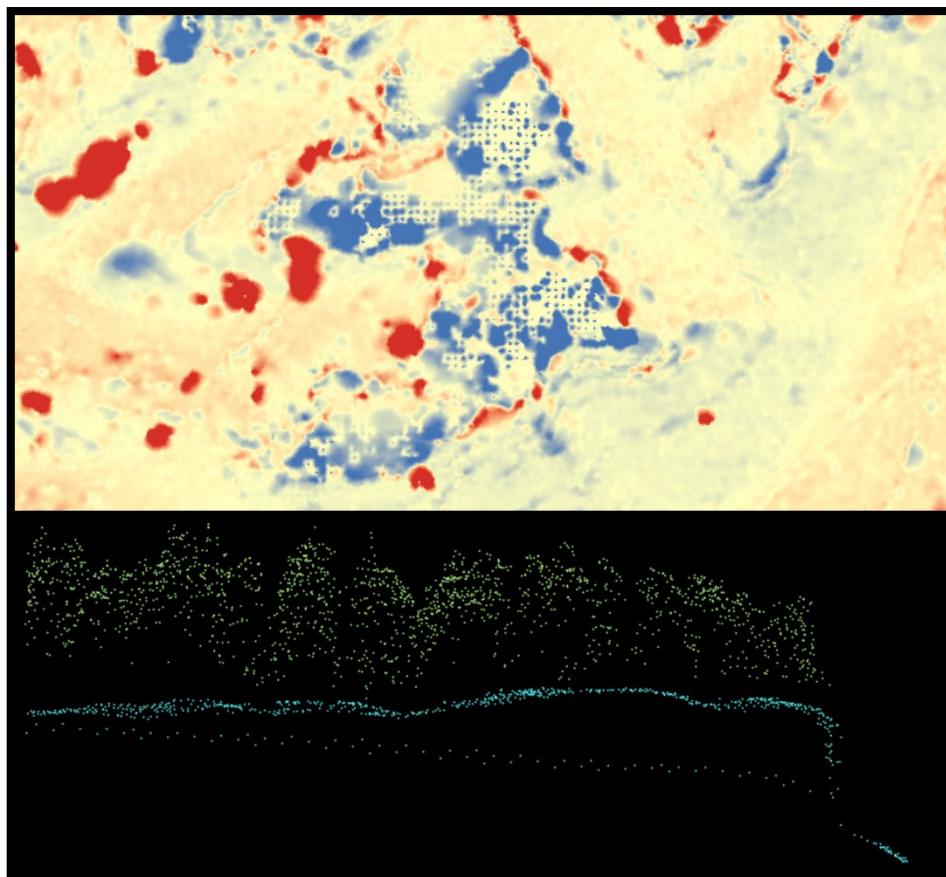
Tab. 6: Parametre filtrácie jednotlivých variantov

Variant	Oblasť	Step	Spike	Offset
1	Všetko	2,5	0,4	0,03
2	Budovy	9,5	0,6	0,05
	Skaly	3	1,1	0,07
	Vegetácia	4	1,15	0,05
3	Budovy	9,5	0,6	0,05
	Skaly	1,5	1,5	0,07
	Vegetácia	4	1,15	0,05

Zdroj: vlastná tvorba

Z výstupov z testovacej lokality A si môžeme všimnúť, že žiaden variant nedosiahol v oblasti kaňonu Kamenice výsledky s celkovou presnosťou viac ako cca 80%. Prvý variant odfiltroval väčšinu stien kaňonu a zároveň neeliminoval rozsiahle plochy vegetácie v kaňone aj v jeho okolí. Druhý model zachoval relatívne dobre severný svah kaňonu vrátane vegetácie, no odfiltroval aj veľké časti hlavne južného svahu a tiež neodstránil veľké plochy vegetácie v zvyšku lokality, aj keď boli tieto plochy výrazne menšie ako v prípade prvého variantu. Tretí DMR zachoval svahy kaňonu najlepšie, aj keď spoločne s vegetáciou. Tak isto sa v tomto prípade zväčšili plochy neodfiltrovannej vegetácie v tých častiach oblasti, kde bolo územie chybné klasifikované ako skaly. Budovy boli vo variantoch využívajúcich priestorovo podmienenej filtrácie odstránené uspokojivo, zatiaľ čo v prípade modelu vytvoreného za pomoci filtrácie s iba jedným parametrom neboli odstránené skoro vôbec.

V testovacej lokalite B by sa výsledky dali charakterizovať podobne. Model vytvorený s iba jedným parametrom na jednej strane nezachovával dobre skaly, na strane druhej neodstraňoval rozsiahle lesné plochy. Variant 2 v niektorých miestach odfiltroval okraje skál ešte viac ako variant 1, no väčšinou v týchto miestach zmenšil rozdiel vo výške oproti kontrolnej vrstve a zachoval výrazne menej vegetácie aj v skalách, aj v ostatnom území. Tretí model zachoval svahy skál najlepšie, no opäť poväčšine aj s vegetáciou, ktorá tam rástla. Tak isto ponechal výrazne viacej vegetácie v miestach, kde boli skaly nesprávne klasifikované.



Obr. 24: Pravidelná bodová sieť pod terénom, na rozdielovom rastry výsledných DMR (hore), na vstupných dátach (dole), zdroj: ZÚ, TUD, vlastná tvorba

Okrem toho sa vo variantoch 2 a 3 v testovacej oblasti B na niektorých skalných plošinách vyskytol jav, kedy bola výška DMR vo veľmi malých intervaloch striedavo podobná a výrazne nižšia ako výška kontrolného modelu (obr. 24, hore). Tento jav bol spôsobený pravidelným bodovým polom nachádzajúcim sa pod niektorými skalnými plošinami vstupného dátového súboru (obr. 24, dole). Filtrácia s parametrami variantov 2 a 3 síce v tejto oblasti správne odfiltrovala vegetáciu nad povrchom, no nakoľko boli tieto body nižšie ako terén, neodstránila ich. V miestach týchto bodov bol preto oproti kontrolnej vrstve DMR nižší. Pri filtrácii s jedným súborom parametrov k tomuto javu nedošlo.

Tab. 7: Chyby filtrácie

Variant	Oblasť A		Oblasť B		Oblasť A+B	
	RMSE [m]	$\sigma_{\Delta h}$ [m]	RMSE [m]	$\sigma_{\Delta h}$ [m]	RMSE [m]	$\sigma_{\Delta h}$ [m]
1	1,5543	0,2957	2,8875	0,1944	2,3072	0,2854
2	1,2306	0,3253	2,3769	0,0255	1,8639	0,2171
3	1,8940	0,5261	2,8545	0,4291	2,4224	0,5180

Zdroj: ZÚ, TUD, vlastná tvorba

Čo sa týka štatistík odvodených z rozdielov DMR (tab. 7), v každej lokalite dosiahol najnižšie RMSE variant 2. Spolu s variantom 1 boli navrhnutý tak, aby v rámci svojich

možností mali čo najnižšie RMSE. Variant 2 mal nižšiu hodnotu hlavne preto, že v každej oblasti boli použité parametre filtrácie, zatiaľ čo prvá možnosť mala na celé územie jeden súbor parametrov. To sa prejavilo u budov, ktoré priestorovo podmienená filtrácia úspešne odfiltrovala, u bežného terénu, ktorý kvôli adaptácii na skaly a budovy variantu 1 neeliminoval väčšie množstvo vegetácie, ale aj u skál, ktorých okraje boli odfiltrované v menšej miere. Celkovo mal najvyššie RMSE variant 3. No porovnaním priemerných chýb všetkých modelov môžeme povedať, že je to hlavne kvôli výrazne väčšiemu množstvu neodfiltrovannej vegetácie v skalnej oblasti.

5 DISKUSIA

Popísané výsledky ukázali, že priestorovo podmienenou filtráciou môžeme dosiahnuť spoľahlivejšie výsledky ako s využitím filtrácie s jedným súborom parametrov. Nami navrhnutá metóda síce nedokázala úspešne zachovať okraje skál, čo bolo zapríčinené jednak nepresným vymedzením oblasti skál, nakoľko viaceré okraje pieskovcových štruktúr neboli do tejto kategórie zahrnuté, pričom sem boli zaradené aj lokality, kde sa nenachádzali skaly. Viedlo to aj k druhej okolnosti, ktorá zapríčinila odfiltrovanie okrajov skál. Tou bolo nastavenie parametrov filtrácie tak, aby mali v danej oblasti čo najmenšiu strednú chybu. Práve zvýšená prítomnosť vegetácie v oblasti spôsobila, že najnižšej chyby dosiahli parametre viac eliminujúce okraje skál. Pri parametroch, ktoré zachovávali skaly lepšie, boli výsledné chyby najvyššie a to hlavne kvôli neodfiltrovanej vegetácii v oblasti. Napriek tomu sa domnievame, že s využitím lepšie vyčlenených oblastí alebo s inak definovanými oblasťami je priestorovo podmienená filtrácia užitočný prístup na filtráciu dát LLS v teréne s komplikovanou topografiou, akým sú skalné mestá. Dôkazom je DMR projektu GeNeSiS, ktoré aj navzdory manuálne vyčleneným oblastiam dosiahlo strednú chybu $\pm 0,38$ m (Trommler a Csaplovics, 2006). Našou metódou sme dosiahli najnižšej strednej chyby na celom záujmovom území 1,86 m, no vzhľadom na to, že kontrolnou vrstvou bola práve DMR projektu GeNeSiS, to nie je úplne presné číslo. Okrem toho chyba DMR projektu GeNeSiS sa vzťahuje na sieť kontrolných bodov z terénu, kvôli ktorých hustote nie sú zachytené všetky chybové areáli modelu a výsledná stredná chyba by mohla byť vyššia (alebo aj nižšia) v prípade, že by kontrolné body mali hustotu 1 bod / m², ako je to v našom prípade.

Tvorba oblastí

Ťažiskom tejto práce nebolo uskutočniť priestorovo podmienenú filtráciu, ale otestovať navrhnutú metodiku automatizovanej tvorby oblastí vstupujúcich do tejto filtrácie. Nasledujúci text sa venuje práve rozboru výsledkov tohto experimentu.

Pri tvorbe oblasti budov sme mali uľahčenú prácu vďaka pomocnej vrstve, ktorá obsahuje informáciu o rozmiestnení budov v oblasti. Našou prácou bolo vymyslieť pravidlo, podľa ktorého by sa táto informácia využila na klasifikáciu do oblasti budov. V prípade, že by sme použili iba prienik oblasti s určitou budovou, spôsobili by to klasifikáciu celej oblasti do triedy budovy aj v prípade, že by sa nachádzala osamostatnená budova uprostred skalného mesta. To by bolo problematické najmä vtedy, ak by sme mali vyššiu hodnotu veľkosti oblasti,

pretože kvôli minimálnemu podielu plochy budov, by bola celá oblasť filtrovaná s parametrami určenými na prísnejšie odstraňovanie bodov. Z tohto dôvodu sme pri klasifikácii oblasti budov pridalí parameter minimálneho podielu budov v oblasti, ktorého hodnota musí byť v štvorci prekročená, aby bola oblasť priradená do triedy budov. Výrazným nedostatkom tohto prístupu je nutnosť znalosti plochy najväčšej z osamostatnených budov a variabilita hodnoty vzhľadom na veľkosť štvorca. Okrem toho môže vo výnimočnom prípade nastať situácia, keď je hodnota podielu budov v oblasti vyššia v lokalite so skalami ako v zastavanej oblasti, čo vedie k ignorovaniu výskytu budov aj v oblasti, v ktorej by nemali byť opomenuté.

Pri tvorbe oblasti skál bola situácia zložitejšia. Nemali sme totiž žiadnu použiteľnú pomocnú vrstvu, ktorá by obsahovala informáciu o ich rozložení v rámci testovacej lokality. Preto sme túto informáciu museli nejakým spôsobom vyprodukovať. Využili sme na to sklon odfiltrovaného terénu. Premisa bola, že v miestach s dostatočne vysokým sklonom sa budú nachádzať svahy skál. To naráža hneď na niekoľko problémov.

