

Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta aplikovaných věd
Katedra informatiky a výpočetní techniky

Bakalářská práce

Detekce a klasifikace terénních rysů ve velkých množinách bodů

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta aplikovaných věd

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jiří BEŠTA**
Osobní číslo: **A17B0182P**
Studijní program: **B3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Informatika**
Téma práce: **Detekce a klasifikace terénních rysů ve velkých množinách bodů**
Zadávací katedra: **Katedra informatiky a výpočetní techniky**

Zásady pro vypracování

1. Prostudujte problematiku hledání terénních rysů ve velkých množinách bodů.
2. Spolu s vedoucí práce vyberte nebo navrhněte vhodnou metodu pro detekci a klasifikaci vybraných terénních rysů.
3. Metodu implementujte a otestujte na umělých i reálných datech.
4. Dosažené výsledky zhodnoťte.

Rozsah bakalářské práce: **doporuč. 30 s. původního textu**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

Dodá vedoucí bakalářské práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Prof. Dr. Ing. Ivana Kolingerová**
Katedra informatiky a výpočetní techniky

Datum zadání bakalářské práce: **5. října 2020**
Termín odevzdání bakalářské práce: **6. května 2021**

L.S.

Doc. Dr. Ing. Vlasta Radová
děkanka

Doc. Ing. Přemysl Brada, MSc., Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů.

V Plzni dne 4. května 2021

Jiří Bešta

Poděkování

Obrovské poděkování patří vedoucí této práce Prof. Dr. Ing. Ivaně Kolingerové za odborné vedení, cenné rady, pozitivní přístup a značnou trpělivost. Poděkování také patří Českému úřadu zeměměřickému a katastrálnímu za poskytnutí dat. Dále bych chtěl poděkovat všem, kteří mě podporovali jak při vypracování této práce, tak i během studia.

Abstrakt

Automatizovanou klasifikací terénních tvarů se již zabývalo mnoho prací, avšak tato problematika zůstává stále otevřená. V této bakalářské práci se zaměřujeme na detekci a klasifikaci terénních rysů ve velkých množinách bodů reprezentující terén. Testujeme proces segmentace terénu aplikovaný na nerovnoměrně distribuované body. Využíváme parametrů popisujících terén v daném bodě pro detekci specifických částí terénu a mezi těmito částmi hledáme vztahy pro rozpoznávání terénních tvarů. Dále je zde uveden základní přehled terénních tvarů s jejich popisem.

Abstract

Much work has already been done on the automated landform classification, but this issue still remains open. In this bachelor thesis we focus on the detection and classification of terrain features in large point sets representing the terrain. We test the process of terrain segmentation applied to unevenly distributed points. We use parameters describing the terrain at a given point to detect specific terrain parts and between these parts we look for relationships to recognize landforms. There is also a basic list of landforms with their description.

Obsah

1 Úvod	5
1.1 Definice problému	5
1.2 Obsah jednotlivých kapitol	5
2 Základní pojmy	6
3 Rozbor terénního reliéfu	8
3.1 Přírodní terénní tvary	9
3.1.1 Tvary na vrcholové části vyvýšeniny	10
3.1.2 Tvary na úbočí vyvýšeniny	13
3.1.3 Tvary na úpatí vyvýšeniny	17
3.1.4 Tvary údolní	18
4 Existující metody klasifikace terénních rysů	19
5 Segmentace terénu a rozbor vybraných parametrů	22
5.1 Vybrané parametry pro segmentaci	22
5.1.1 Výšková souřadnice z	22
5.1.2 Sklon	22
5.1.3 Směr sklonu	23
5.1.4 Profilová křivost	24
5.1.5 Planární křivost	25
5.2 Popis segmentace terénu	26
5.3 Upravený postup segmentace - implementace	27
6 Hypotézy, experimenty a výsledky	30
6.1 Vykreslení bodů podle hodnot jednotlivých parametrů	30
6.2 Rozbor indexů homogenity	33
6.3 Slučování bodů do větších terénních celků	39
6.3.1 Postup experimentu	39
6.3.2 Výsledky experimentu	40
6.4 Hypotézy o rozpoznávání terénních rysů	43
6.5 Shrnutí dosažených výsledků	46
7 Závěr	47
Literatura	48
Příloha A	50

1 Úvod

Proces formování krajiny probíhá neustále a v přírodě se lze setkat s nejrůznějšími terénními útvary. Schopnost automatizovaného rozpoznávání vzájemně si podobných geometrických rysů v terénu nám umožňuje modelovat krajinu, a lépe tak provádět její analýzu. To může být velmi užitečné, jelikož charakter terénu značně ovlivňuje například zemědělství, průmysl nebo rozložení vodní sítě, s čímž souvisí i hustota osídlení v daných oblastech. Znalost členitosti terénu je důležitá také při plánování dopravních cest či jiných staveb.

Rozpoznávání terénních rysů představuje poměrně náročnou úlohu především kvůli komplexnosti terénu. Každý terénní tvar byl během času zformován do odlišné podoby, a proto většina těchto přírodních tvarů neodpovídá jejich přesnému teoretickému popisu. Významnou roli hraje i měřítko, v jakém nahlížíme na zkoumaný terén, jelikož v malém měřítku jsme schopni zachytit detailněji lokální terénní reliéf, ale už nemusíme rozeznat celkový charakter krajiny.

1.1 Definice problému

Tato bakalářská práce se zaměřuje na detekci a klasifikaci terénních rysů ve velkých množinách bodů popisujících terén v dané lokaci. Naměřené body jsou reprezentovány reálnými hodnotami souřadnic x , y , z v lokálním souřadném systému a počet bodů v jedné množině se pohybuje kolem půl milionu. Pro klasifikaci terénních rysů je třeba nejprve zavést parametry, které popíší vlastnosti terénu v jednotlivých bodech. Dále pak lze naši práci rozdělit na dvě části, kdy se nejprve zaměříme na detekci pouze menších specifických částí terénu a následně se pokusíme z těchto malých dílků poskládat větší terénní tvary. Vzhledem k tomu, že terénních tvarů existuje velké množství, pokusíme se rozpoznat alespoň některé z nich. Na základě domluvy s vedoucí práce nebude náš přístup založen na neuronových sítích, které jsou v dnešní době velmi populární a často používané.

1.2 Obsah jednotlivých kapitol

Nejdříve si vysvětlíme několik základních pojmů (kap. 2). Následuje rozbor terénního reliéfu (kap. 3) s popisem vybraných terénních tvarů. V kapitole 4 jsou uvedeny některé existující metody pro klasifikaci terénních rysů a v kapitole 5 si rozebereme segmentaci terénu i s popisem vybraných parametrů. Provedené experimenty, jejich výsledky a z nich vyvozené hypotézy se nachází v kapitole 6. Na závěr (kap. 7) vše shrneme a vyhodnotíme.

2 Základní pojmy

Pro snazší pochopení dalších kapitol si nyní vysvětlíme několik základních termínů.

Terénní rys (terénní tvar) lze chápat jako v přírodě se opakující terénní útvar, který je význačný svým specifickým tvarem.

Klasifikace znamená rozpoznávání objektů (v našem případě terénních rysů) a jejich zařazení do předem stanovených tříd, kde **třída** reprezentuje skupinu objektů se společnými vlastnostmi.

Vrstevnice jsou podle [11] svislé průměty průsečnic vodorovných rovin s terénním reliéfem a všechny body jedné vrstevnice mají stejnou nadmořskou výšku.

Dílčí terénní plocha je geometricky jednoduchá plocha, která může být v libovolném směru zakřivená.

S využitím [16] si popíšeme terénní kostru a její prostorové čáry, které se využijí při popisu jednotlivých terénních tvarů.

Terénní kostra je tvořena prostorovými čarami, na nichž se stýkají dílčí terénní plochy, a významnými body reprezentujícími nejnižší místa vhloubených ploch nebo nejvyšší místa vypuklých ploch.

- **Hřbetnice** jsou čáry spojující průměty relativně nejvyšších bodů vypuklé terénní plochy. Tvoří vodní předěl (rozvodnici) mezi dvěma úbočími vyvýšeniny.
- **Údolnice** jsou čáry spojující průměty nejnižše položených bodů vyduté terénní plochy a určují směr vodního toku.
- **Spádnice** jsou čáry, které vybíhají na obě strany od hřbetnice ve směru největšího spádu a jsou v každém svém bodě kolmé k vrstevnicím těmito body procházejícími.
- **Úpatnice** jsou čáry procházející místy, kde svah přechází do roviny anebo do mírně skloněného dna údolí.
- **Terénní hrany** jsou čáry, v nichž se stýkají dvě dílčí terénní plochy se značně odlišným sklonem.

- **Tvarové čáry** jsou prostorové křivky ohraničující vodorovnou nebo mírně skloněnou část některého terénního tvaru.

Euklidovská norma vektoru $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ na prostoru \mathbb{R}^n je dána podle [4] jako

$$\|\vec{x}\| = \sqrt{x_1^2 + \dots + x_n^2}. \quad (2.1)$$

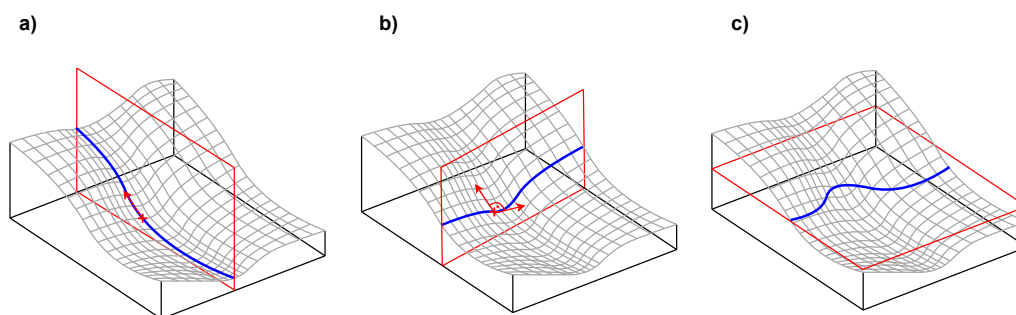
Tato norma udává velikost vektoru \vec{x} .

Pro definici křivosti si nejprve musíme zavést pojem **tečna roviny**, která je podle [8] definovaná následovně.

Nechť $z = f(x, y)$ je rovnice popisující povrch S v \mathbb{R}^3 , a necht $P = (a, b, c)$ je bod na povrchu S . Necht T je rovina obsahující bod P , a necht $Q = (x, y, z)$ reprezentuje obecný bod na povrchu S . Pokud úhel mezi vektorem \vec{PQ} a rovinou T se blíží k nule, když se bod Q blíží k bodu P po povrchu S , pak nazveme T tečnou rovinou povrchu S v bodě P .

Křivost podle [2] udává míru rychlosti změny úhlu sklonu tečné roviny podél povrchu ve stanoveném směru.

Profilová křivost určuje míru změny sklonu svahu ve směru spádnice (Obr. 2.1a) a **tangenciální křivost** se měří ve vztahu k svislé rovině kolmé na spádnici (Obr. 2.1b). **Planární křivost** určuje míru změny směru sklonu svahu podél vrstevnice (Obr. 2.1c). Mezi tangenciální a planární křivostí existuje určitá podobnost, kdy hodnoty se sice liší, ale mají stejná znaménka. Pro snazší představu jsou na následujících obrázcích zobrazeny modrou křivkou směry, ve kterých se posuzují výše zmíněné typy křivosti.



Obr. 2.1: Směry, ve kterých se posuzuje profilová (a), tangenciální (b) a planární (c) křivost.