Platí to iba v prípade, že je terén správne odfiltrovaný. Ak sú parametre príliš prísne, sú odfiltrované aj niektoré skaly a sklon tam nemusí mať požadovanú hodnotu. Ak sú príliš jemné, nie je odfiltrovaná vysoká vegetácia a sklon má dostatočnú hodnotu na zaradenie do skál aj v miestach, kde sa žiadne nenachádzajú. To je v skratke hlavný problém filtrácie v skalných mestách a nie je to riešiteľné prostou filtračnou metódou. V našej práci sme to riešili iteratívnou filtráciou. V prvom opakovaní sme aplikovali hrubú filtráciu, ktorá odstránila väčšinu vegetácie a spolu s ňou aj množstvo skál. Zo sklonu sme vytvorili areály skál a podobne ako u oblasti budov sme použili minimálny podiel skál v oblasti. Pri druhej iterácii bola filtrácia uskutočnená jemnejšie, tak aby boli zachované skaly a zasahovala iba do oblastí prekračujúcich minimálny podiel skál v oblasti. Týmto spôsobom sme redukovali neodfiltrovanú vegetáciu zaradenú do oblasti skál iba na územia v blízkosti reálnych skál. Podiel skál v oblasti je však závislý na veľkosti oblasti. Pri menších oblastiach bola jeho hodnota veľmi variabilná a v niektorých oblastiach mimo skál dosahovala vyššie hodnoty ako v skalách. Ak boli oblasti príliš veľké, bola druhá iterácia filtrácie aplikovaná aj na širšie okolie skál. Veľkosť oblasti a minimálny podiel skál v oblasti sme mohli nakonfigurovať v porovnaní s oblasťou skál vstupujúcou do tvorby DMR projektu GeNeSiS.

Výrazný vplyv na charakter oblasti skál mali aj parametre jednotlivých filtrácií, na ktorých základe sa spočítal sklon terénu. Pri prvotnej filtrácii sa ukázalo postačujúce zmeniť parameter *step* na 1/10 strany oblasti. Pri malých oblastiach to úspešne odfiltrovalo vegetáciu a pri veľkých to zas ponechávalo hlavné skalné masívy, čo postačovalo na prekročenie prahovej hodnoty pomeru skál v oblasti. Pri druhej iterácii boli odskúšané rôzne obmeny parametru

step, pričom najvhodnejšia sa ukázala hodnota 3, pri ktorej bolo síce viac oblastí, kde sa nenachádzali skaly zaradené do tejto kategórie, no zároveň najlepšie zachovávala aj menšie skalné útvary. Porovnanie sme uskutočnili na vrstve skál vytvorenej rovnakým postupom z DMR projektu GeNeSiS.

Všetky vyššie spomenuté špecifiká určenia oblasti skál súvisia s tým, akými hodnotami sklonu definujeme skaly. Tieto hodnoty sa vplyvom filtrácie znižujú, pretože odfiltrovaním okrajov skál sa znižuje aj sklon ich svahov. To je spôsobené zníženou hustotou bodového mračna, ktorá vo výsledku zmenší sklon skalnej steny. Túto skutočnosť sme v našej práci reflektovali a okrem zníženia základnej hodnoty sklonu potrebnej na klasifikáciu do triedy skál, sme použili aj prahovanie s hysteréziou, pretože skaly po odfiltrovaní časti ich okrajov nemajú po celom obvode rovnaký sklon a niektorým svahom sa sklon zníži natolko, že by nespĺňali základnú podmienku. Preto je tam nastavená druhá prahová hodnota tvoriaca interval sklonu terénu, ktorý sa počíta ako skala iba v prípade, že susedí s už klasifikovanou skalou. Takýto prístup k výberu skál ale spôsobil, že boli vybraté aj oblasti, kde bola plocha so sklonom prekračujúcim základnú hodnotu iba minimálna, no susediaca druhá trieda sklonu zaberala veľkú oblasť. Príkladom sú časti riečnych korýt alebo terás, ktorých sklon by sám o sebe nepostačoval, no vplyvom neodfiltrovanj vegetácie boli celé zaradené do oblasti skál. Najväčším problémom tejto časti bol nedostatok kontrolných dát. Využiť sme na to mohli opäť už hotové DMR, no aj v tom prípade by sme museli stanoviť konkrétne kritéria, ktoré by definovali skaly a nemali by sme ich ako verifikovať.

V konečnom dôsledku sa dá povedať, že nami navrhnutá metodika vymedzenia oblasti skál nebola úplne presná. Aj keď sme nemali k dispozícii spoľahlivú vrstvu obsahujúcu skaly definované rovnakým spôsobom ako v našom experimente, z dostupnej vektorovej vrstvy oblastí projektu GeNeSiS vieme určiť, ak boli do kategórie skál zaradené niektoré oblasti, ktoré tam nepatrili. Ďalšie nepresnosti vieme zistiť aplikáciou priestorovo podmienenej filtrácie využívajúcou tieto oblasti na testovacie dáta a porovnaním výsledku s kontrolným DMR.

Filtrácia

Filtrácia nebola síce hlavným cieľom práce, no poslúžila nám hneď v dvoch rovinách. Prvou bola verifikácia presnosti vzniknutých oblastí, druhou zas overenie reálnej účinnosti priestorovo podmienenej filtrácie s takto definovanými oblasťami. Práve tieto dva aspekty budú bližšie popísané v nasledujúcich odstavcoch.

Presnosť oblasti skál bola najlepšie vidieť na filtrácii s parametrami variantu 3. Tento variant totiž skoro vôbec nefiltroval dáta z oblasti skál, a preto sú na rozdielovom rastru dobre

zvýraznené miesta, kde bolo územie chybné klasifikované ako skaly (neodfiltrované časti lesa sa v Prílohe 5 javia ako hrubšie červené areály), ale aj areály, ktoré mali byť klasifikované ako skaly, no neboli (znázornené modrou farbou). V testovacej lokalite A boli skaly klasifikované relatívne dobre. Chybné sem boli zaradené iba niektoré areály v blízkom okolí kaňonu, no steny kaňonu boli klasifikované presne. V testovacej lokalite B sme ale dosiahli o niečo horšie výsledky. Ako oblasť skál boli nesprávne označené aj časti riečnych korýt a svahov pahorkov, naopak sem nebola zatriedená značná časť skalných svahov. Vo všeobecnosti to bolo zapríčinené metódou výberu skál na základe parametra minimálneho podielu skál v oblasti. Keďže táto miera mala v menších oblastiach veľmi variabilné hodnoty, použili sme na vyčlenenie väčšie štvorce, kvôli čomu bolo započítané do oblasti skál aj ich okolie. Následkom toho bola aj značná časť skál nezaradená, pretože aby nebola chybné vybraná ešte väčšia plocha, použili sme prísnejšie kritéria výberu skál.

Pri overovaní účinnosti priestorovo podmienenej filtrácie sme dáta filtrovali s parametrami, ktoré dosahovali najnižšiu strednú chybu. Pri filtrácii s jedným súborom parametrov sme tieto parametre použili na celé územie, pri priestorovo podmienenej filtrácii sme zistili parametre s najnižšou chybou pre každú oblasť. Výsledná stredná chyba s priestorovo podmienenou filtráciou bola o vyše 40 cm nižšia, čo zodpovedá zvýšeniu presnosti o cca 20%. Celková hodnota chyby 1,86 m je sama o sebe dosť vysoké číslo, no treba brať do úvahy aj to, že záujmovú lokalitu tvorili z veľkej časti skalné útvary, kde aj nesprávne odfiltrovanie niekoľkých bodov môže zmeniť výšku povrchu o desiatky metrov. Ďalej treba brať do úvahy aj presnosť vymedzených oblastí, aj keď tá nebola z pohľadu práce zásadným problémom. Priemerná chyba mala kladnú hodnotu, čo znamená, že neodfiltrovaná vegetácia mala na strednej chybe ešte väčší podiel ako odfiltrované časti skál. Okrem toho aj kontrolný DMR má deklarovanú strednú chybu približne $\pm 0,38$ m a v územiach so skalami až 4 m (Trommler a Csaplovics, 2006). To treba mať na zreteli, pretože nám to môže zvyšovať chybu aj tam, kde sú body odfiltrované správne. Najväčšia zachytená chyba je v referenčnom modeli až 28,42 m a vzhľadom na množstvo kontrolných bodov je pravdepodobné, že sa podobných a možno ešte vyšších chýb vyskytuje v DMR TUD viacero. V konečnom dôsledku je podľa autora možné použiť priestorovo podmienený prístup k filtrácii na dosiahnutie presnejšieho DMR v skalných mestách.

Navrhované úpravy

V rámci práce bolo spomenutých viacero nedostatkov, ktoré spočívajú v prístupe k riešenému problému. V tejto časti sa budeme venovať práve im, s tým, že načrtujeme aj možné riešenia týchto nedostatkov, ktoré by v budúcnosti mohli byť implementované.

Jednou z hlavných nevýhod nami navrhnutej metodiky je priveľké množstvo parametrov, ktorých optimálne hodnoty sa líšia pri použití na rôzne územia. Nesprávne nastavenie týchto parametrov vedie k významným nepresnostiam vo vymedzovaní jednotlivých oblastí, čím algoritmus stráca význam, pretože namiesto oblastí so špecifickými charakteristikami dostávame oblasti, do ktorých je zahrnutá zmes zo všetkých definovaných typov krajiny. Okrem toho je nutné vynaložiť úsilie na zistenie optimálnych hodnôt týchto parametrov, čo zatieňuje výhodu z automatizácie celého procesu.

Jedným z nahradených parametrov by mohol byť minimálny podiel budov v oblasti. Na jeho optimálnu hodnotu je potrebné vopred poznať najväčšiu budovu v skalných oblastiach, čo vyžaduje značnú znalosť skúmanej lokality, no ani to nezaručí, že do oblasti budov budú zaradené všetky oblasti, ktoré tam patria. Riešením by mohlo namiesto toho byť použitie morfolologickej operácie otvorenie na oblasť budov. To by odstránilo osamostatnené oblasti budov, no zanechalo by to oblasti pokrývajúce zástavbu, definovaná by musela byť akurát veľkosť okna. Implementácia tohto prístupu by ani nebola príliš náročná, vzhľadom na to, že pravidelná štvorcová sieť, ktorú všetky oblasti tvoria je analógiou rastrového obrazu, na ktorý boli morfologické operátory uspôsobené.

Podobný problém je aj s parametrom minimálny podiel skál v oblasti. Avšak v tomto prípade by jeho nahradenie morfologickou operáciou otvorenie nemalo taký účinok, pretože poloha skál je iba nami vytvoreným hrubým odhadom s množstvom nepresností a dostatočne vysoký sklon by sa nachádzal vo väčšine oblastí. Čiastkovým riešením by mohlo byť ponechanie pomeru skál v oblasti, no prahová hodnota by sa mu nastavovala vyššia tak, aby do skál neboli zaradené žiadne z oblastí, ktoré tam nepatria. Následne by na výsledok bola použitá morfologická operácia uzavretie, ktorá by rozšírila oblasť skál o štvorce, ktoré síce nemali dostatočný podiel skál, no nachádzajú sa v skalách. Vo výsledku by to nezredukovalo počet parametrov, no mohlo by to spresniť vymedzenie skál.

Ďalej by možno pomohla zmena v konceptuálnej stránke. Nami definovaná oblasť skál sa ukázala ako veľmi rôznorodá. Príkladom je rozdielne správanie algoritmu v kaňone a v skalných mestách. Tieto rozdiely sa prejavili aj vo vymedzovaní oblastí, aj pri samotnej filtrácii. V kaňone bola väčšina skál klasifikovaná správne aj pri hrubšej filtrácii a jemnejšie

parametre iba spôsobili nesprávne zaradenie niektorých areálov do skál. Naopak v skalných mestách sa ukázalo prijateľnejšie použiť filtráciu s jemnými parametrami, pretože vďaka tomu pribudlo do triedy skál viac správnych areálov. Rozdelenie oblasti skál na viacero podoblastí by preto mohlo prispieť k lepšiemu výsledku.

6 ZÁVER

Filtrácia dát LLS predstavuje komplexný problém, pri ktorého riešení je potrebné nespočetné množstvo prístupov, pretože Zem je natoľko rôznorodá, že aj najsofistikovanejší prístup to nedokáže reflektovať. Dobrým príkladom sú skalné mestá, v ktorých je použitie väčšiny doposiaľ známych filtračných algoritmov neefektívne už zo samotného princípu ich fungovania. Práve na tento typ krajiny bola zameraná táto práca. Popísali a otestovali sme v nej metódu automatickej tvorby podoblastí s charakteristickým reliéfom. Na každú takúto podoblasť boli použité zodpovedajúce parametre filtrácie pri tzv. priestorovo podmienenej filtrácii. Tento prístup bol na tom istom území použitý už pri riešení projektu GeNeSiS TUD (Trommler a Csaplovics, 2006), no podoblasti boli vtedy vyčlenené manuálne na podklade tieňovaného reliéfu a boli definované odlišným spôsobom.