3 Rozbor terénního reliéfu

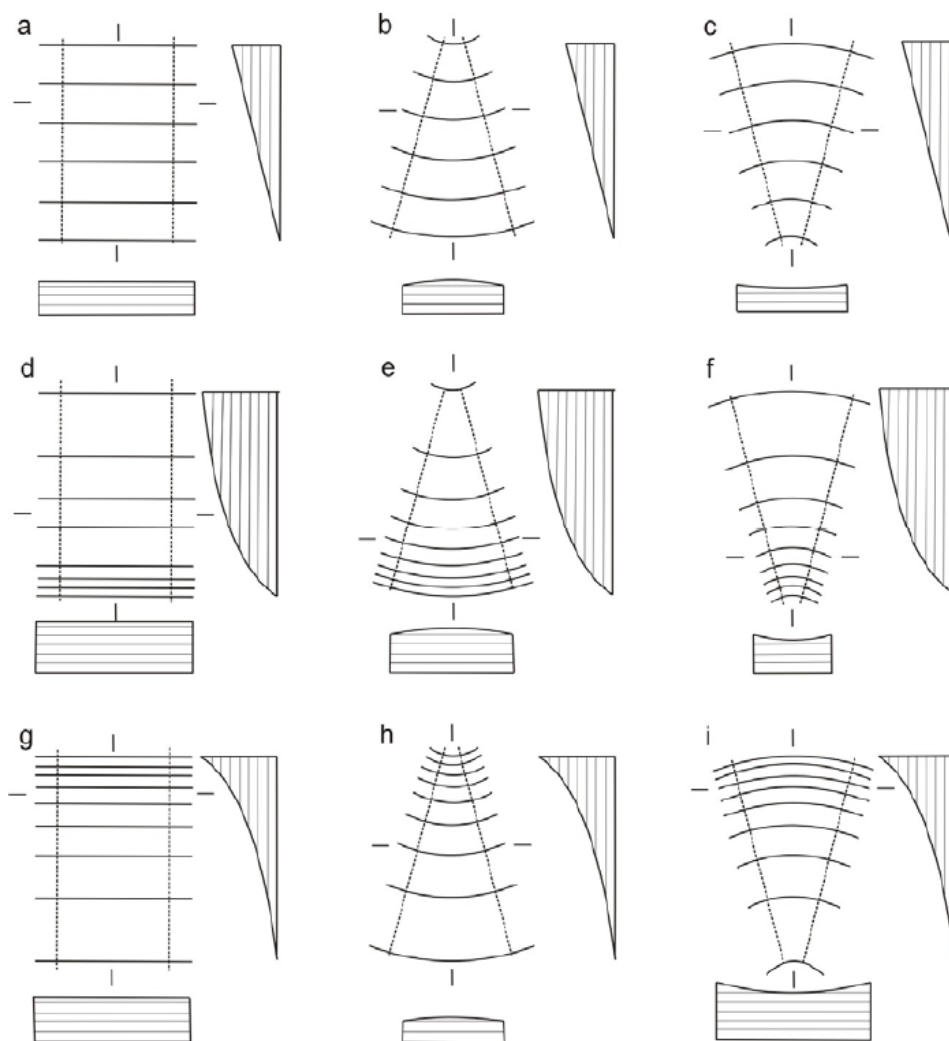
Abychom byli schopni klasifikovat celé terénní tvary, musíme se nejprve zaměřit na nalezení menších specifických částí terénu, které jsou snáze detekovatelné. Následně tyto dílčí části lze slučovat do větších terénních celků, přičemž ty, které se v přírodě vyskytují častěji, označujeme jako terénní tvary. Jak už bylo řečeno v úvodu, náš zemský povrch se skládá z mnoha různorodých a někdy poměrně složitých útvarů, které vznikly buď lidskou činností (umělé terénní tvary) nebo přírodními vlivy (přírodní terénní tvary). Vědní obor, který se zabývá příčinami vzniku těchto povrchových útvarů a jejich popisem, se nazývá geomorfologie. Popsat matematicky celý terénní tvar může být velmi složité, a proto se terén rozděluje do menších geometricky jednodušších částí, ze kterých lze následně poskládat větší terénní celky. Tyto menší části se označují jako elementární neboli dílčí plochy, jejichž tvar souvisí s tvarem vrstevnic. Podle [7] je základní rozdělení dílčích ploch (Obr. 3.1) podle jejich průběhu ve vodorovném a svislém směru následující:

1. Průběh dílčí plochy ve vodorovném směru

- Rovný - vrstevnice jsou přímé.
- Vypuklý - vrstevnice jsou vyklenuté (vybíhající) ve směru spádu.
- Vhloubený - vrstevnice jsou vyduté (vbíhající) ve směru spádu.

2. Sklon dílčí plochy ve směru spádnic

- Stejnoměrný - mezi vrstevnicemi jsou stejné rozestupy.
- Přibývající - rozestupy vrstevnic se plynule zmenšují.
- Ubývající - rozestupy vrstevnic se plynule zvětšují.



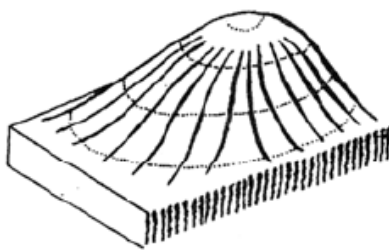
Obr. 3.1: Plocha rovná (a), vypuklá (b) a vhloubená (c) stejnoměrného sklonu. Plocha rovná (d), vypuklá (e) a vhloubená (f) se sklonem od shora přibývajícím. Plocha rovná (g), vypuklá (h) a vhloubená (i) se sklonem od shora ubývajícím. Zdroj: [7]

3.1 Přírodní terénní tvary

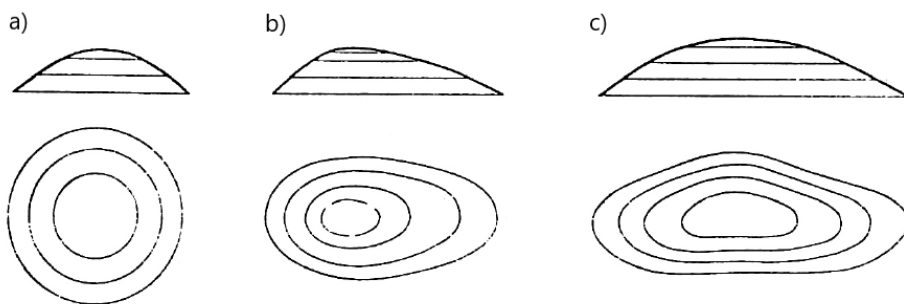
Pro přehled si nyní s pomocí [7, 9, 11, 16] popíšeme většinu terénních tvarů, se kterými se lze v přírodě setkat. Jednotlivé terénní tvary lze charakterizovat sadou čar, v nichž se stýkají dílčí plochy. Význam těchto čar byl popsán v kapitole 2. Terénní tvary lze obecně rozdělit na vyvýšené a snížené. Další dělení lze pak provést podle jejich umístění, tj. tvary na vrcholové části, úbočí a úpatí vyvýšeniny a na tvary údolní.

3.1.1 Tvary na vrcholové části vyvýšeniny

Kupa je zaoblený vypuklý tvar, jehož nejvyšší bod se nazývá vrchol kupy, od kterého povrch terénu klesá na všechny strany (Obr. 3.2). Temeno kupy je mírně skloněná nebo vodorovná malá plocha obklopující vrchol kupy. Tvarovou čárou je uzavřená křivka ohraničující temeno kupy, která může mít buď kruhovitý, eliptický, nebo nepravidelný tvar (Obr. 3.3).



Obr. 3.2: Kupa. Zdroj: [9]



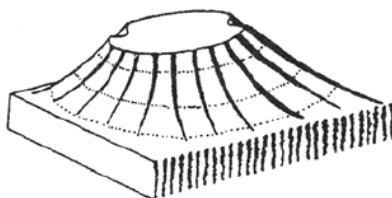
Obr. 3.3: Kupa kruhovitá (a), eliptická (b) a nepravidelná (c) v řezu a pomocí vrstevnic. Zdroj: [9]

Kužel je speciální případ kupy, vznikající stykem dílčích ploch stejnoměrného nebo ve směru spádu ubývajícím sklonu (Obr. 3.4). Tento tvar se v naší krajině příliš nevyskytuje. Dalším speciálním případem je **roh**, který je tvořený jednou plochou se sklonem přibývajícím a protilehlou plochou se sklonem ubývajícím.

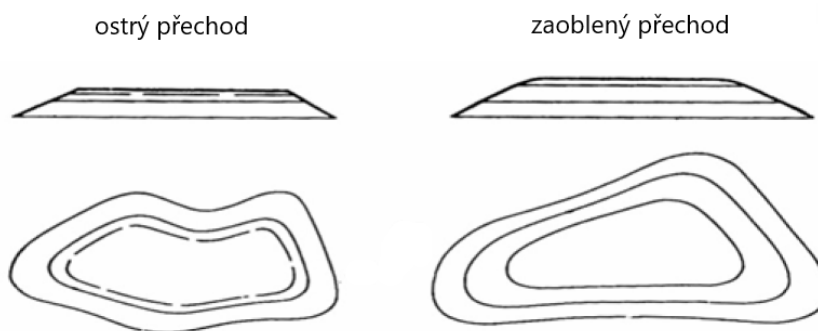


Obr. 3.4: Kužel s úbočím stejnoměrného sklonu (a), ubývajícím sklonu (b) a roh (c) v řezu. Zdroj: [9]

Plošina je vyvýšený tvar s vodorovnou nebo mírně skloněnou plochou větších rozměrů (Obr. 3.5). Tvarová čára ohraničující temeno je uzavřená křivka, která svým průběhem naznačuje tvar ploch na přilehlých úbočích. Přechod z temena do úbočí je zpravidla náhlý na ostré nebo zaoblené hraně (Obr. 3.6).

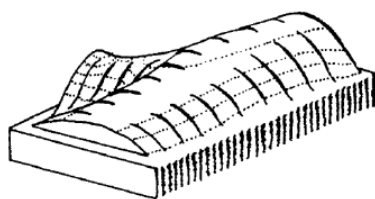


Obr. 3.5: Plošina. Zdroj: [9]

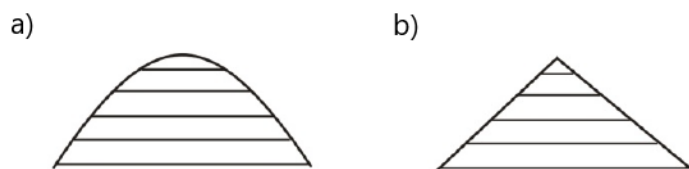


Obr. 3.6: Plošina v řezu a pomocí vrstevnic. Zdroj: [9]

Vodorovný (vrcholový) hřbet je vyvýšený terénní tvar, který je protáhlý ve směru hřbetnice (Obr. 3.7) a může být buď klenutý nebo ostrý. Klenutý vodorovný hřbet vzniká stykem dílčích ploch se sklonem přibývajícím (Obr. 3.8a) a tvarovou čarou je uzavřená křivka, která ohraničuje plochu mírného sklonu podél hřbetnice. Tato křivka svým průběhem naznačuje tvar přilehlých dílčích ploch. Ostrý vodorovný hřbet vzniká stykem dílčích ploch se sklonem ubývajícím a hřbetnice je tvořena ostrou hranou (Obr. 3.8b). Skalnatý hřbet s ostrou hranou se nazývá **hřeben**.

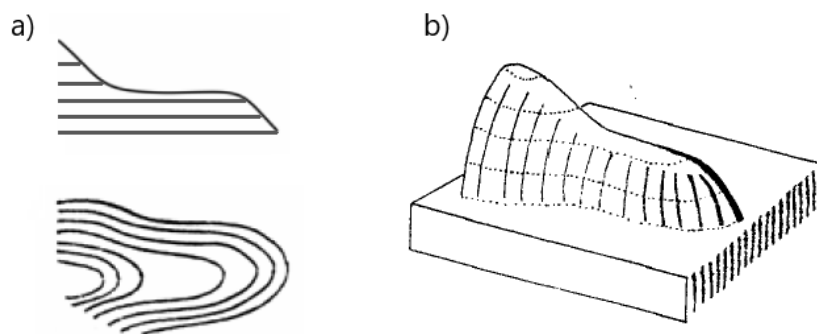


Obr. 3.7: Vodorovný vrcholový hřbet klenutý. Zdroj: [16]



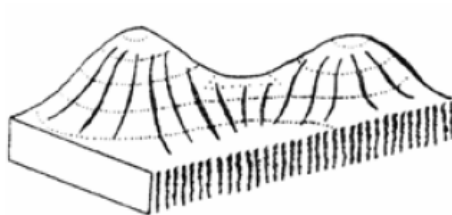
Obr. 3.8: Vodorovný hřbet klenutý (a) a ostrý (b) v řezu. Zdroj: [9]

Spočinek je vodorovný nebo mírně skloněný tvar, který podél hřbetnice přerušuje svahy kup, plošin a vodorovných hřbetů (Obr. 3.9). Tvarová čára je složena ze dvou křivek, ve směru spádu vypuklých. Jedna ohraničuje plochu, která do spočinku vbíhá, a druhá ohraničuje plochu, která ze spočinku vybíhá.