Hlavným cieľom práce bolo analyzovať možnosti automatickej tvorby oblastí vstupujúcich do priestorovo podmienenej filtrácie a dopad takejto filtrácie na presnosť DMR z prostredia pieskovcových skalných miest. Tento cieľ sme splnili, pretože sa nám podarilo automatizovaným postupom vytvoriť relatívne presne oblasti s pre skalné mestá špecifickým typom terénu, vďaka čomu sa znížila stredná chyba DMR o viac ako 40 cm oproti filtrácii s len jedným súborom parametrov. Plný potenciál priestorovo podmienenej filtrácie však nebol úplne využitý, hlavne kvôli nepresnostiam vo vyčlenení oblasti skál. Tam boli po aplikácii nášho postupu vo viacerých prípadoch pridané aj územia, v ktorých sa žiadne skaly nenachádzali, ale naopak sem neboli zaradené niektoré okraje skalných plošín a svahov, ktoré do tejto kategórie patrili. Práve nepresnosť vo vymedzení tejto triedy zapríčinila najväčšie chyby vo výslednom DMR, pretože aj kúsok odfiltrovannej skalnej plošiny môže viesť k chybe v ráde desiatok metrov, čo sa spolu s väčšími zalesnenými areálmi s neodfiltrovanou vegetáciou ukázalo ako najväčšie zdroje chýb.

V konečnom dôsledku sa potvrdila hypotéza, že rozdelenie krajiny do oblastí so špecifickým typom terénu, ktorému odpovedajú aj parametre filtrácie pri tvorbe DMR je použiteľné ako relatívne účinný prístup. Dôležitým aspektom je však klásť dôraz na presné vyčlenenie týchto oblastí, pretože s pribúdajúcimi zle klasifikovanými areálmi sa stráca zmysel takéhoto prístupu, nakoľko aj tak vznikajú oblasti, ktoré nevyjadrujú špecifický typ terénu. Okrem nami navrhnutého postupu pri filtrácii sa dajú takto vytvorené oblasti použiť aj inak. Oblasť skál môže byť podobne ako v práci Lysáka (2016) použitá ako špecifický príznak, ktorý

by vstupoval do robustnej interpolácie (kap. 2.6.2), čím by nahradil ortofoto, ktoré nedokáže snímať cez hustú vegetáciu.

ZDROJE

ArcGIS Online. Dostupné z URL: <https://www.arcgis.com/home/index.html> (cit. 23. 6. 2018)

AXELSSON, P., 2000: DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 33, part B4, s. 110-117 (2000).

BADEA, D., JACOBSEN K., 2008: Filtering process of lidar data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 37, Part B1. Beijing 2008, s.815 -819 (2008). Dostupné z URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.698.3746&rep=rep1&type=pdf> (cit. 29. 5. 2018)

BRÁZDIL, K., 2016a: Technická zpráva k digitálnímu modelu reliéfu 4. generace (DMR 4G). Zeměměřický úřad. Vojenský geografický a hydrometeorologický úřad. Praha 2016.11 strán. Dostupné z URL: http://geoportal.cuzk.cz/Dokumenty/TECHNICKA_ZPRAVA_DMR_4G.pdf (cit. 23. 6. 2018)

BRÁZDIL, K., 2016b: Technická zpráva k digitálnímu modelu reliéfu 5. generace (DMR 5G) Zeměměřický úřad. Vojenský geografický a hydrometeorologický úřad. Praha 2016.17 strán. Dostupné z URL: http://geoportal.cuzk.cz/Dokumenty/TECHNICKA_ZPRAVA_DMR_5G.pdf (cit. 23. 6. 2018)

BRIESE, CH., 2010: Extraction of digital terrain models. In: Vosselmann, G., Maas, H.-G.: *Airborne and terrestrial laser scanning*. Dunbeath, Scotland 2010: Whittles Pub., 318 s.

BRIESE, CH., PFEIFER, N., DORNINGER, P., 2002: Applications of the robust interpolation for DTM determination. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 34, s. 55 – 61(2002).

České Švýcarsko. Praha : GeoBohemia, c2005, 2005. (České regiony). ISBN: 80-239-5193-9.

DUŠÁNEK, P. 2014: Nové výškopisné mapování České republiky. GIS Ostrava 2014.

Dostupné z URL:

http://gisak.vsb.cz/GIS_Ostrava/GIS_Ova_2014/sbornik/papers/gis2014526faa8a434ef.pdf

(cit. 22. 6. 2018)

DUŠÁNEK, P., 2016: Technická zpráva k digitálnímu modelu povrchu 1. generace (DMP 1G).

Zeměměřický úřad. Vojenský geografický a hydrometeorologický úřad. Praha 2016.17 strán.

Dostupné z URL:

http://geoportal.cuzk.cz/Dokumenty/TECHNICKA_ZPRAVA_DMP_1G.pdf (cit. 23. 6. 2018)

FILIN, S., 2002: Surface clustering from airborne laser scanning data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 34, s. 117 – 124 (2002).

GEOFABRIK GmbH Karlsruhe, 2018. Dostupné z URL: <https://www.geofabrik.de/> (cit. 21.6. 2018)

HANUS, K., 2013: The applications of airborne laser scanning in archaeology. *Studies in Ancient Art and Civilization*, vol. 16, s. 233-248 (2013).

HARALICK, R., SHAPIRO, L.G., 1992: *Computer and robot vision*. Addison_Wesley Publishing Company 1992 (672 strán).

HOLMAN, L., 2013. Zpřesnění DMR v pískovcovém skalním terénu s využitím přesné registrace dat leteckého laserového skenování. Diplomová práce. Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie PřF UK, Praha, 83 s.

iTras & PATZELT, Z., 2009 - 2018. Dostupné z URL:

<http://itras.cz/ceske-svycarsko/galerie/1367/> (cit. 20. 6. 2018)

KOFLE, B., PFEIFER, N., 2007: Correction of laser scanning intensity data: Data and model-driven approaches. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 62, s. 415 – 433 (2007).

LYSÁK, J., 2011: Filtrace dat leteckého laserového skenování v pískovcových skalních městech. Seminární práce. Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie PřF UK, Praha, 27 s.

LYSÁK, J., 2016: Topografické mapování skalních útvarů s využitím dat leteckého laserového skenování. Dizertační práce. Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie PřF UK, Praha, 248 s.

PFEIFER, N., STADLER, P., BRIESE, CH., 2001: Derivation of digital terrain models in the SCOP++ environment. OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Digital Elevation Models, Stockholm 2001, 13 s.

POLÁKOVÁ, T., 2016: Využití doplňkových informací o pulsu pro klasifikaci dat LLS v členitém terénu. Diplomová práce. Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie PřF UK, Praha 2016, 94 s.

RAPIDLASSO, 2012: Rapidlasso GmbH: fast tools to catch reality. Dostupné z URL: <https://rapidlasso.com/> (cit. 23. 6. 2018)

SITHOLE, G., VOSSSELMAN, G., 2004: Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. *ISPRS Journal of photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 59, s. 85 – 101 (2004).

SITHOLE, G., VOSSSELMANN, G., 2005: Filtering of airborne laser scanner data based on segmented point clouds. ISPRS – Workshop „Laser scanning 2005“, s. 66 – 71

SOHN, G., DOWMAN, I., 2002: Terrain surface reconstruction by the use of tetrahedron model with the MDL criterion. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, s. 336 – 344 (2002) . Dostupné z URL:

<https://pdfs.semanticscholar.org/1b08/59d800ebb0c4ea44b37eb2301cac60c13ac7.pdf>

(cit. 3. 6. 2018)

TROMMLER, M., CSAPLOVICS, E., 2006: Geoinformationsnetzwerke für die grenzüberschreitende Nationalparkregion Böhmisches-Sächsisches Schweiz. In: Strobl, J.,

Blaschke, T. & Griesebner, G. (Hrsg.): *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung, Beiträge zum 18. AGIT-Symposium*, Salzburg 2006, s. 657 – 662.

TÓVÁRI, D., PFEIFER, N., 2005: Segmentation based robust interpolation – a new approach to laser data filtering. ISPRS – Workshop „Laser scanning 2005“, s. 79 – 84.

VOSSSELMAN, G., 2000: Slope based filtering of laser altimetry data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 33, part B3, s. 935 – 942 (2000). Dostupné z URL: http://www.isprs.org/proceedings/Xxxiii/congress/part3/935_XXXIII-part3.pdf (cit. 2. 6. 2018)

ZOZNAM PRÍLOH

Príloha 1: Procesný diagram

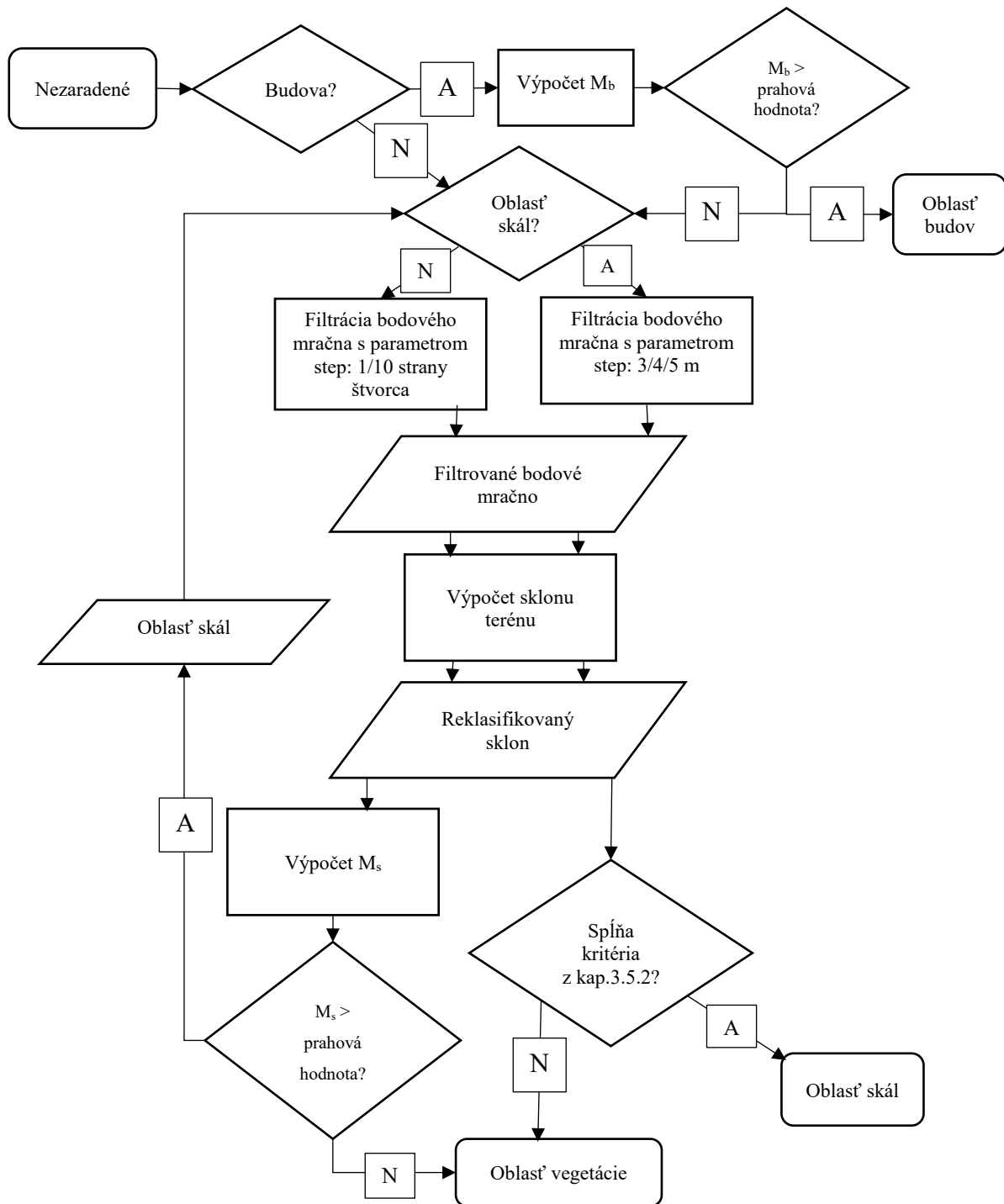
Príloha 2: Použité skripty

Príloha 3: Oblasti priestorovo podmienenej filtrácie

Príloha 4: Vplyv parametrov filtrácie na vymedzenie oblasti skál

Príloha 5: Výsledné DMR

Príloha 1: Procesný diagram



Príloha 2: Použité skripty

Classify_areas.py

- vstup: .las dátový súbor určený na filtráciu, dĺžka strany štvorcovej oblasti, pomocná vektorová vrstva budov, prahová hodnota minima podielu skál v oblasti.
- funkcia: vytvorí pravidelnú štvorcovú sieť podľa rozsahu vstupnej LAS vrstvy. Štvorcami sú postupne pridávané hodnoty do atribútu *class*. Hodnota 1 predstavuje oblasť budov a je nadobudnutá v prípade, že pomer plochy budov prekrývajúcich sa z oblasťou ku ploche štvorca je vyšší ako prahová hodnota. Oblasť skál je reprezentovaná hodnotou 2. Tú oblasť nadobúda, ak už nezískala hodnotu 1, alebo ak je pomer plochy skál v oblasti ku obsahu štvorca vyšší ako prahová hodnota. Následne získavajú hodnotu 2 iba polygóny skál, zbytok nadobudne hodnotu 3, čo predstavuje oblasť vegetácie. Ostatné štvorce, v ktorých sa nachádzajú body získavajú tiež hodnotu 3. Ak v oblasti nie je žiaden bod, nadobúda hodnotu 0.
- výstup: klasifikovaná štvorcová sieť s polygónmi skál, vektor klasifikovaných oblastí zlúčených podľa atribútu *class*.

Test_param.py

- vstup: textový súbor s .las vrstvami, kontrolný DMR
- funkcia: opakovaná filtrácia vstupnej .las vrstvy s meniacimi sa parametrami. Podľa rozsahu vrstvy je vytvorené pravidelné pole kontrolných bodov, v ktorých je počítaný výškový rozdiel filtrovanej a kontrolnej vrstvy. Z toho je vypočítaná stredná chyba. Parametre filtrácie a stredná chyba každej iterácie sú uložené do .xls súboru.
- výstup: .xls súbor s parametrami filtrácii a príslušnými strednými chybami, vrstva kontrolných bodov

Area_based_filter.py

- vstup: .las dátový súbor určený na filtráciu, vektorová vrstva oblastí vstupujúcich do priestorovo podmienenej filtrácie.
- funkcia: priestorovo podmienená filtrácia LAS dát pomocou modulu lasground, parametre filtrácie sú odlišné pre každú oblasť.
- výstup: LAS Dataset s .las súborom terénnych bodov, TIN vytvorené z LAS Datasetu.

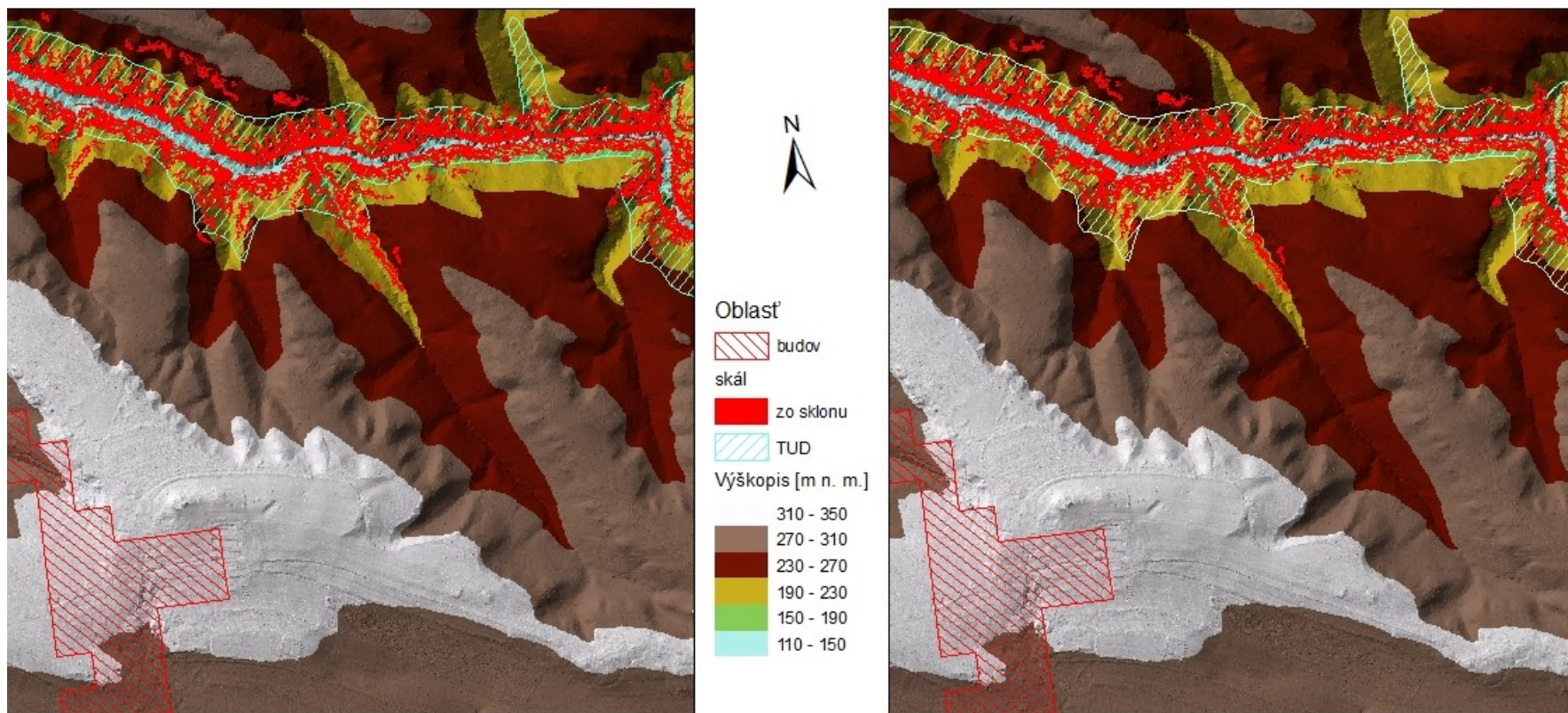
Rmse.py

- vstup: DMR vo formáte rastru, kontrolný DMR

- funkcia: vypočíta strednú a priemernú chybu vstupného DMR pomocou mapovej algebry. Okrem toho opakovane odfiltruje surové dáta s vybranými súborami parametrov, konvertuje ich do rastru a tiež vypočíta ich chyby.
- výstup: stredné a priemerné chyby jednotlivých DMR

Príloha 3: Oblasti priestorovo podmienenej filtrácie

Testovacia lokalita A - variant 1 (vľavo) a variant 2 (vpravo)



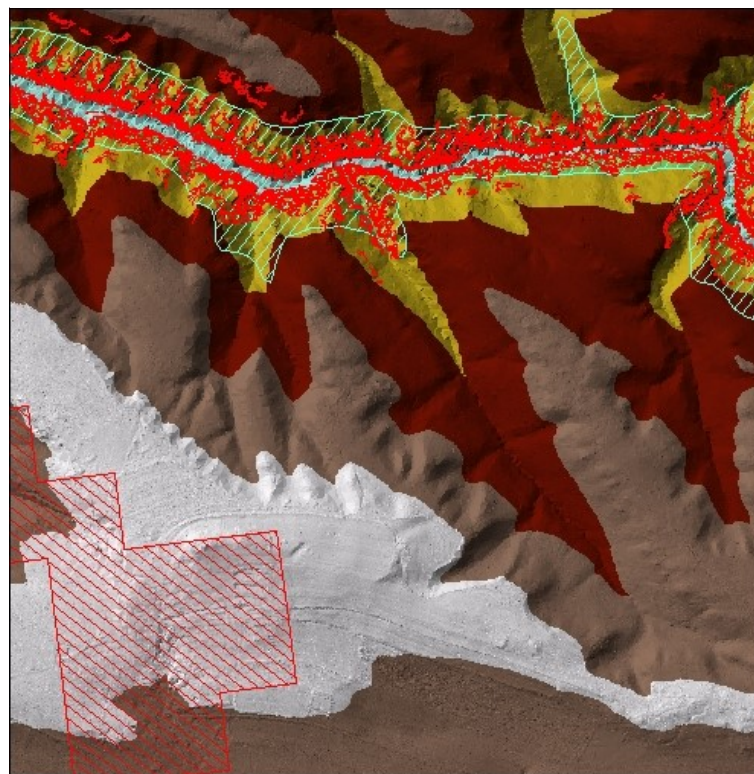
Rozmery štvorcov: 100 x 100 m, min. podiel skál: 0,18



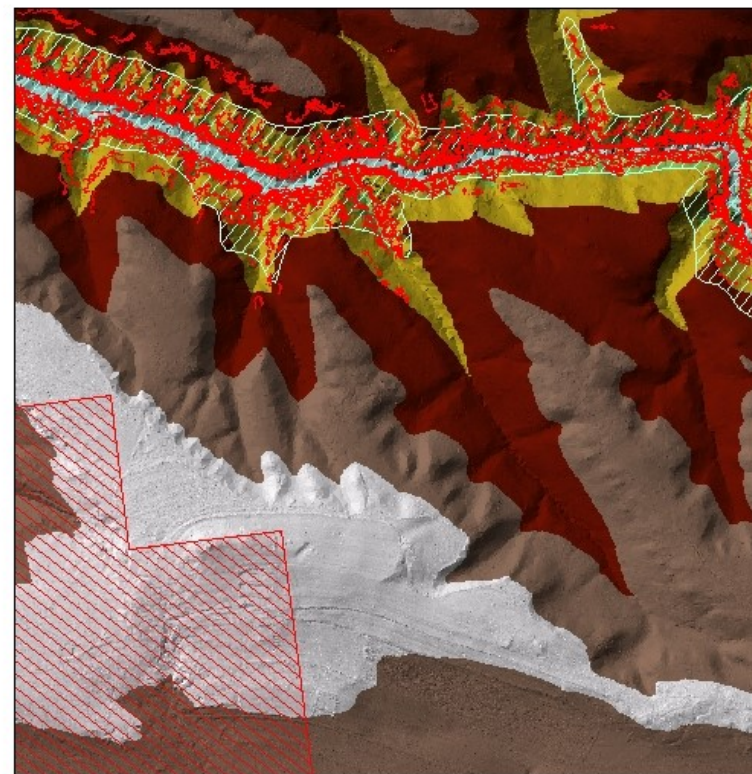
Rozmery štvorcov: 100 x 100 m, min. podiel skál: 0,22

Testovacia lokalita A - variant 3 (vľavo) a variant 4 (vpravo)

Rozmery štvorcov: 200 x 200 m, min. podiel skál: 0,17

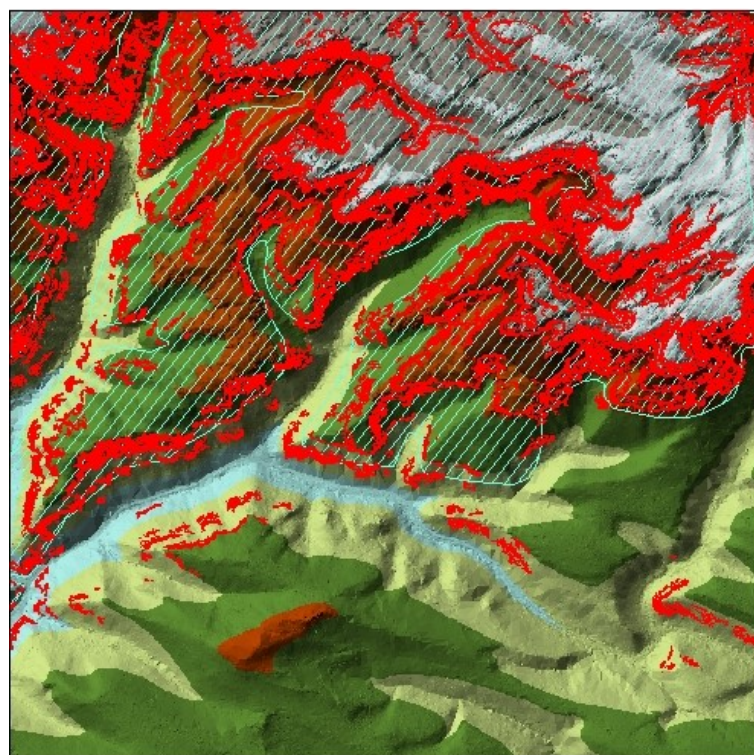


Rozmery štvorcov: 400 x 400 m, min. podiel skál: 0,09

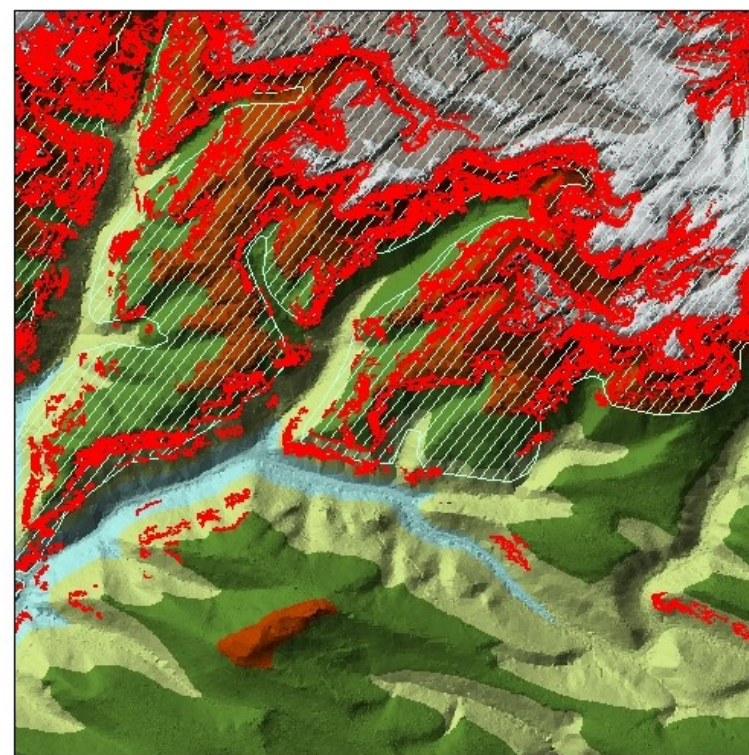


Testovacia lokalita B - variant 1 (vľavo) a variant 2 (vpravo)