Obr. 3.9: Spočinek v řezu, pomocí vrstevnic (a) a prostorově (b). Zdroj: [9]

Sedlo je nejnižše položenou plochou mezi dvěma terénními tvary na vrcholové části vyvýšeniny (Obr. 3.10). Stýkají se v něm minimálně dvě hřbetnice a dvě údolnice. Nejnižše položený bod sedla se nazývá vrchol sedla. Tvarovou čarou ohraničující plochu sedla je čtyřúhelník s oblouky vypuklými k vrcholu sedla.



Obr. 3.10: Sedlo. Zdroj: [9]

Rozeznáváme sedlo podélné (Obr. 3.11a), které je protažené ve směru hřbetnice. Sedlo, které je protažené ve směru přibližně kolmém na hřbetnici, nazýváme příčné (Obr. 3.11b) a nepravidelné sedlo (Obr. 3.11c) je takové, ze kterého se rozbíhají více jak dvě hřbetnice a údolnice.

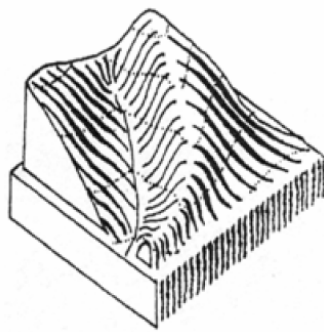


Obr. 3.11: Pravidelné sedlo podélné (a), příčné (b) a nepravidelné sedlo (c) pomocí vrstevnic. Zdroj: [9]

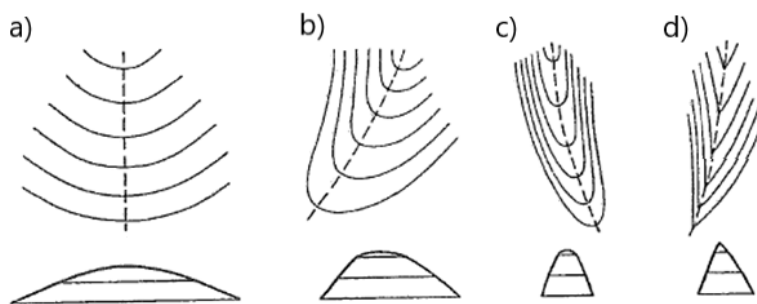
Úzké sedlo se strmými svahy vyvýšenin se nazývá **soutěska** a široké hluboké sedlo v souvislém pásmu vyvýšenin se nazývá **průsmyk**.

3.1.2 Tvary na úbočí vyvýšeniny

Svahový hřbet je vyvýšený protáhlý tvar probíhající ve směru spádu (Obr. 3.12). Hřbetnice má nejmenší spád ze všech spádnic na ploše hřbetu. Tento hřbet je tvořen dvěma dílčími plochami a podle tvaru styku těchto ploch rozeznáváme svahový hřbet široký, normální, úzký a ostrý (Obr. 3.13). Dále podle směru průběhu hřbetnice lze označit svahový hřbet jako přímý (hřbetnice rozděluje hřbet na dvě souměrné části) anebo časteji se vyskytující hřbet zakřivený.

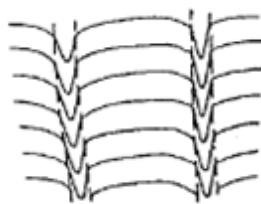


Obr. 3.12: Svahový hřbet. Zdroj: [9]



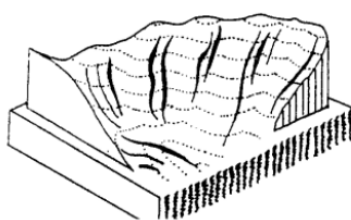
Obr. 3.13: Svahový hřbet široký (a), normální (b), úzký (c) a ostrý (d) v řezu a pomocí vrstevnic. Zdroj: [16]

Žebro je úzký, nevysoký výstupek probíhající ve směru spádu (Obr. 3.14). Úbočí žebra jsou strmá a styk s okolním svahem tvoří ostrá nebo zaoblená hrana.

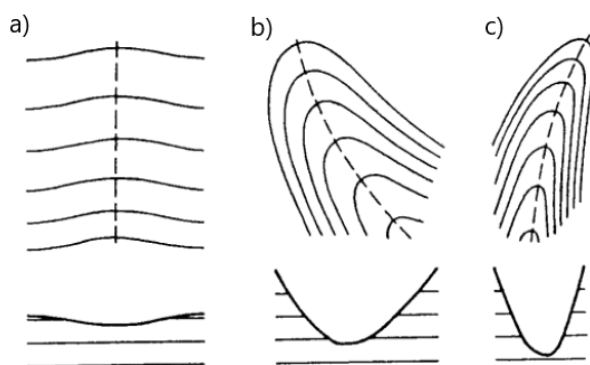


Obr. 3.14: Žebro pomocí vrstevnic. Zdroj: [16]

Úžlabí je prohlubenina probíhající ve směru spádu a přilehlé plochy jsou vypuklého nebo rovného charakteru (Obr. 3.15). Údolnice má menší sklon než přilehlá úbočí. Podle tvaru styku dílčích ploch tvořící úžlabí rozeznáváme úžlabí mělké, normální a úzké (Obr. 3.16). Stejně jako tomu bylo u svahového hřbetu, lze podle směru údolnice rozdělit úžlabí na přímé a zakřivené.

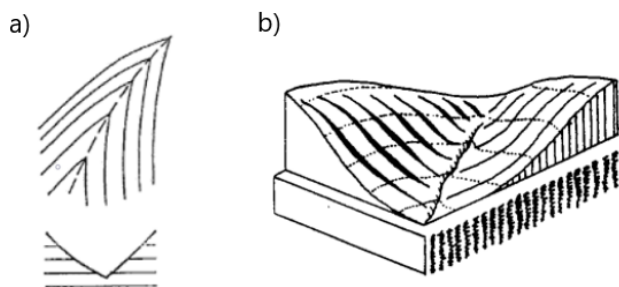


Obr. 3.15: Úžlabí. Zdroj: [16]



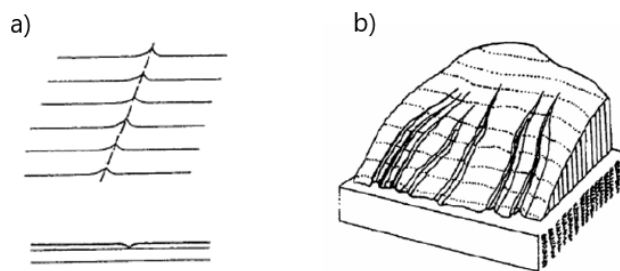
Obr. 3.16: Úžlabí mělké (a), normální (b) a úzké (c) v řezu a pomocí vrstevnic. Zdroj: [16]

Zářez je prohlubenina, jejíž úbočí se stýkají v ostré hraně (Obr. 3.17), tím pádem se na rovné nebo zakřivené údolnici vrstevnice lomí.



Obr. 3.17: Zářez v řezu, pomocí vrstevnic (a) a prostorově (b). Zdroj: [16]

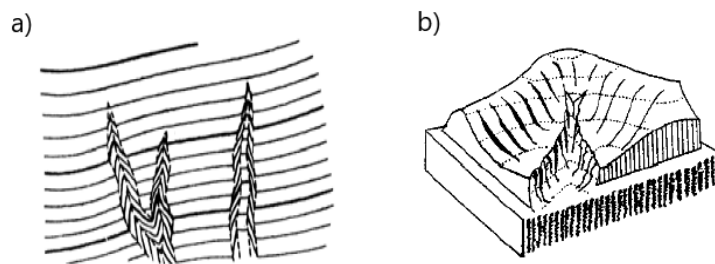
Rýha je protáhlá prohlubenina (Obr. 3.18) jako zářez, ale oproti zářezu se vyskytuje na méně strmých svazích, a proto má menší hloubku, a rýhu také charakterizují výrazné horní hrany.



Obr. 3.18: Rýha v řezu, pomocí vrstevnic (a) a prostorově (b). Zdroj: [16]

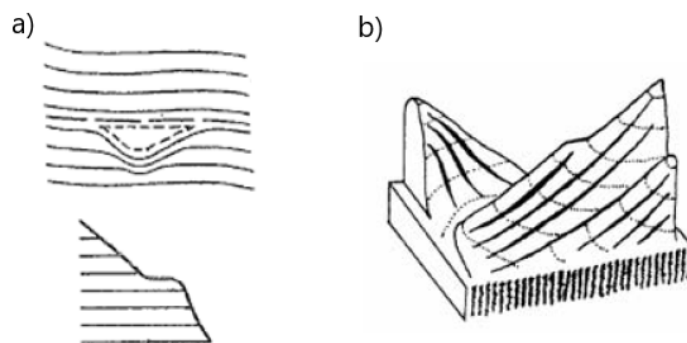
Strž je protáhlá mělká prohlubenina s příkrými svahy vznikající na údolnici zářezů nebo úžlabí.

Rokle označuje strž, která je hluboká a poměrně rozvětvená (Obr. 3.19). Rokle se může odchylovat od směru spádu a probíhat tak i ve směru vrstevnic.



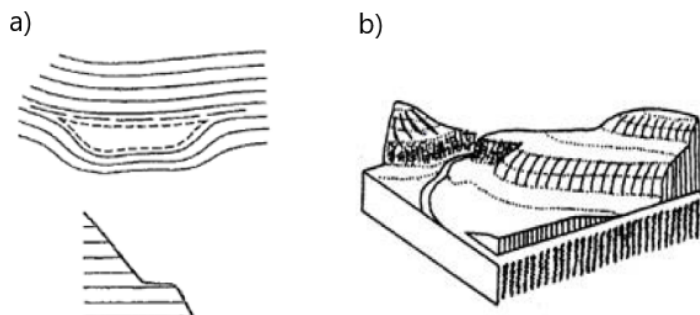
Obr. 3.19: Rokle pomocí vrstevnic (a) a prostorově (b). Zdroj: [9]

Výčnělek je vodorovná nebo mírně skloněná plocha menšího rozsahu, která přerušuje úbočí (Obr. 3.20). Tvarová čára ohraničující plochu výčnělku připomíná měsíčkovitý tvar.



Obr. 3.20: Výčnělek v řezu, pomocí vrstevnic (a) a prostorově (b). Zdroj: [16]

Terasa se podobá výčnělku, avšak je mnohem rozsáhlejší a roztahuje se do stran podél vrstevnic (Obr. 3.21). Tvarová čára je složená ze dvou křivek, které svým průběhem naznačují tvary okolních ploch přerušných terasou.

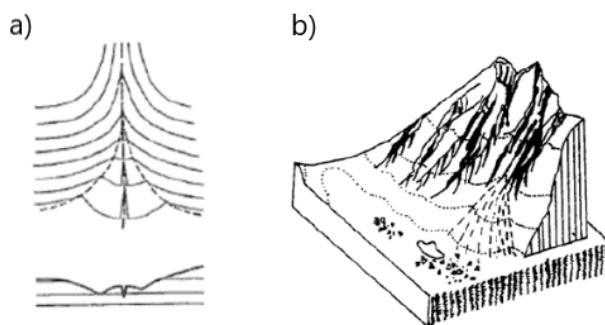


Obr. 3.21: Terasa v řezu, pomocí vrstevnic (a) a prostorově (b). Zdroj: [16]

Terénní stupně jsou příkré nižší srázy na méně svažitéch úbočích a probíhají buď vodorovně nebo šikmo. Tvarovými čarami jsou hrany, na kterých se prudce mění sklon.

3.1.3 Tvary na úpatí vyvýšeniny

Nánosový a suťový kužel vzniká usazováním materiálu sneseného z vyšších poloh a nejčastěji se tvoří v místech vyústění zářezů a strží. Materiál usazený vlivem vodní činnosti je označován jako nánosový kužel a suťový kužel vzniká následkem zvětrávání hornin. Nanesený materiál na úpatí připomíná kuželovou plochu.