Rozmery štvorcov: 100 x 100 m, min. podiel skál: 0,18



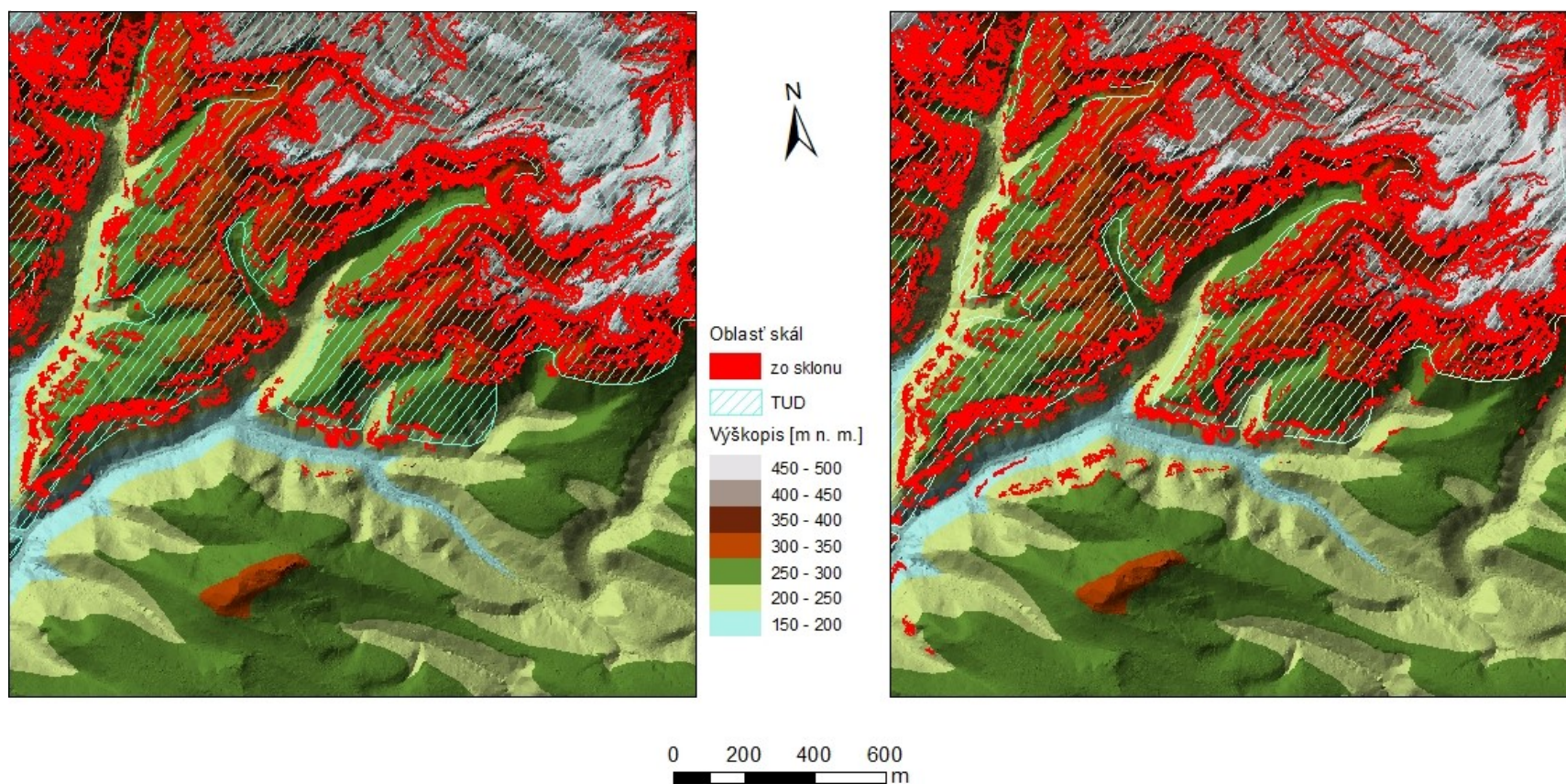
Rozmery štvorcov: 100 x 100 m, min. podiel skál: 0,22



Testovacia lokalita B - variant 3 (vľavo) a variant 4 (vpravo)

Rozmery štvorcov: 200 x 200 m, min. podiel skál: 0,17

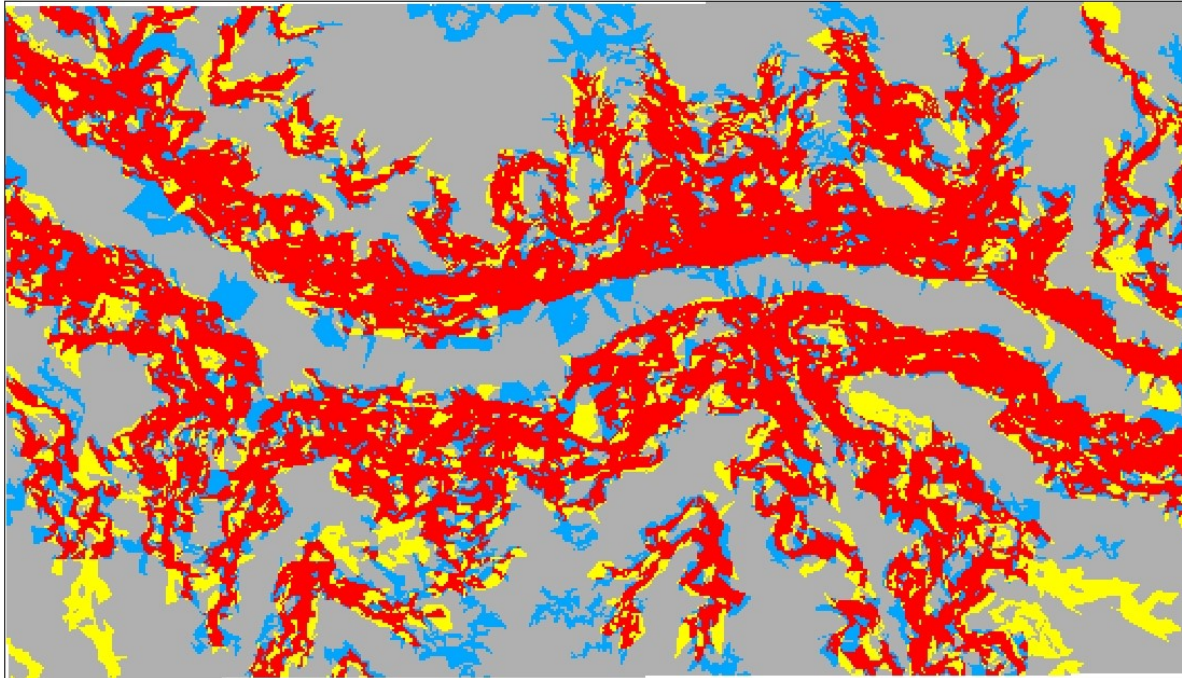
Rozmery štvorcov: 400 x 400 m, min. podiel skál: 0,09



Príloha 4: Vplyv parametrov filtrácie na vymedzenie oblasti skál

Testovacia oblasť I (kaňon Kamenice) - variant 1

Presnosť vytýčenia oblasti skál v kaňone Kamenice, step = 3 m



Legenda

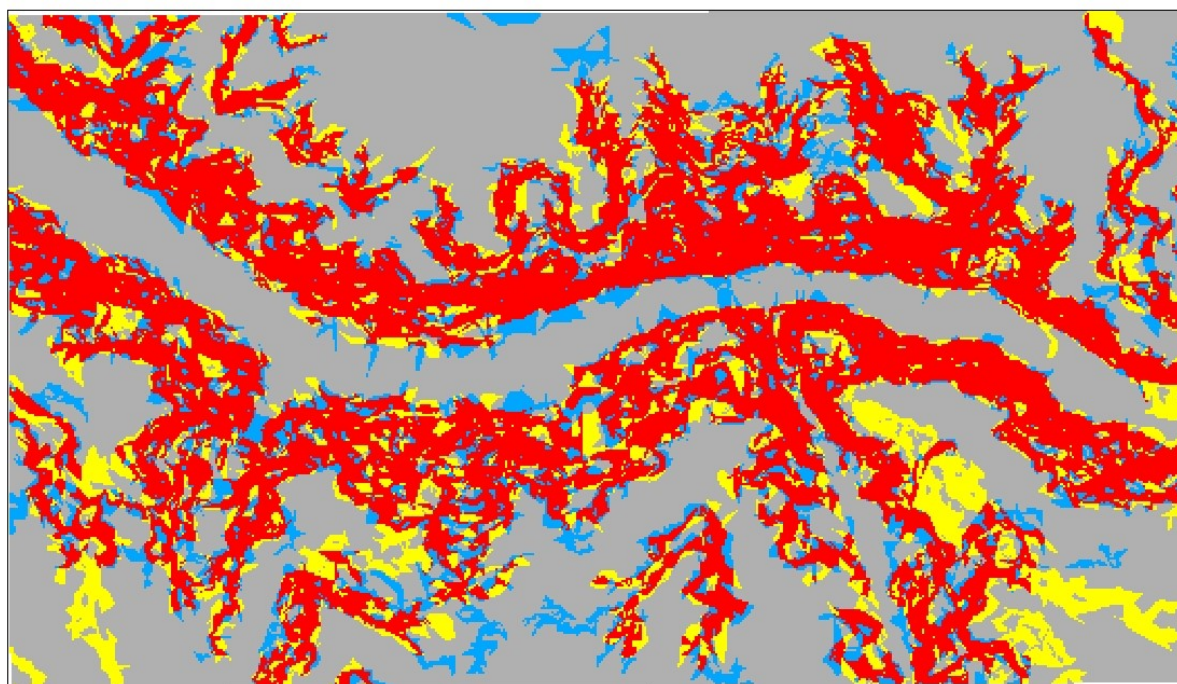
		Kontrolná vrstva	
		skaly	ostatné
Testovaná vrstva	skaly		
	ostatné		

		Kontrolná vrstva			Užívateľská presnosť [%]
		Skaly	Ostatné	Suma	
Testovaná vrstva	Skaly	53737	16602	70339	76,40
	Ostatné	17618	70205	87823	79,94
	Suma	71355	86807	158162	-
	Spracovateľská presnosť [%]	75,31	80,87	-	<u>78,36</u>