Obr. 3.22: Suťový kužel v řezu, pomocí vrstevnic (a) a prostorově (b). Zdroj: [16]

3.1.4 Tvary údolní

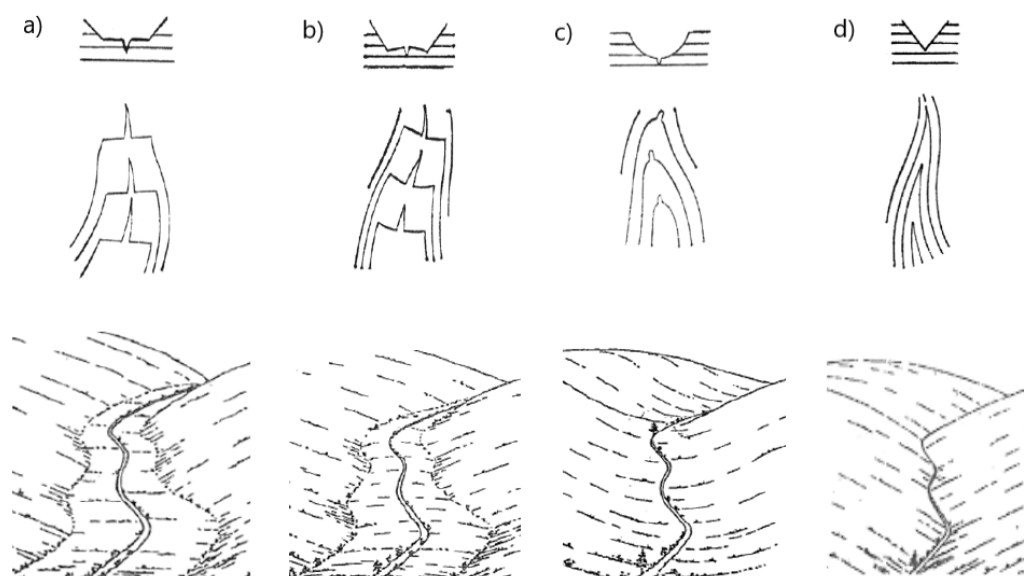
Údolí je protáhlý vhloubený terénní tvar formovaný okolními svahy. Hlavní údolí obklopují vyšší svahy, má nejmenší spád a je jím odváděna veškerá voda z okolí. Vedlejší údolí se připojují k hlavnímu údolí a mohou částečně měnit jeho směr. Další rozdělení lze provést podle tvaru dna údolí.

Údolí s rovným dnem - dno tvoří rovná plocha ohraničená výraznými úpatnicemi. Vrstevnice se na úpatnicích lomí a na dně jsou tvořeny rovnými čarami (Obr. 3.23a).

Údolí s jazykovým dnem - dno tvoří vypuklá plocha ohraničená výraznými úpatnicemi. Vrstevnice se na úpatnicích lomí a na dně jsou tvořeny vypuklými křivkami ve směru spádu (Obr. 3.23b).

Úžlabina - dno má vhloubený žlabovitý tvar s pozvolným přechodem do přílehlých úbočí (neexistují úpatnice). Vrstevnice jsou vhloubené ve směru stoupání dna údolí (Obr. 3.23c).

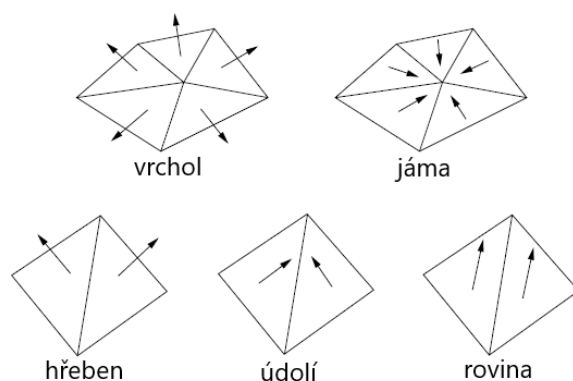
Údolní zářez - dno je velmi úzké a stýkají se na něm úbočí. Vrstevnice se na údolnici lámou (Obr. 3.23d).



Obr. 3.23: Údolí s rovným dnem (a), údolí s jazykovým dnem (b), úžlabina (c) a údolní zářez (d). Zdroj: [9, 16]

4 Existující metody klasifikace terénních rysů

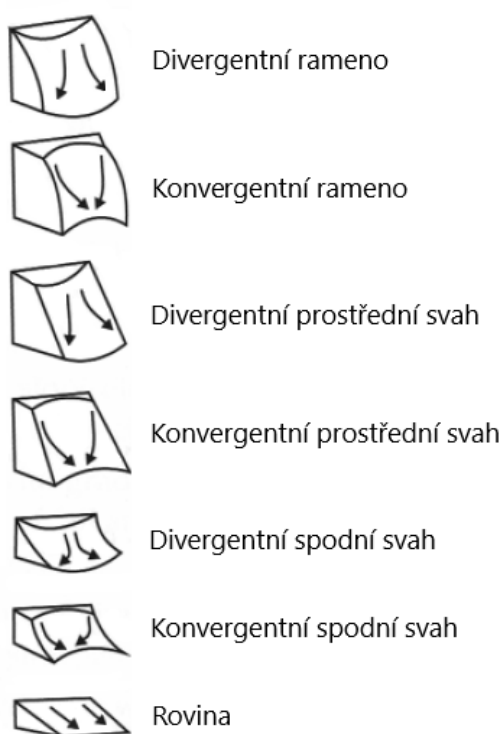
Již vzniklo mnoho metod a přístupů pro detekci a rozpoznávání terénních rysů. Jedna z prvotních metod, využívající data uspořádaná v mřížce, sloužila pro **rozpoznávání specifických bodů** [10], kterými jsou jámy, vrcholy, příkopy, hřebeny a roviny. Vyhledávání těchto bodů se provádí na základě porovnávání výškové hodnoty sousedících buněk. Jiný přístup k nalezení těchto bodů a čar vychází z **aproximace terénu trojúhelníkovou sítí** [12] a následného porovnávání úhlu mezi dvěma normálami dvou sousedících trojúhelníků. Tento postup je výhodný pro data (body) s nepravidelným rozmístěním a také např. hřebeny a údolí mohou být reprezentovány přímo hranou trojúhelníku a nikoliv skupinou bodů.



Obr. 4.1: Specifické body/hrany v trojúhelníkové síti. Šipky uvnitř trojúhelníků znázorňují normálové vektory. Zdroj: [12]

Poměrně rozšířené byly metody **založené na křivosti**, které sloužily pro klasifikaci dílčích ploch, tedy malých specificky zakřivených částí terénu. Zpočátku byl navržen systém založený na znaménku pouze profilové a tangenciální křivosti [10] a později se navrhl komplexnější systém využívající více typů křivosti. Tyto metody se daly aplikovat na terén v libovolném měřítku, přičemž byl vždy získán podobný výsledek, avšak ukázalo se, že klasifikace pouze podle křivosti terénu nebyla dostatečná a bylo třeba přidat další parametry.

Pennock [10] předpokládal, že na základě zakřivení povrchu lze odhadnout relativní umístění terénního tvaru vzhledem k okolnímu terénu. Konvexnost profilové křivosti (kladné znaménko) naznačuje výskyt ve vyšších polohách a naopak konkávnost (záporné znaménko) určuje spíše nižší polohy. Toto ovšem nemusí vždy platit. **Pennockova klasifikace** byla založena opět na profilové a planární křivosti a k tomu byl ještě přidán sklon svahu. Kombinací těchto parametrů získal sedm klasifikačních tříd: konvergentní/divergentní spodní svah, prostřední svah, rameno a rovinu (Obr. 4.2). Určení prahových hodnot jednotlivých parametrů se může lišit v závislosti na oblasti, ve které se provádí klasifikace. Mnoho klasifikací je právě zaměřeno a přizpůsobeno dané specifické oblasti.



Obr. 4.2: Pennockova klasifikace dílčích ploch. Zdroj: [10]

Dále lze rozlišit mezi klasifikací jednotlivých terénních tvarů, která je naším zaměřením, a klasifikací celého území, tzv. opakujících se terénních tvarů, která nahlíží na zkoumané území v širším měřítku a v podstatě se určuje typ krajiny. Příkladem může být **Hammond/Dikau metoda** [10], která rozpoznává čtyři třídy podle zastoupení mírného sklonu, šest tříd podle lokálního výškového rozdílu a čtyři třídy podle typu profilu ve smyslu nížina, vrchovina. Kombinací těchto tříd dostaneme 96 možných podtříd typu terénu, přičemž existuje pět hlavních tříd, mezi které patří např. náhorní plošiny či kopce a hory.

Z obecných metod klasifikace, které lze využít pro klasifikaci terénních rysů, bych zmínil **neuronové sítě** [15], které velmi často využívají učících algoritmů, pro které je třeba mít předem připravená učící data. Další obecnou metodou může být **shlukování**, u kterého je jedním ze základních shlukovacích algoritmů K-means [13]. Proces shlukování nám umožňuje nalézt tzv. shluky, tj. množiny bodů, kde body v daném shluku jsou si nejvíce podobné a naopak rozdílné vůči bodům z jiných shluků. V naší problematice lze takto nalézt shluky bodů, přičemž podobnost je počítána z různých parametrů popisujících terén, jako je například výše zmiňovaná křivost či sklon. Výsledné shluky pak reprezentují dílčí plochy terénu. Pro rozpoznání celých terénních tvarů je však dále nutné sloučit jednotlivé shluky do větších terénních celků na základě nějakých agregačních pravidel.

Posledním zde zmíněným přístupem, vycházejícím z klasifikace terénních tvarů na Marsu [14], je segmentace terénu a následná klasifikace pomocí různých učících algoritmů, jako je např. metoda podpurných vektorů, rozhodovací strom nebo nejbližší soused. Data z Marsu jsou ve formě digitálního výškového modelu, tzn. data jsou uložena v rastru, kde pro každý pixel existuje výšková hodnota z , ze které se počítají další parametry. Smyslem segmentace je rozdělit terén na menší homogenní části a odstínit se tak od analýzy založené na pixelech. Jak již bylo dříve zmíněno, v naší práci se nejprve pokusíme rozdělit terén na menší specifické části terénu, k čemuž se přímo nabízí využít proces shlukování, který byl již dříve na naší problematiku mnohokrát aplikován. V této práci však vyzkoušíme právě zmiňovanou segmentaci terénu, jelikož její postup je poměrně jednoduchý a ve zmiňované práci přinesla velmi pěkný výsledek. Dále zjistíme, jak moc dobře lze aplikovat segmentaci terénu na nerovnoměrně distribuované body.

Při segmentaci terénu se pro každý pixel počítá tzv. index homogenity, jehož hodnota udává, zda se daný pixel nachází uvnitř homogenní oblasti nebo je spíše hraničním mezi rozdílnými oblastmi. Index homogenity se počítá vždy pro daný parametr, např. sklon. V případě více parametrů se vypočte index homogenity pro každý parametr zvlášť a následně se z nich spočte celková hodnota. Konkrétní výpočty budou uvedeny v následující kapitole. Takto lze získat homogenní objekty (plochy tvořené pixely s podobnými hodnotami vybraných parametrů) a pro každý objekt se spočtou střední hodnoty jednotlivých parametrů, které jsou následně použity pro klasifikaci.

5 Segmentace terénu a rozbor vybraných parametrů

V předchozí kapitole jsme si řekli, že segmentace slouží k rozdělení terénu na homogenní části s podobnými hodnotami zadaných parametrů. Na základě vlastního uvážení jsme zvolili pět základních parametrů, mezi které patří výšková souřadnice z , sklon, směr sklonu, profilová a planární křivost. Nejprve si s využitím [1, 5, 6] popíšeme vybrané parametry charakterizující určitou vlastnost terénu v daném bodě a tyto parametry následně využijeme při segmentaci, jejíž postup bude popsán nejdříve obecně podle [14], a následně s určitými úpravami v rámci naší implementace.

5.1 Vybrané parametry pro segmentaci

5.1.1 Výšková souřadnice z

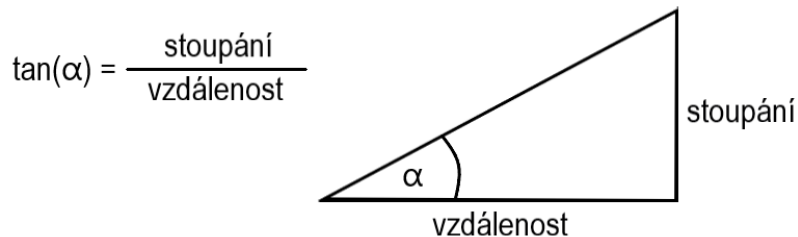
Hodnoty souřadnice z pro jednotlivé body máme zadané přímo ve vstupních datech. Tyto hodnoty použijeme pro výpočet dalších parametrů, kterými jsou sklon, směr sklonu, profilová a planární křivost. Výpočet těchto parametrů provádíme pomocí okna 3x3 (Obr. 5.1). Namapování bodů do mřížky a hledání chybějících bodů v okně bude vysvětleno dále u popisu segmentace.

z_1	z_2	z_3
z_4	z_5	z_6
z_7	z_8	z_9

Obr. 5.1: Okno 3x3 pro výpočet jednotlivých parametrů. Každá buňka obsahuje hodnotu souřadnice z .