Poznámka: Podčiarknutá hodnota predstavuje celkovú presnosť

Testovacia oblasť I (kaňon Kamenice) - variant 2

Presnosť vytýčenia oblasti skál v kaňone Kamenice, step = 4 m



Legenda

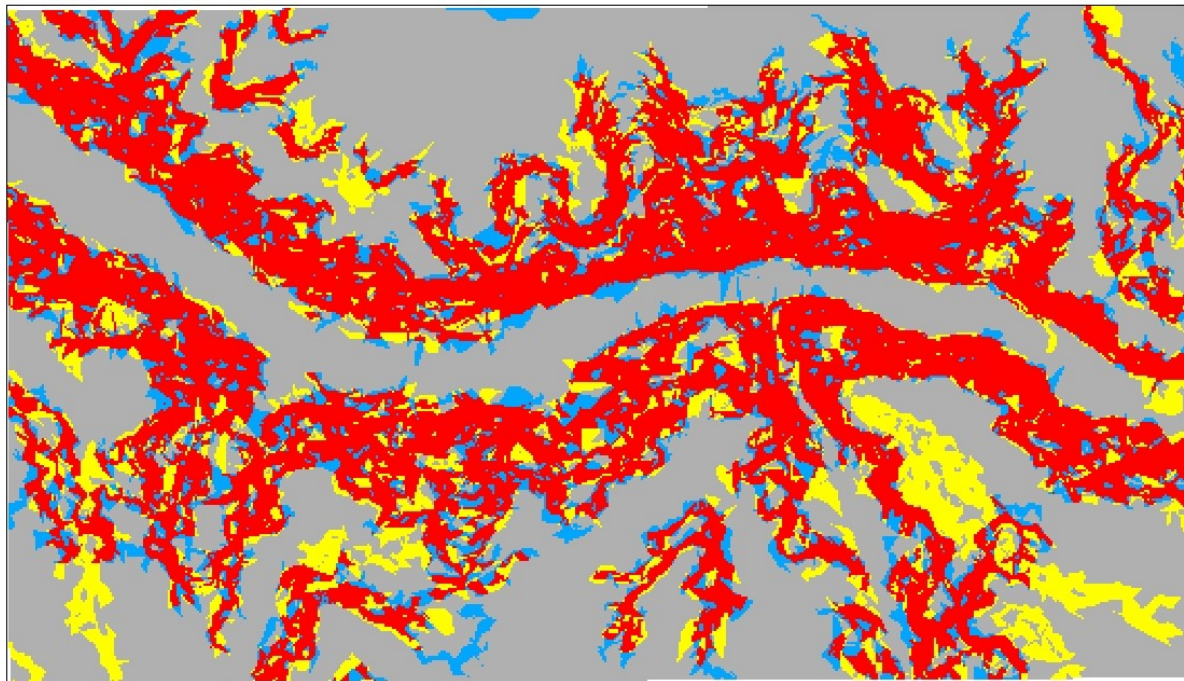
		Kontrolná vrstva	
		skaly	ostatné
Testovaná vrstva	skaly		
	ostatné		

		Kontrolná vrstva			Užívateľská presnosť [%]
		Skaly	Ostatné	Suma	
Testovaná vrstva	Skaly	53660	13880	67540	79,45
	Ostatné	17692	72930	90622	80,48
	Suma	71352	86810	158162	-
	Spracovateľská presnosť [%]	75,20	84,01	-	<u>80,04</u>

Poznámka: Podčiarknutá hodnota predstavuje celkovú presnosť

Testovacia oblasť I (kaňon Kamenice) - variant 3

Presnosť vytýčenia oblasti skál v kaňone Kamenice, step = 5 m



Legenda

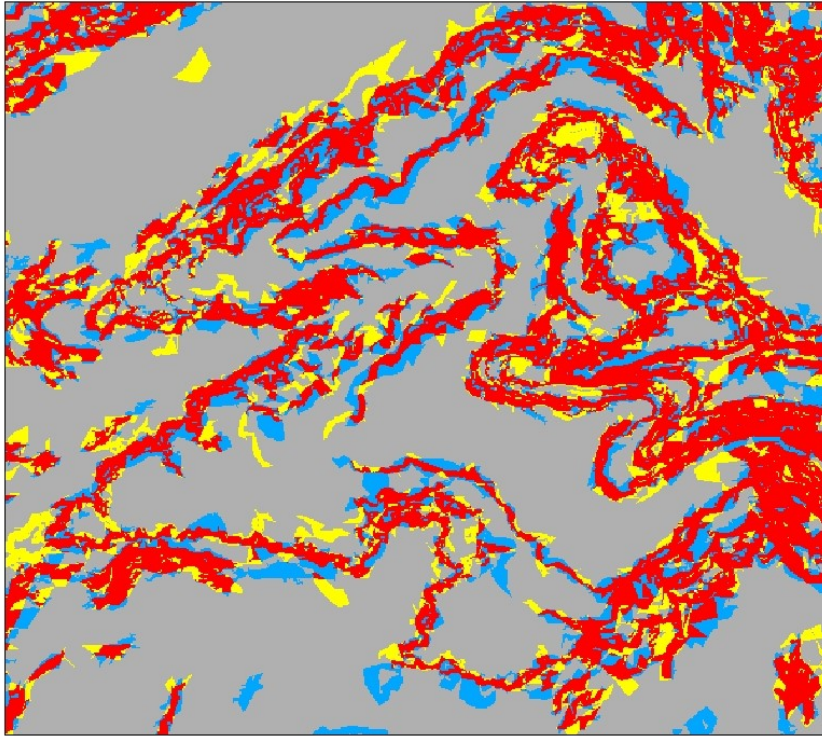
		Kontrolná vrstva	
		skaly	ostatné
Testovaná vrstva	skaly		
	ostatné		

		Kontrolná vrstva			
		Skaly	Ostatné	Suma	Užívateľská presnosť [%]
Testovaná vrstva	Skaly	54016	13262	67278	80,29
	Ostatné	17334	73550	90884	80,93
	Suma	71350	86812	158162	-
	Spracovateľská presnosť [%]	75,71	84,72	-	<u>80,66</u>

Poznámka: Podčiarknutá hodnota predstavuje celkovú presnosť

Testovacia oblasť II (Pravčická brána) - variant 1

Presnosť vytýčenia oblasti skál v okolí Pravčickej brány, step = 3 m



Legenda

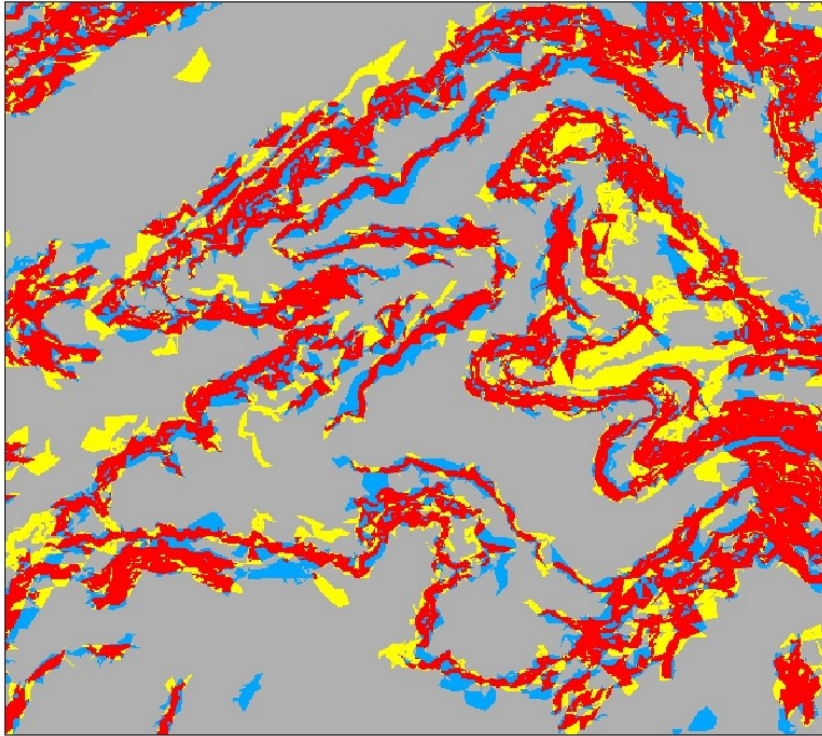
		Kontrolná vrstva	
		skaly	ostatné
Testovaná vrstva	skaly		
	ostatné		

		Kontrolná vrstva			Užívateľská presnosť [%]
		Skaly	Ostatné	Suma	
Testovaná vrstva	Skaly	81893	33129	115022	71,20
	Ostatné	26173	181400	207573	87,39
	Suma	108066	214529	322595	-
	Spracovateľská presnosť [%]	75,78	84,56	-	<u>81,62</u>

Poznámka: Podčiarknutá hodnota predstavuje celkovú presnosť

Testovacia oblasť II (Pravčická brána) - variant 2

Presnosť vytýčenia oblasti skál v okolí Pravčickej brány, step = 4 m



Legenda

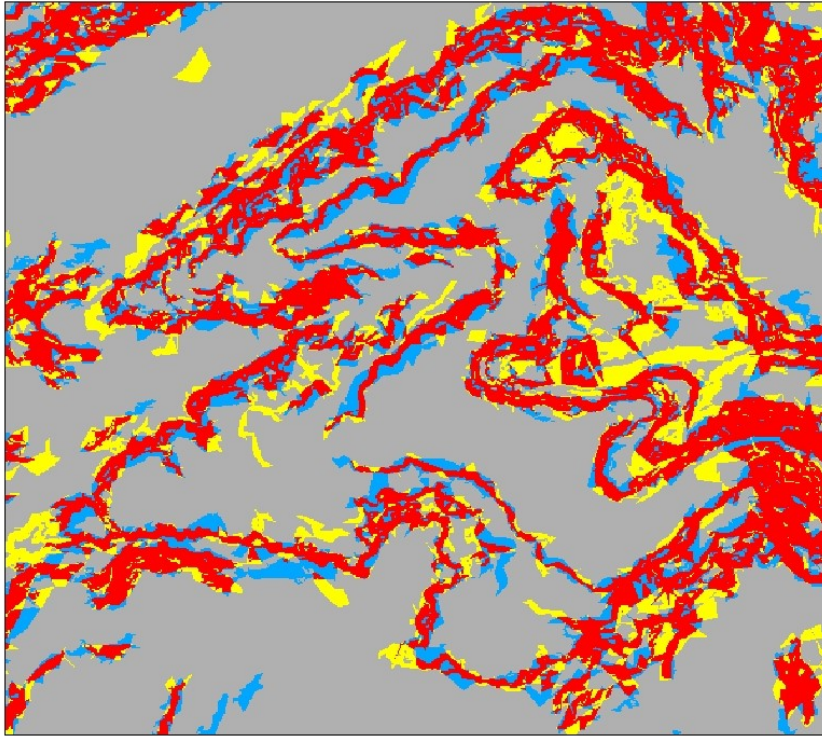
Testovaná vrstva	Kontrolná vrstva		
		skaly	ostatné
	skaly		
ostatné			

		Kontrolná vrstva			Užívateľská presnosť [%]
		Skaly	Ostatné	Suma	
Testovaná vrstva	Skaly	77474	29166	106640	72,65
	Ostatné	30592	185363	215955	85,83
	Suma	108066	214529	322595	-
	Spracovateľská presnosť [%]	71,69	86,40	-	<u>81,48</u>

Poznámka: Podčiarknutá hodnota predstavuje celkovú presnosť

Testovacia oblasť II (Pravčická brána) - variant 3

Presnosť vytýčenia oblasti skál v okolí Pravčickej brány, step = 5 m



Legenda

Testovaná vrstva	Kontrolná vrstva	
	skaly	ostatné
skaly	skaly	ostatné
ostatné	skaly	ostatné

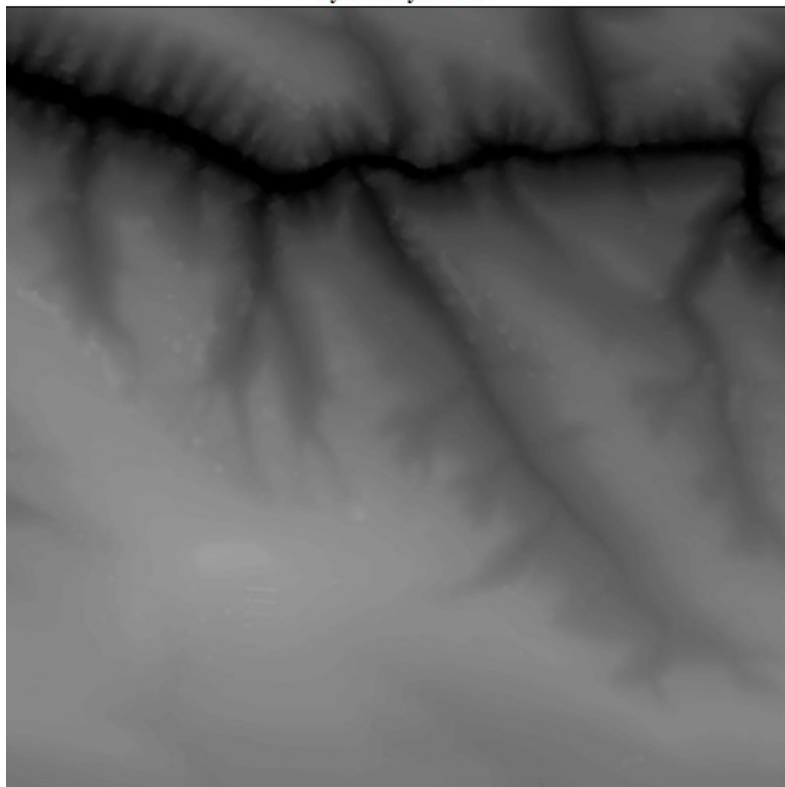
		Kontrolná vrstva			Užívateľská presnosť [%]
		Skaly	Ostatné	Suma	
Testovaná vrstva	Skaly	77753	28875	106628	72,92
	Ostatné	30316	185651	215967	85,96
	Suma	108069	214526	322595	-
	Spracovateľská presnosť [%]	71,95	86,54	-	<u>81,65</u>

Poznámka: Podčiarknutá hodnota predstavuje celkovú presnosť

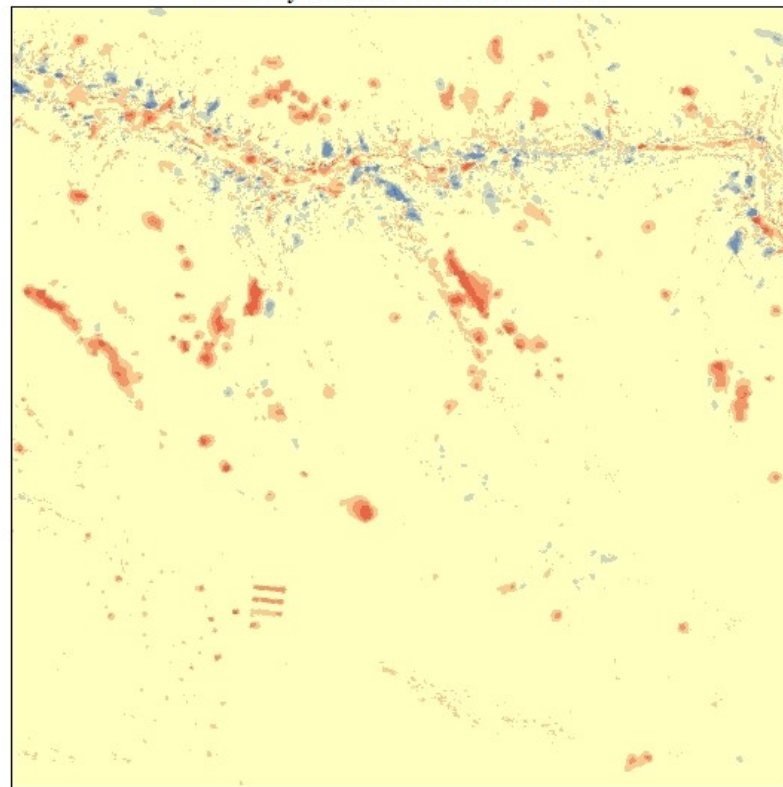
Príloha 5: Výsledné DMR

Testovacia lokalita A- variant 1

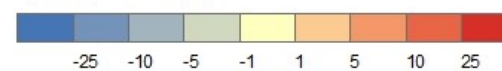
Vytvorený DMR



Rozdiel vytvoreného DMR a DMR TUD

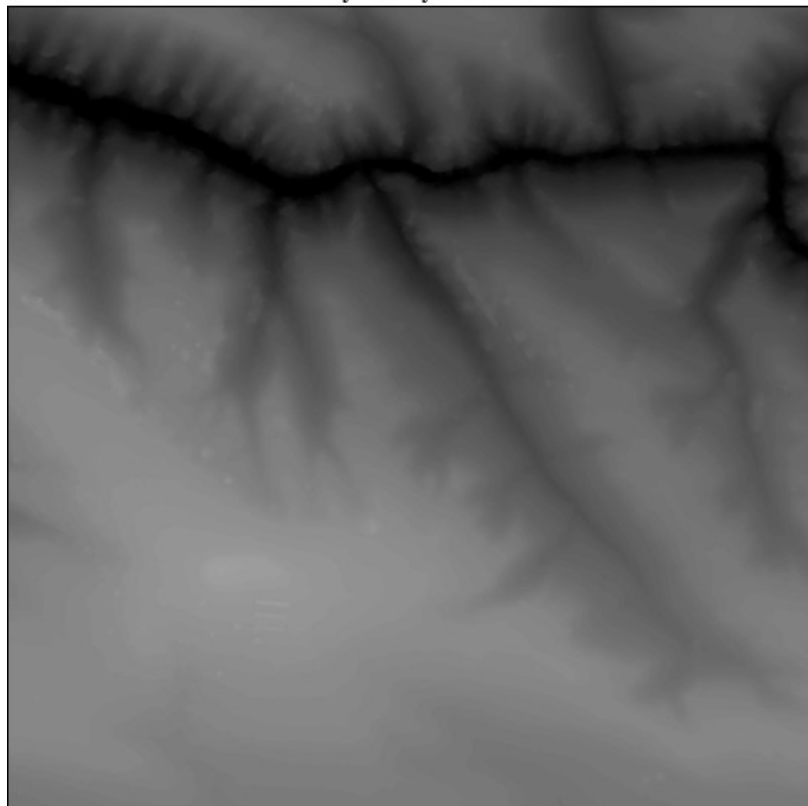


Výškový rozdiel [m]

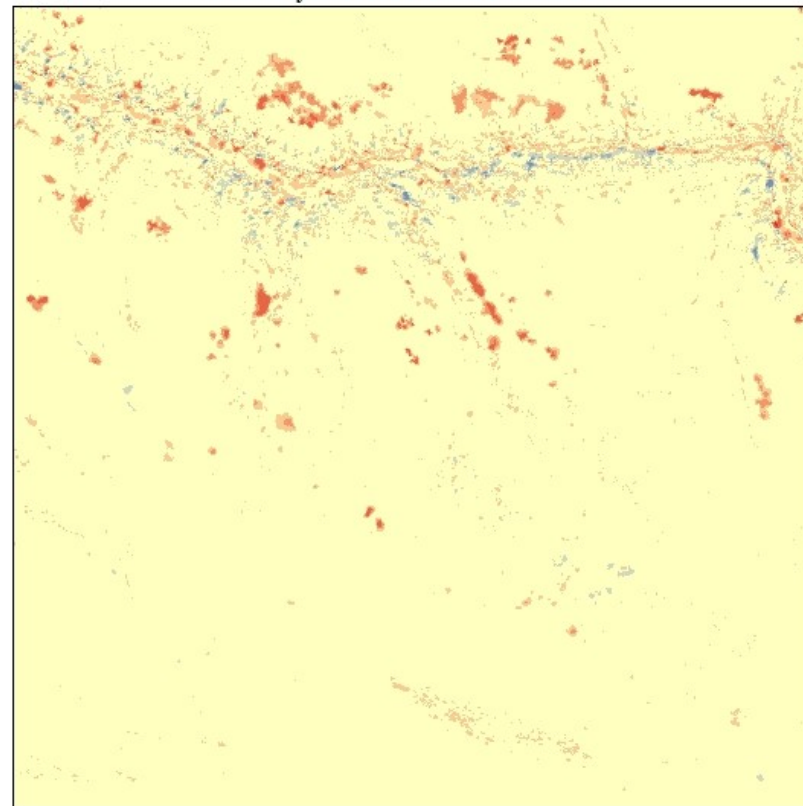


Testovacia lokalita A - variant 2

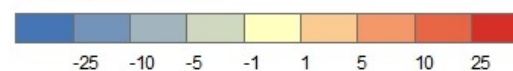
Vytvorený DMR



Rozdiel vytvoreného DMR a DMR TUD

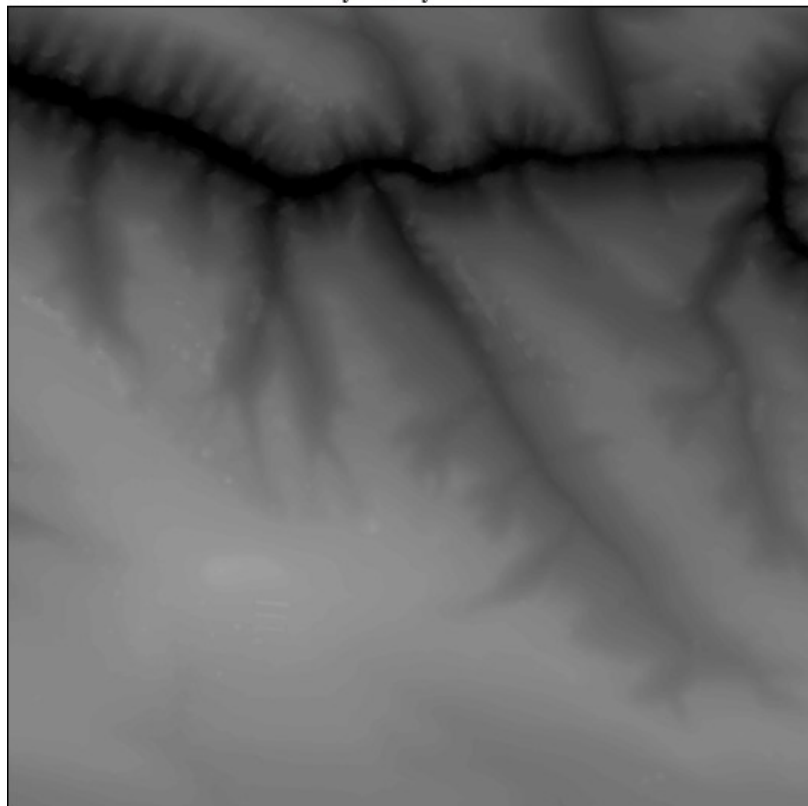


Výškový rozdiel [m]

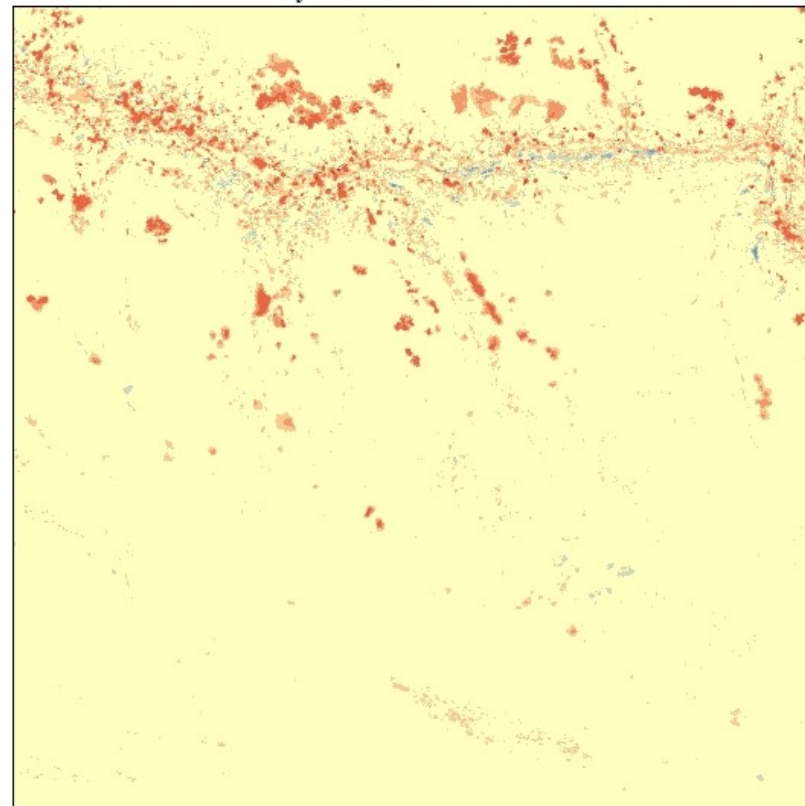


Testovacia lokalita A - variant 3

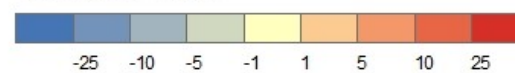
Vytvorený DMR



Rozdiel vytvoreného DMR a DMR TUD

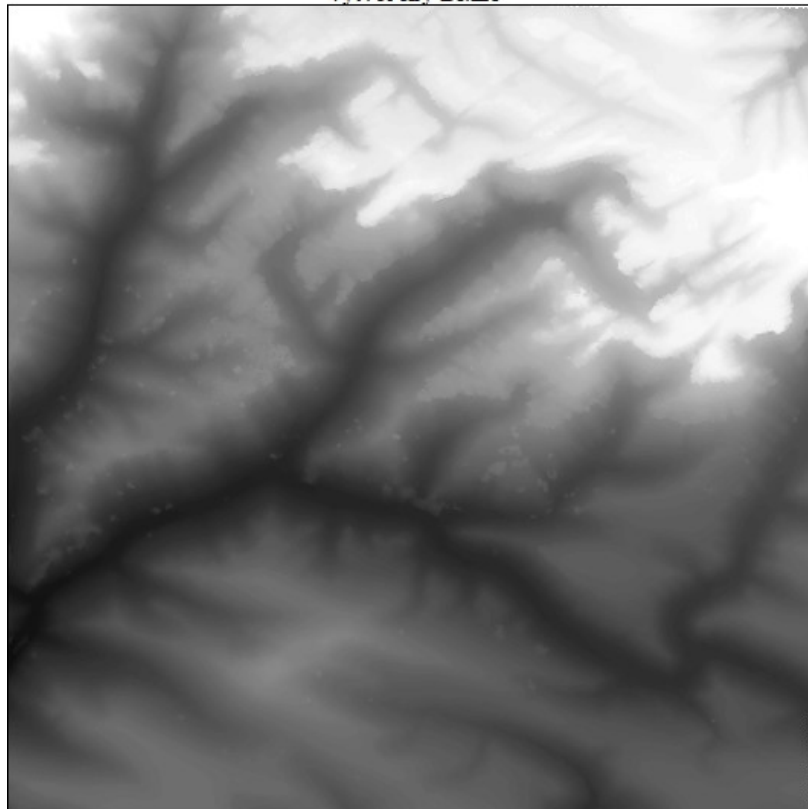


Výškový rozdiel [m]