5.1.2 Sklon

Sklon udává maximální úhel mezi vodorovnou plochou a nakloněnou plochou svahu. Obecně lze spočítat jako podíl změny výšky na daném úseku a vzdálenost tohoto úseku (Obr. 5.2). Sklon může být vyjádřen ve stupních nebo v procentech. Hodnotu sklonu lze přímo využít k určení rovin a svahů.



Obr. 5.2: Obecný výpočet sklonu ve stupních.

Výpočet sklonu v okně 3x3 je následující:

$$\text{sklon} = \arctan\left(\sqrt{\left(\frac{d_z}{d_x}\right)^2 + \left(\frac{d_z}{d_y}\right)^2}\right) * \frac{180}{\pi} \quad [^\circ], \quad (5.1)$$

kde $\frac{d_z}{d_x}$ a $\frac{d_z}{d_y}$ udávají míru změny z -ové souřadnice v horizontálním a vertikálním směru vůči prostřední buňce okna a spočtou se jako

$$\begin{aligned} \frac{d_z}{d_x} &= ((z_3 + 2z_6 + z_9) - (z_1 + 2z_4 + z_7)) / (8 * \text{velikost buňky}), \\ \frac{d_z}{d_y} &= ((z_7 + 2z_8 + z_9) - (z_1 + 2z_2 + z_3)) / (8 * \text{velikost buňky}). \end{aligned} \quad (5.2)$$

Jelikož počet buněk v řádku a počet buněk ve sloupci odpovídá šířce a výšce zkoumaného území, tak pro zachování skutečných vzdáleností je hodnota *velikost buňky* rovna jedné.

5.1.3 Směr sklonu

Směr sklonu nám říká, do jakého směru je svah orientovaný. Výsledná hodnota je dána ve stupních v rozsahu od 0 do 360° ve směru hodinových ručiček.

Výpočet směru sklonu v okně 3x3 je následující:

$$\text{stupně} = \text{atan2}\left(\left(\frac{d_z}{d_x}\right), -\left(\frac{d_z}{d_y}\right)\right) * \frac{180}{\pi} \quad [^\circ], \quad (5.3)$$

kde výpočet $\frac{d_z}{d_x}$ a $\frac{d_z}{d_y}$ je dán vztahem (5.2). Převod hodnoty *stupně* do rozsahu 0 - 360° se provádí podle následujícího pseudokódu.

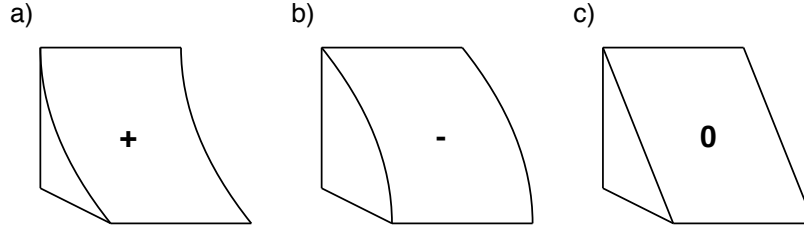
```

if (stupně > 90)
    směrSklonu = 450 - stupně
else
    směrSklonu = 90 - stupně

```

5.1.4 Profilová křivost

Profilová křivost reprezentuje míru změny sklonu ve vertikálním směru, tedy ve směru spádu. Pokud je zakřivení kladné, pak mluvíme o konkávním zakřivení a pokud je záporné, pak se jedná o konvexní zakřivení (Obr. 5.3). Nulová hodnota nám říká, že v daném bodě není žádné profilové zakřivení.



Obr. 5.3: Profilové zakřivení a) kladné (konkávní), b) záporné (konvexní), c) nulové.

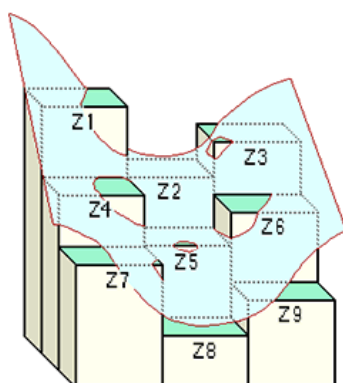
Body s velkou hodnotou profilového zakřivení, ať už s kladnou či zápornou, mohou určit místa, kde dochází k přechodu ze svahu do roviny nebo naopak. Kladné profilové zakřivení lze nalézt především na úpatí svahů a naopak záporné zakřivení je typické pro horní hranice svahů. Křivost v okně 3x3 lze popsat polynomem čtvrtého řádu (Obr. 5.4) ve tvaru

$$Z = ax^2y^2 + bx^2y + cxy^2 + dx^2 + ey^2 + fxy + gx + hy + i, \quad (5.4)$$

a jednotlivé koeficienty polynomu se spočtou následovně:

$$\begin{aligned} a &= [(z_1 + z_3 + z_7 + z_9)/4 - (z_2 + z_4 + z_6 + z_8)/2 + z_5]/l^4, \\ b &= [(z_1 + z_3 - z_7 - z_9)/4 - (z_2 - z_8)/2]/l^3, \\ c &= [(-z_1 + z_3 - z_7 + z_9)/4 + (z_4 - z_6)]/2/l^3, \\ d &= [(z_4 + z_6)/2 - z_5]/l^2, \\ e &= [(z_2 + z_8)/2 - z_5]/l^2, \\ f &= (-z_1 + z_3 + z_7 - z_9)/4l^2, \\ g &= (-z_4 + z_6)/2l, \\ h &= (z_2 - z_8)/2l, \\ i &= z_5, \end{aligned} \quad (5.5)$$

kde konstanta l označuje vzdálenost mezi dvěma sousedními buňkami.



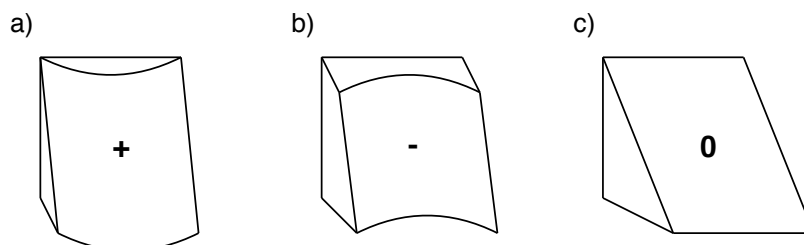
Obr. 5.4: Křivost povrchu definovaná polynomem čtvrtého řádu. Zdroj: [5]

Výpočet profilové křivosti v okně 3x3 je následující:

$$\text{profilová Křivost} = \frac{200 * (dg^2 + eh^2 + fgh)}{g^2 + h^2}. \quad (5.6)$$

5.1.5 Planární křivost

Planární křivost reprezentuje míru změny směru sklonu v horizontálním směru, tedy ve směru vrstevnic. Pokud je hodnota zakřivení kladná, tak se jedná o konvexní zakřivení a v případě záporné hodnoty o konkávní zakřivení, což je přesně naopak, než tomu bylo u profilové křivosti. Nulová hodnota opět značí, že v daném bodě není žádné zakřivení.



Obr. 5.5: Planární zakřivení a) kladné (konvexní), b) záporné (konkávní), c) nulové.

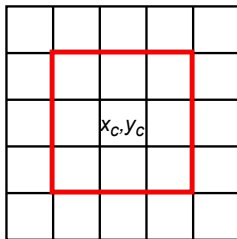
Při výpočtu planární křivosti opět vycházíme z polynomu popisujícího křivost a jeho koeficientů (Rovnice (5.4) a (5.5)), popsanych u profilové křivosti.

Výpočet planární křivosti v okně 3x3 je následující:

$$\text{planární Křivost} = \frac{-200 * (dh^2 + eg^2 - fgh)}{g^2 + h^2}. \quad (5.7)$$

5.2 Popis segmentace terénu

Segmentace [14] se typicky aplikuje na rastrová data, přičemž se rastr prochází čtvercovým oknem (Obr. 5.6) o velikosti $2K + 1$, kde K je libovolné celé kladné číslo. Předpokládejme, že každý pixel reprezentuje bod se souřadnicemi (x, y) a také obsahuje parametr P , pro který počítáme index homogenity (H-index). Prostřední pixel okna má souřadnice (x_c, y_c) .



Obr. 5.6: Červeně ohraničené čtvercové okno o velikosti 3x3.

Pro každý pixel v okně spočteme tzv. *separation* vektor

$$\vec{d}_{ij} = (x_{ij} - x_c, y_{ij} - y_c), \quad (5.8)$$

kde indexy i, j určují daný pixel, a tedy mohou nabývat hodnot od 0 do výšky resp. šířky rastru. Hodnoty x_{ij} a y_{ij} reprezentují x-ové a y-ové souřadnice pixelu (bodu), který je v rastru na souřadnicích i, j . Pomocí *separation* vektoru následně získáme tzv. *gradient* vektor

$$\vec{g}_{ij} = (P(x_{ij}, y_{ij}) - P(x_c, y_c)) * \frac{\vec{d}_{ij}}{\|\vec{d}_{ij}\|}, \quad (5.9)$$

kde $P(x_{ij}, y_{ij})$ je hodnota parametru P pro pixel na souřadnicích i, j a pro střední pixel okna to je hodnota $P(x_c, y_c)$. Index homogenity pro daný pixel odpovídá normě součtu všech *gradient* vektorů v daném okně.

$$H_{ij} = \left\| \sum_{k=i-K}^{i+K} \sum_{l=j-K}^{j+K} \vec{g}_{kl} \right\| \quad (5.10)$$

V případě, že se pixel nachází uvnitř homogenní oblasti, tak hodnota H_{ij} je malá, a naopak je velká, pokud se pixel blíží k hranici rozdělující dvě různé oblasti. Pokud máme více parametrů, podle kterých se má provést segmentace, pak je třeba nejdříve vypočítat pro každý pixel index homogenity odpovídající každému parametru zvlášť (H_{P_1}, H_{P_2}, \dots) a celkovou hodnotu lze následně získat jako

$$H = \sqrt{H_{P_1}^2 + H_{P_2}^2 + \dots + H_{P_n}^2}. \quad (5.11)$$

Před výpočtem celkového H-indexu se ještě převádějí dílčí H-indexy do stejného rozsahu a určení prahové hodnoty, od které je bod považován za hraniční, závisí na samotné aplikaci, kdy je na základě pozorování nalezena ideální hranice.

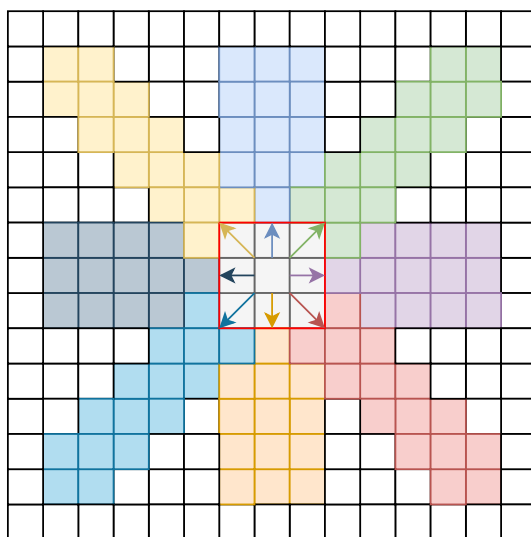
5.3 Upravený postup segmentace - implementace

V této práci si proces segmentace upravíme tak, aby šel aplikovat i na nerovnoměrně distribuované body, tzn. že vzdálenost mezi jednotlivými body může být různá. Tudíž nejprve si všechny body popisující terén namapujeme do dvourozměrného pole a tím lze nahlížet na naše data, jako by byla v pomyslném rastru. Již v tomto kroku zavádíme do našeho řešení určitou nepřesnost, jelikož převádíme reálná čísla na celá čísla. Po načtení bodů ze vstupního souboru nejprve zjistíme extrémy souřadnic, tedy minimální a maximální hodnoty x-ové a y-ové souřadnice ($\min X$, $\max X$, $\min Y$, $\max Y$) a jejich rozdílem získáme skutečnou velikost zkoumaného území ($\text{range}X = \max X - \min X$, $\text{range}Y = \max Y - \min Y$) popsaného body v jednom testovacím souboru. Dvourozměrné pole vytvoříme o stejných rozměrech, abychom zachovali přibližně stejné vzdálenosti jako jsou ve skutečnosti, takže vzdálenost sousedních buněk v poli odpovídá hodnotě jedna. Následně pro každý bod přepočteme jeho skutečné souřadnice na indexy do pole podle následujících formulí:

$$\begin{aligned} \text{row} &= \text{range}Y - 1 - \text{Round}\left(\frac{(y - \min Y)}{\text{range}Y} * (\text{range}Y - 1)\right), \\ \text{column} &= \text{Round}\left(\frac{(x - \min X)}{\text{range}X} * (\text{range}X - 1)\right), \end{aligned} \quad (5.12)$$

kde *row* a *column* určují výsledný řádek a sloupec v poli a (*x*, *y*) jsou skutečné souřadnice mapovaného bodu.

Problémem je, že v poli existují buňky, do kterých nebyl namapován žádný bod, a stejně tak se může stát, že do jedné buňky spadá více bodů. V takovém případě použijeme bod, který byl do dané buňky pole namapován jako první. V případě prázdných buněk musíme při procházení pole oknem pro každou prázdnou buňku hledat nejbližší bod v daném směru a tímto bodem vyplnit prázdné místo. Nejbližší bod hledáme do určité vzdálenosti (v našem případě do 10 buněk) od chybějícího bodu v daném směru (Obr. 5.7), a pokud žádný takový bod není nalezen, pak je prázdné místo vyplněno prostředním bodem okna.



Obr. 5.7: Ukázka toho, v jakých směrech se hledají nejbližší body do vzdálenosti 5 v případě, že nám některý z krajních bodů okna chybí.

Z důvodu potřeby hledání nejbližších bodů, jsme zvolili velikost okna 3, tedy $K = 1$, jelikož pro větší okno by se hledání chybějících bodů stalo mnohem komplikovanějším. Index homogenity počítáme pouze pro ty buňky pole, ve kterých existuje nějaký bod, a navíc vynecháváme krajní řádky a sloupce pole, ve kterých body nemají spočtené hodnoty potřebných parametrů. Jak už bylo řečeno, index homogenity je výsledkem normy, v našem případě euklidovské normy součtu všech *gradient* vektorů v daném okně, avšak prostřední bod okna bude mít *gradient* vektor vždy nulový, a proto jeho výpočet je vynechán.

Stejně tak vynecháme i výpočet jednotlivých *separation* vektorů \vec{d}_{ij} a jejich hodnotu nahradíme předdefinovanými směrovými vektory (Obr. 5.8). Tuto aproximaci děláme hlavně z důvodu toho, že při hledání nejbližšího bodu můžeme dostat bod, jehož směrový vektor by se značně lišil od směrového vektoru protilehlého bodu v okně. Je žádoucí, aby tyto vektory, které jsou opačně orientované, byly velikostně stejné, jelikož představují v podstatě váhu, kterou se následně násobí rozdíl hodnot daného parametru. Z těchto předdefinovaných konstantních vektorů si spočteme jejich velikost $\|\vec{d}_{ij}\|$ (Obr. 5.9) a následně jednotkový vektor $\frac{\vec{d}_{ij}}{\|\vec{d}_{ij}\|}$ (Obr. 5.10), který využijeme při výpočtu *gradient* vektoru.

(-1,-1)	(0,-1)	(1,-1)
(-1,0)	x	(1,0)
(-1,1)	(0,1)	(1,1)

Obr. 5.8: Konstantní *separation* vektory \vec{d}_{ij} pro jednotlivé body v okně 3x3. Prostřední bod okna má nulový směrový vektor, proto není definován.

$\sqrt{2}$	1	$\sqrt{2}$
1	x	1
$\sqrt{2}$	1	$\sqrt{2}$

Obr. 5.9: Velikost jednotlivých *separation* vektorů $\|\vec{d}_{ij}\|$ pro jednotlivé body v okně 3x3.

(-0.707,-0.707)	(0,-1)	(0.707,-0.707)
(-1,0)	x	(1,0)
(-0.707,0.707)	(0,1)	(0.707,0.707)

Obr. 5.10: Jednotkové vektory $\frac{\vec{d}_{ij}}{\|\vec{d}_{ij}\|}$ pro jednotlivé body v okně 3x3.

Posledním krokem v procesu segmentace je převedení hodnot indexů homogenity jednotlivých parametrů do intervalu $\langle 0,1 \rangle$, aby byly všechny dílčí H-indexy ve stejném rozsahu. Toto provedeme vydělením hodnoty H_x každého bodu hodnotou ω_x , která odpovídá celému rozsahu hodnot H_x . Index x označuje konkrétní parametr. V případě, že kombinujeme více dílčích H-indexů podle rovnice 5.11, výsledná hodnota již může přesáhnout hodnotu jedna.

V další kapitole se již podíváme na výsledky z popsané segmentace. Rozebereme si jednotlivé dílčí indexy homogenity a vyhodnotíme, jaká kombinace parametrů nejlépe určí hranice mezi homogenními oblastmi. Na základě těchto výsledků se rozhodne o dalším postupu v této práci. V případě úspěšného nalezení dílčích částí terénu budou následovat hypotézy o slučování těchto částí do větších celků a následné určování kombinací dílčích částí, které pokryjí nějaké terénní rysy.

6 Hypotézy, experimenty a výsledky

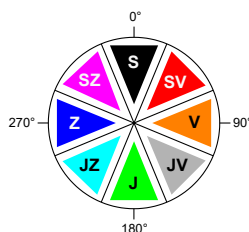
Program byl implementován v programovacím jazyce C# a veškeré experimenty byly prováděny na stroji s procesorem Intel Core i5-7300HQ 2.5GHz, pamětí RAM 8GB a grafickou kartou Nvidia GeForce GTX 1050. Vstupními daty bylo šest testovacích souborů [3] formátu .xyz, ve kterých každá řádka souboru obsahuje souřadnice x , y , z jednoho bodu a souřadnice jsou oddělené mezerami. Počet bodů v jednotlivých souborech je uveden v následující tabulce 6.1.

Soubor 1	Soubor 2	Soubor 3	Soubor 4	Soubor 5	Soubor 6
531 259	448 254	402 465	508 488	443 071	471 664

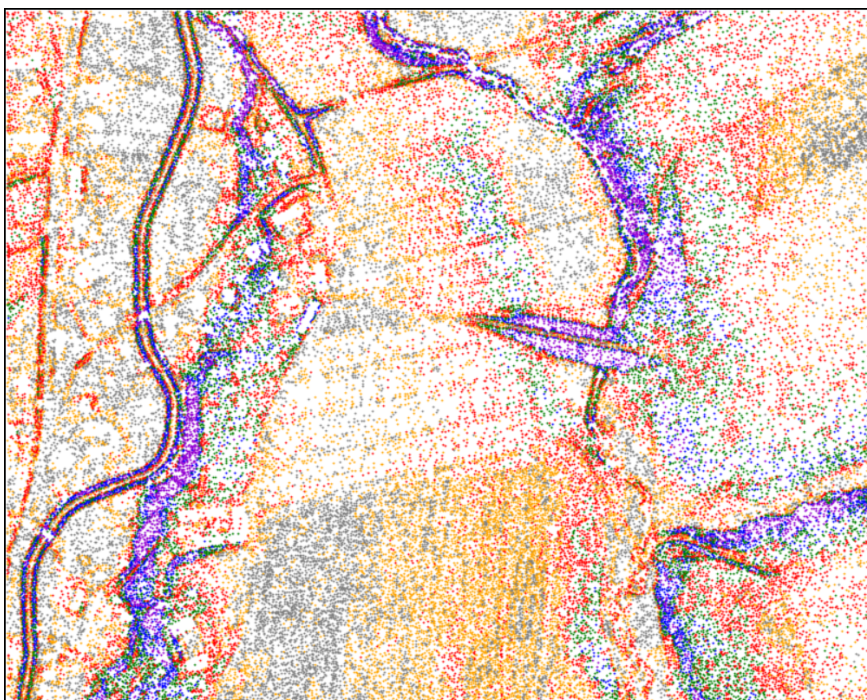
Tabulka 6.1: Počet bodů v jednotlivých testovacích souborech.

6.1 Vykreslení bodů podle hodnot jednotlivých parametrů

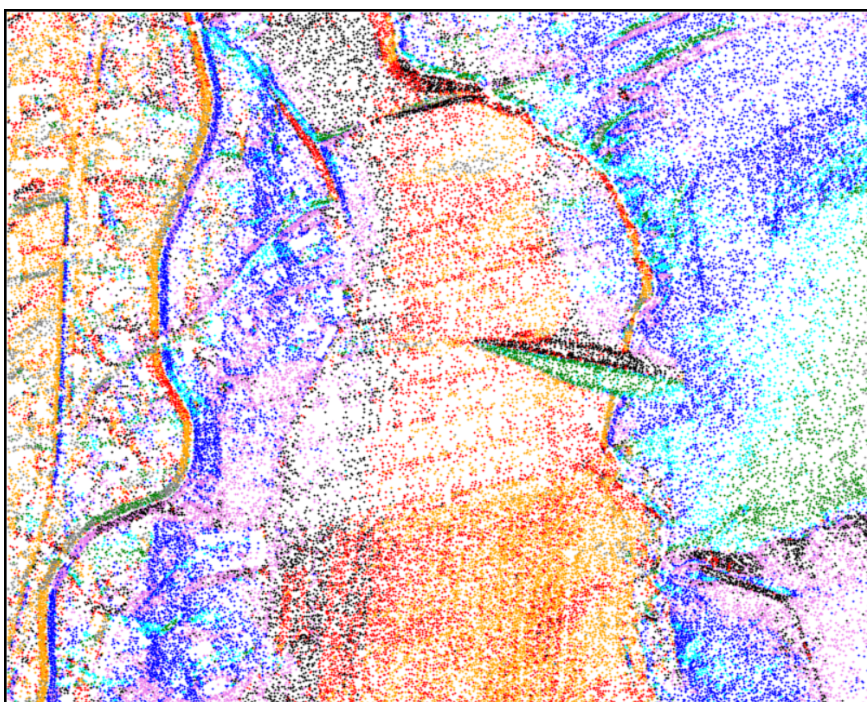
Abychom získali alespoň přibližný přehled o členitosti terénu zkoumaného území, obarvili jsme body podle konkrétních hodnot jednotlivých parametrů. Pro ukázkou jsou zde zobrazeny výsledky z jedné testovací množiny bodů pro všechny parametry kromě z-ové souřadnice. Na obrázku 6.2 jsou body obarvené podle hodnoty sklonu. Modro-fialová místa reprezentují prudké svahy, které ohraničují i koryto řeky, jak je vidět v levé části obrázku. Dále lze podle bodů s malým sklonem, což jsou šedivá místa, nalézt rovinatější oblasti. Přidáme-li do pozorování směr sklonu (Obr. 6.3), pak již dokážeme rozlišit mezi kopci a prohlubněmi či údolími. Přibližně uprostřed zobrazené množiny bodů lze nalézt vyvýšený útvar, který můžeme označit za vrcholový hřbet. Barevné označení jednotlivých směrů je zobrazeno na obrázku 6.1.



Obr. 6.1: Barevné označení podle směru sklonu.

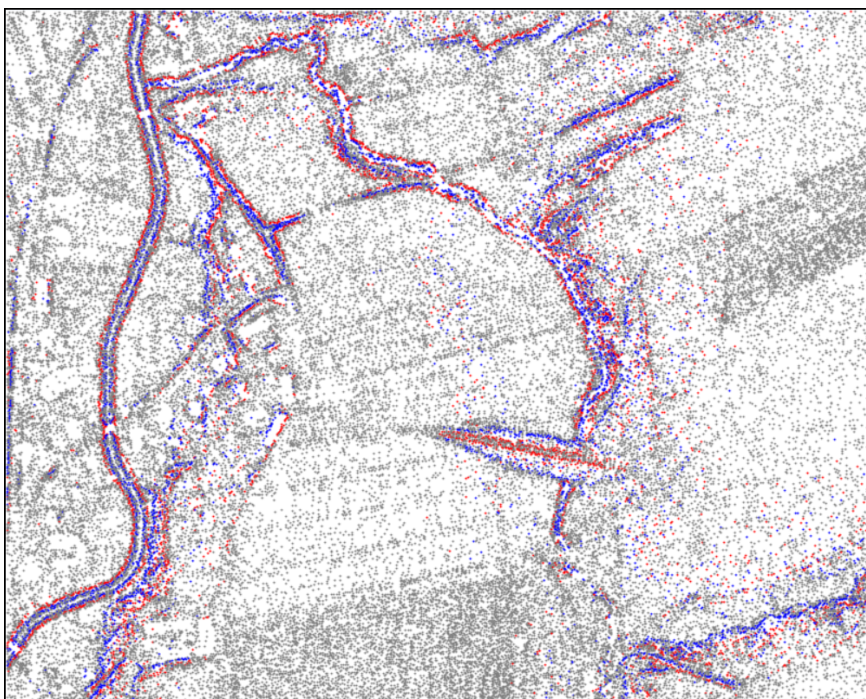


Obr. 6.2: Body s hodnotou sklonu $< 5^\circ$ šedivě, $5 - 10^\circ$ oranžově, $10 - 20^\circ$ červeně, $20 - 30^\circ$ zeleně, $30 - 40^\circ$ modře, $> 40^\circ$ fialově.