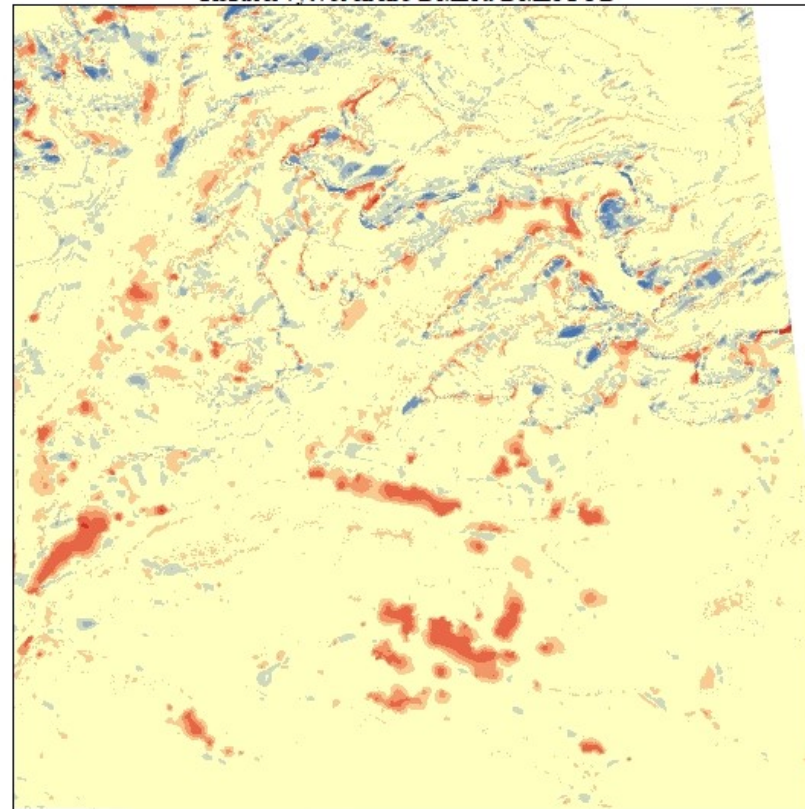


Testovacia lokalita B - variant 1

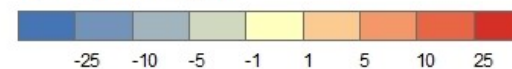
Vytvorený DMR



Rozdiel vytvoreného DMR a DMR TUD

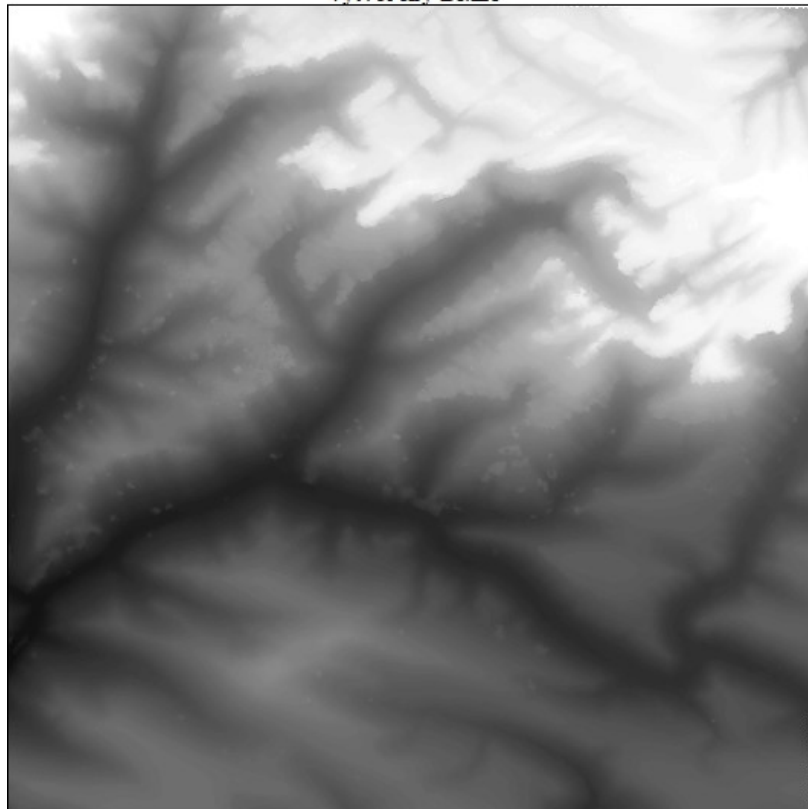


Výškový rozdiel [m]

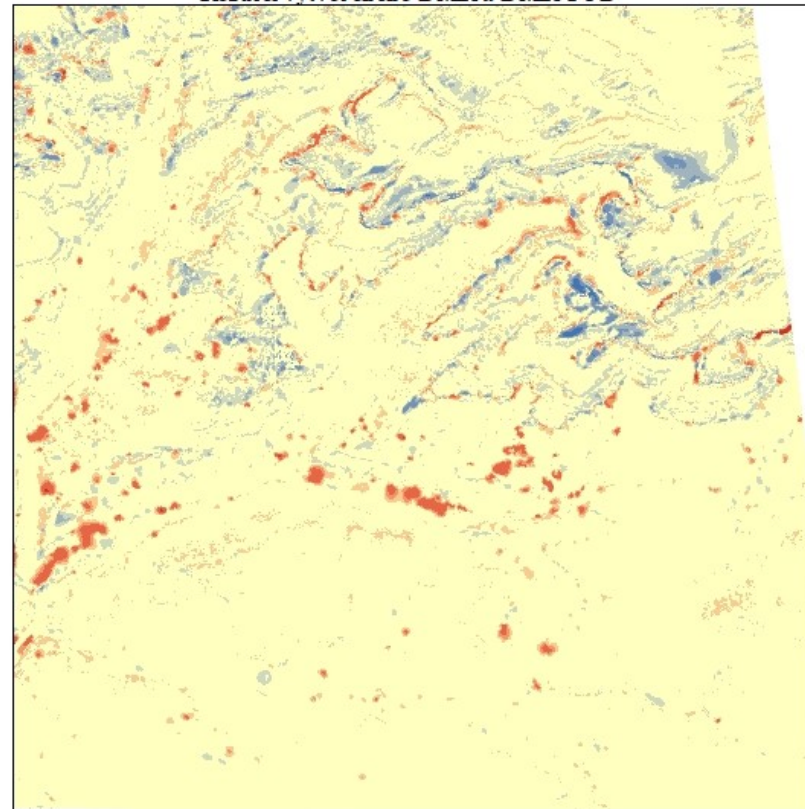


Testovacia lokalita B - variant 2

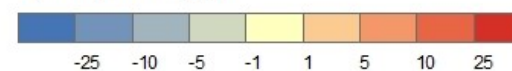
Vytvorený DMR



Rozdiel vytvoreného DMR a DMR TUD

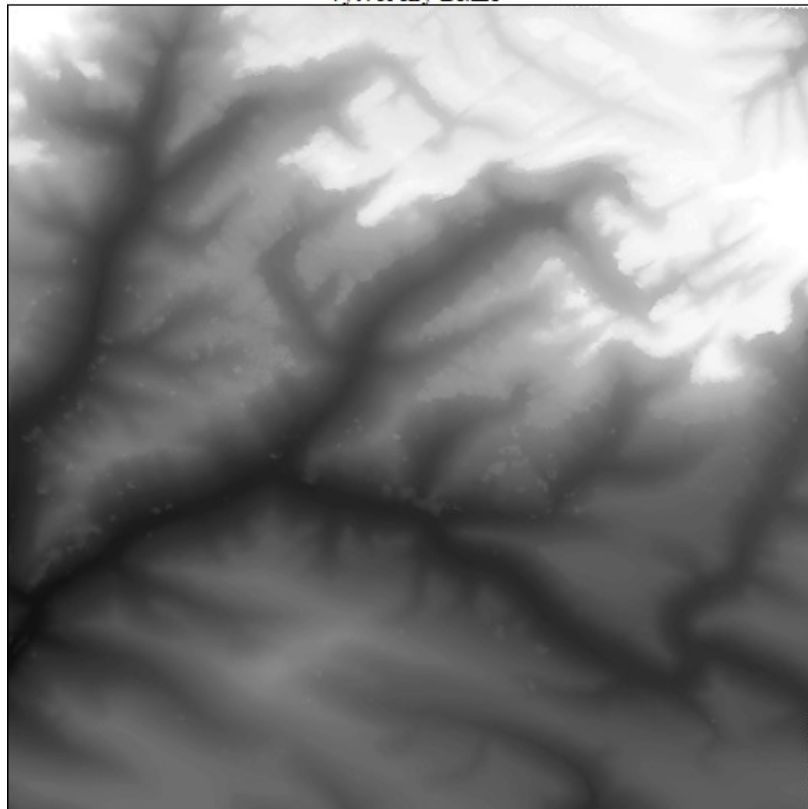


Výškový rozdiel [m]

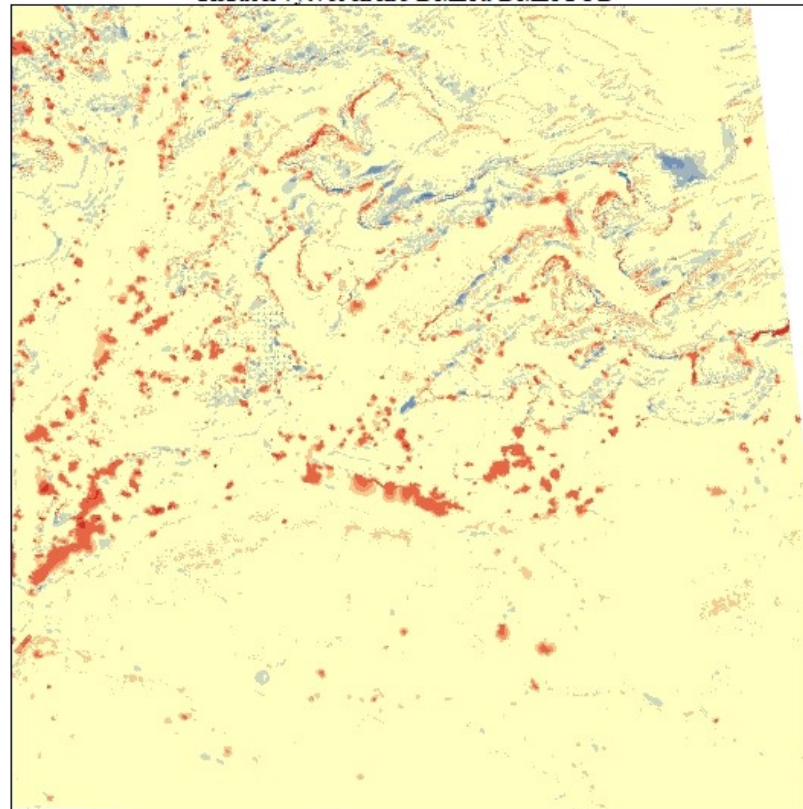


Testovacia lokalita B - variant 3

Vytvorený DMR



Rozdiel vytvoreného DMR a DMR TUD



Výškový rozdiel [m]