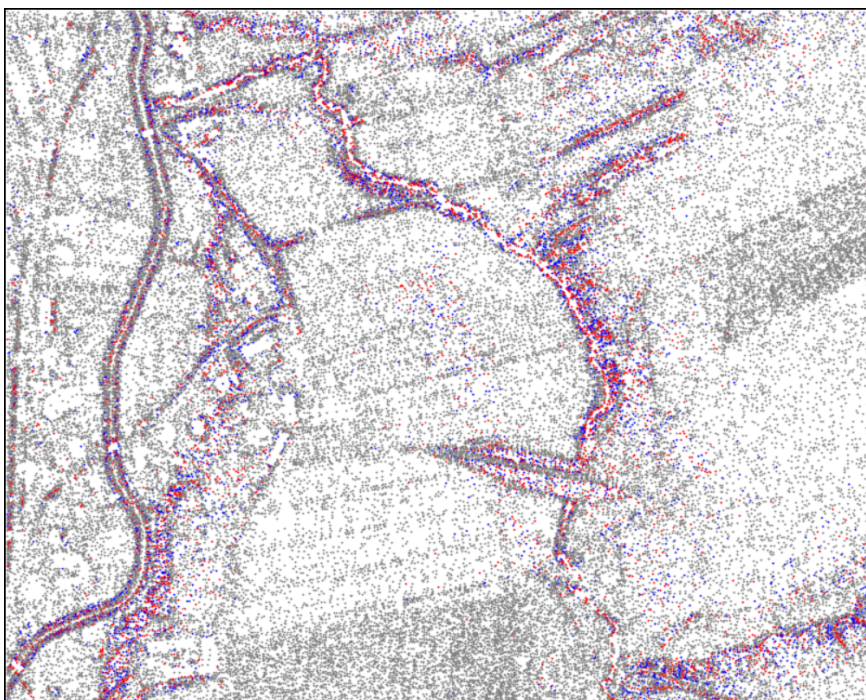


Obr. 6.3: Obarvení bodů podle směru sklonu.

Na dalších obrázcích jsou body obarvené podle profilové (Obr. 6.4) a planární (Obr. 6.5) křivosti. U profilové křivosti je vidět, že vnitřek koryta řeky je ohraničen modrými body, které reprezentují konkávní profilové zakřivení, a naopak červené body s konvexním profilovým zakřivením obklopují koryto řeky z vnějšku. Dvě červené linie bodů lze také nalézt podél hřbetnice již zmiňovaného kopce uprostřed obrázku a modré linie bodů, které reprezentují úpatnice daného kopce. U planární křivosti již není tak snadné rozpoznat nějaké specifické linie, jelikož červené a modré body se oproti profilové křivosti mezi sebou mnohem více prolínají, a proto tento parametr pravděpodobně nebude v dalších pozorováních příliš užitečný.



Obr. 6.4: Obarvení bodů podle hodnoty profilové křivosti.
červeně < -50 , modře > 50 , šedivě - ostatní body



Obr. 6.5: Obarvení bodů podle hodnoty planární křivosti.
červeně < -30 , modře > 30 , šedivě - ostatní body

6.2 Rozbor indexů homogenity

Výpočet indexu homogenity byl popsán v předchozí kapitole a podle jeho hodnoty se určují hraniční body, které rozdělí terén na homogenní oblasti. Prahovou hodnotu indexu homogenity, od které je bod považován za hraniční, jsme stanovili metodou pokus-omyl postupným zkoušením různých hodnot. Dosažené výsledky však ukázaly, že žádná kombinace vybraných parametrů nedokáže určit přesné hranice, podle kterých bychom rozdělili body do množin reprezentující homogenní části, jelikož většina bodů označená za hraniční se nachází blízko u sebe a tvoří tak „souvislou“ oblast. To je způsobeno tím, že více našich parametrů detekuje body ve stejných oblastech, což bude vidět na výsledcích z dílčích indexů homogenity. Následující obrázek 6.6 zobrazuje výsledek z jedné množiny bodů, kde celkový index homogenity je složen ze všech vybraných parametrů. Na obrázku nejsou zvýrazněné pouze hraniční body, ale body jsou obarvené podle intervalu, do kterého spadá hodnota indexu homogenity (H) v daném bodě. Jednotlivé intervaly hodnot mají následující barevné označení:

šedivě... $0 < H < 0.1$

červeně... $0.1 \leq H < 0.2$

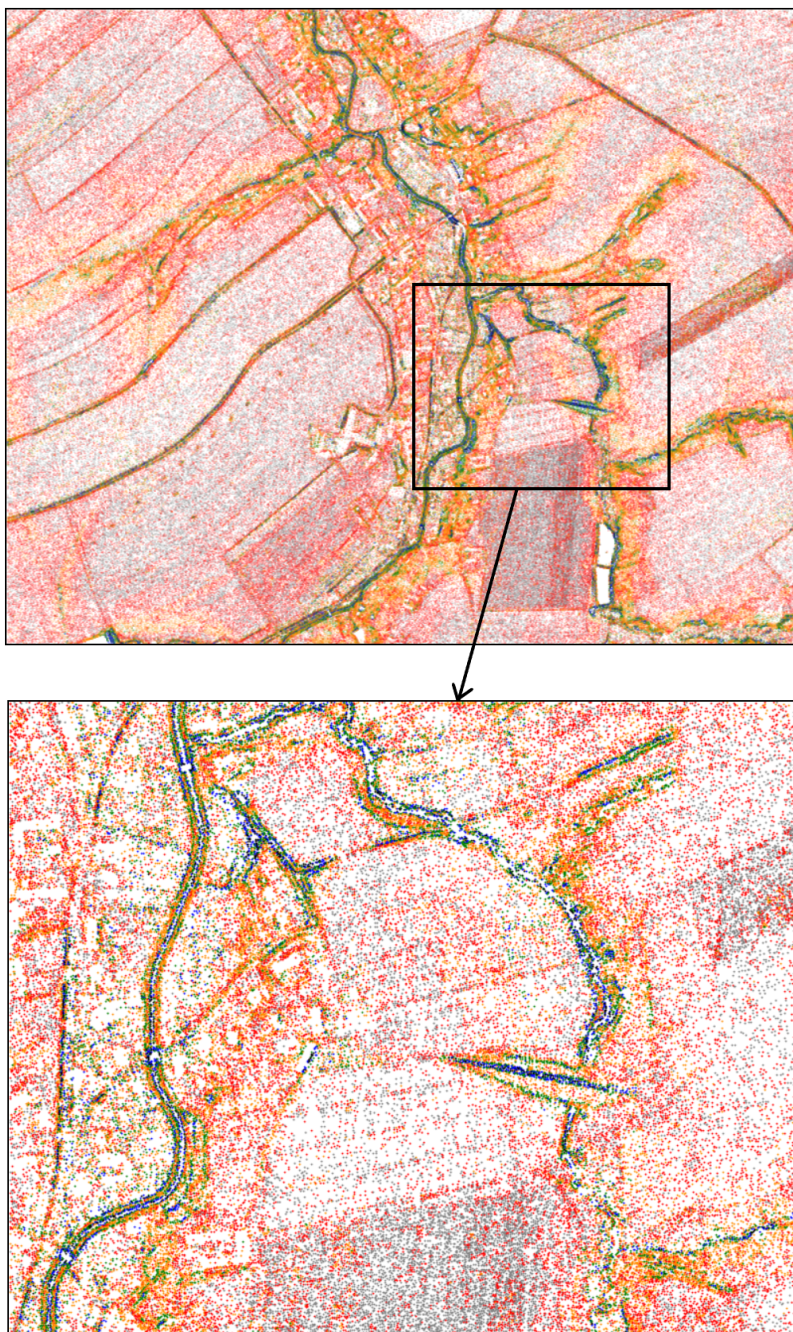
oranžově... $0.2 \leq H < 0.4$

zeleně... $0.4 \leq H < 0.6$

modře... $0.6 \leq H < 0.8$

černě... $0.8 \leq H$

Pro představu lze zelené, modré a černé body považovat za hraniční, z čehož je vidět, že téměř nikde netvoří uzavřené homogenní oblasti, které by pokryly celou zkoumanou oblast.

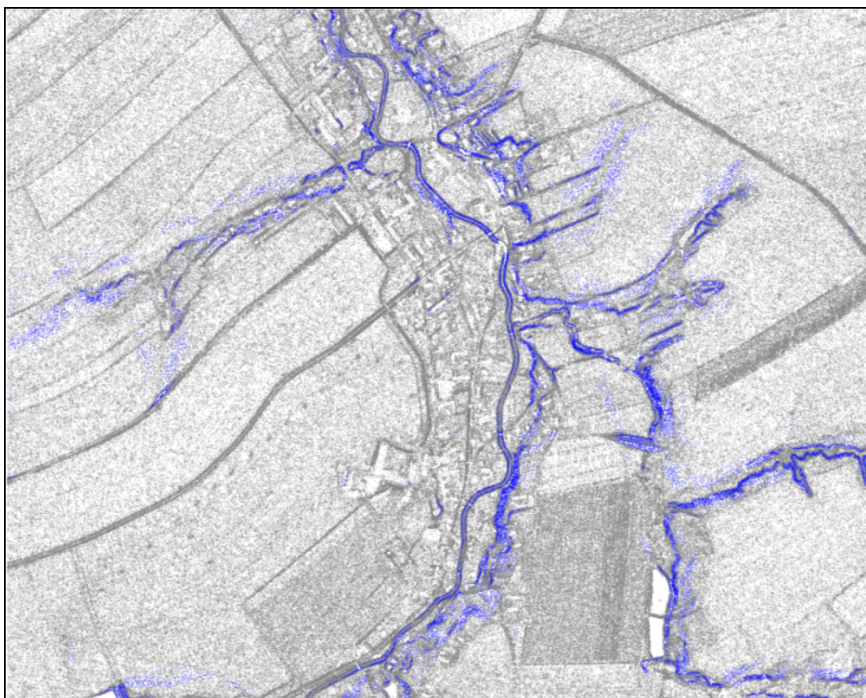


Obr. 6.6: Obarvení bodů podle hodnoty celkového indexu homogenity.

Segmentace terénu aplikovaná na nerovnoměrně distribuované body nepřinesla příliš uspokojivý výsledek, a proto jsme se pokusili využít vypočtené indexy homogenity odlišným způsobem. Každý index homogenity jednotlivých parametrů udává určitou vlastnost terénu v daném bodě, a tedy body s velkou hodnotou H-indexu již nebudeme považovat za hraniční, ale budou reprezentovat části terénu s danou vlastností. Nyní se podíváme na získané hodnoty H-indexů jednotlivých parametrů a rozebereme si jejich možné využití k detekci nějakých specifických rysů v terénu. U každého indexu homogenity jsou uvedeny konkrétní prahové hodnoty, které byly získány postupným zkoušením různých hodnot, a na základě pozorování výsledků byla stanovena ideální prahová hodnota.

H_Z - index homogenity souřadnice z

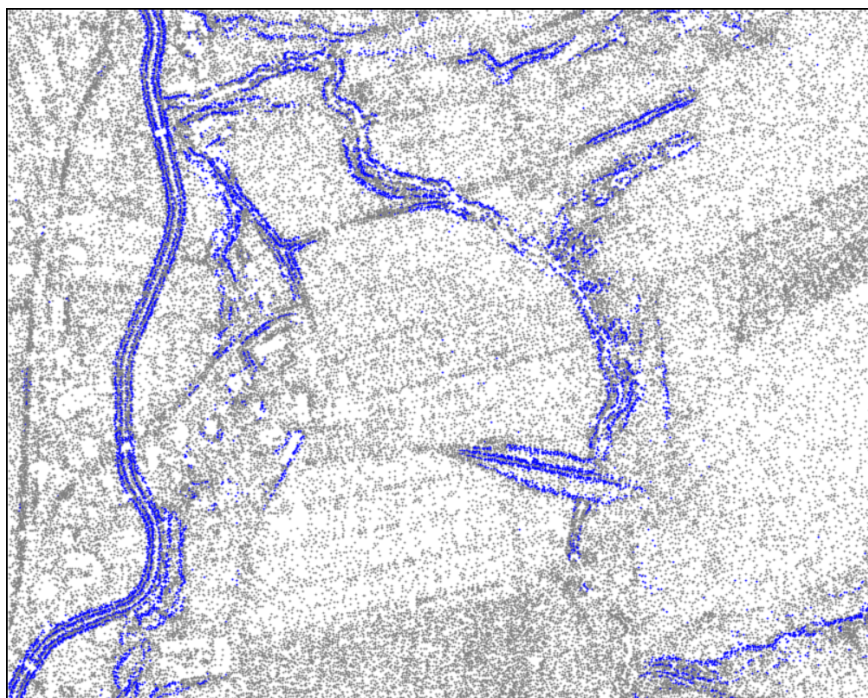
Udává míru změny souřadnice z v daném bodě vzhledem k okolí. Malá hodnota H_Z určuje roviny a velká hodnota určuje svahy. Z toho plyne, že hodnota H_Z nám poskytne stejnou informaci jako samotná hodnota sklonu. Body s hodnotou H_Z menší než 0.016 určují plochy se sklonem přibližně do 3° a body s hodnotou H_Z větší jak 0.19 určují svahy, které mají sklon přibližně od 30° (Obr. 6.7).



Obr. 6.7: Modré body značí svahy nad 30° - $H_Z > 0.19$.

H_S - index homogenity sklonu

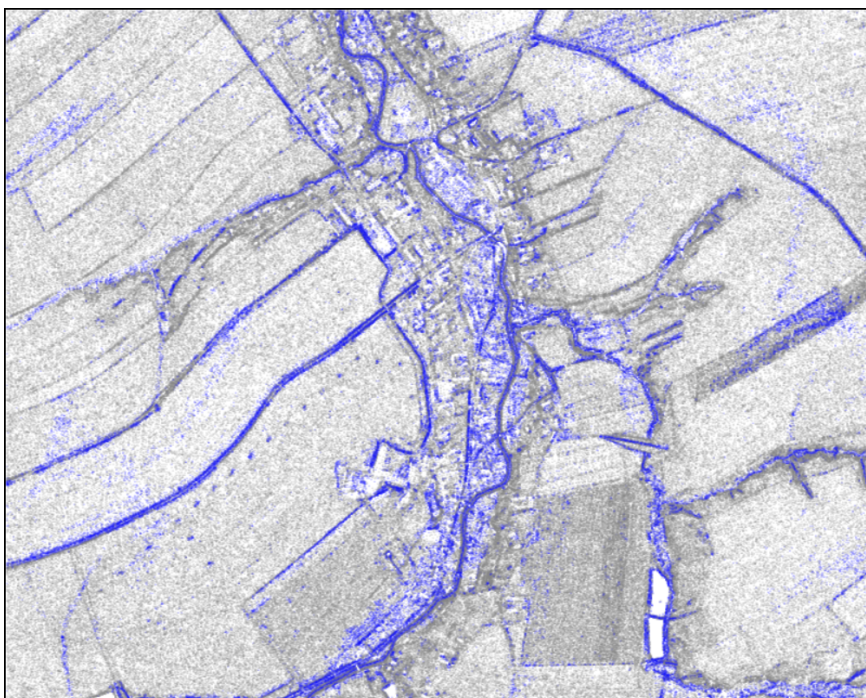
Udává míru změny sklonu v daném bodě vzhledem k okolí, což je v podstatě definice křivosti. Pokud je hodnota H_S menší než 0.05, pak je bod obklopen body s podobnou hodnotou sklonu, což je většina bodů, a proto nás tato hodnota příliš nezajímá. Naopak body s hodnotou nad 0.28 tvoří terénní hrany neboli body ležící na přechodu mezi různě skloněnými svahy (Obr. 6.8), tj. například úpatí, kde rovina přechází ve značný svah.



Obr. 6.8: Modré body značí terénní hrany - $H_S > 0.28$. (přibližná část území)

H_A - index homogenity směru sklonu

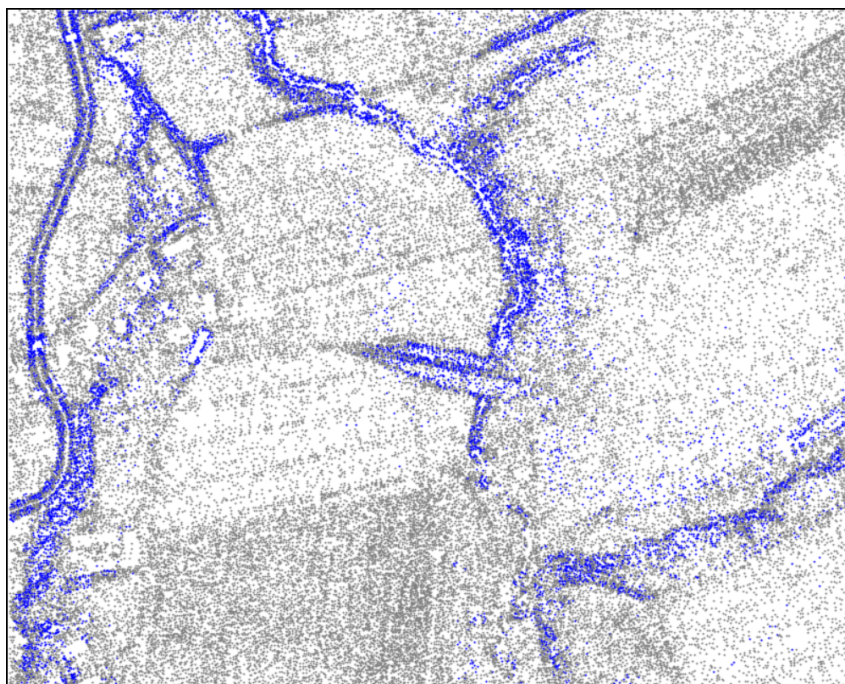
Udává míru změny směru sklonu v daném bodě vzhledem k okolí. Tzn. bod, který je obklopen body s odlišným směrem sklonu, má větší hodnotu H_A než bod, kde jeho sousední body mají stejný směr. Pro výpočet *gradient* vektoru v tomto případě nelze brát přímo rozdíl stupňů, jelikož hodnoty ve stupních tvoří kruh, kde po 359° následuje opět 0° . Proto abychom dostali korektní hodnotu, o kolik stupňů se liší dva body, musíme výpočet upravit na absolutní hodnotu z rozdílu stupňů a v případě, že výsledek přesahuje hodnotu 180° , je třeba ještě výsledek odečíst od 360° . Takto získaný index homogenity s hodnotou nad 0.2 dobře detekuje místa, kde dochází k přechodu mezi svahy opačných směrů (Obr. 6.9). Toho lze využít například pro nalezení hřbetnic či údolnic.



Obr. 6.9: Modré body značí přechody mezi svahy do opačných směrů - $H_A > 0.2$.

H_{PR} - index homogenity profilové křivosti

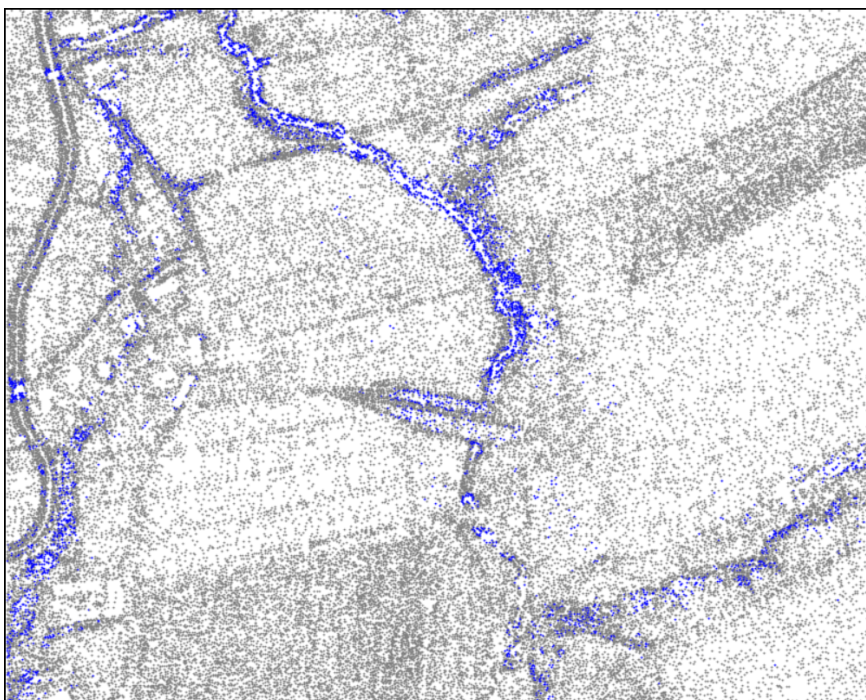
Udává míru změny profilové křivosti v daném bodě vzhledem k okolí. Jelikož křivost může být kladná i záporná, je třeba počítat s absolutní hodnotou z rozdílu křivosti dvou bodů. Hodnota H_{PR} nad 0.1 nám udává místo, kde terén začíná značně stoupat či klesat (Obr. 6.10). Abychom byli schopni detekovat čistě přechody mezi konvexním a konkávním zakřivením, vyzkoušeli jsme alternativní stanovení hodnoty H_{PR} , kdy jsme porovnávali znaménko křivosti krajních bodů v okně se znaménkem prostředního bodu. Pokud alespoň čtyři okolní body měly opačné znaménko křivosti, než měl prostřední bod okna, nastavili jsme hodnotu H_{PR} na jedna, v opačném případě na nula. Vzhledem k tomu, že body s kladným a záporným zakřivením se mezi sebou tolik prolínají, tak téměř každý bod měl velkou hodnotu H_{PR} , a tedy tento přístup neposkytl požadovaný výsledek.



Obr. 6.10: Modré body mají hodnotu $H_{PR} > 0.1$. (přibližná část území)

H_{PL} - index homogenity planární křivosti

Udává míru změny planární křivosti v daném bodě vzhledem k okolí. Při výpočtu je opět třeba počítat s absolutní hodnotou z rozdílu křivosti kvůli případným rozdílným znaménkům. Hodnota H_{PL} nad 0.08 nám říká, že v daném bodě dochází ke značné změně zakřivení ve směru vrstevnic, což by teoreticky mělo přispět k detekci např. úžlabin či svahových hřbetů, avšak ze získaných výsledků (Obr. 6.11) jsme nebyli schopni přesněji určit hranice těchto terénních rysů.



Obr. 6.11: Modré body mají hodnotu $H_{PL} > 0.08$. (přibližná část území)

6.3 Slučování bodů do větších terénních celků

Cílem experimentu bylo pomocí dostupných parametrů, ať už se jedná o samotnou hodnotu z -ové souřadnice, sklonu, směru sklonu, profilové či plánární křivosti nebo z nich spočtených indexů homogenity (H_Z , H_S , H_A , H_{PR} , H_{PL}), které byly popsány v předchozí části, nalézt ve vstupních datech takové podmnožiny bodů, které by jako celek reprezentovaly nějaký větší terénní celek, jako je např. údolí nebo kopec.

6.3.1 Postup experimentu

Z předchozího pozorování jsme vyvodili, že ze samotných parametrů nejsme schopni pokrýt celý terénní tvar, ale pouze určitou část. Proto jsme si nadefinovali specifické části terénu, které jsme schopni detekovat pomocí zmíněných parametrů, a z těchto menších částí jsme se pokusili složit větší terénní celky. Jednotlivé kategorie jsou následující: 1. roviny, 2. hřbetnice a údolnice, 3. terénní hrany, 4. prudší svahy se stejným sklonem a 5. prudší svahy se zakřivením. Pro nalezení těchto specifických částí terénu jsme manuálně, pomocí metody pokus-omyl, zkoušeli různé hodnoty parametrů v různých kombinacích a na základě pozorování obarvení jednotlivých bodů jsme vyhodnotili ideální nastavení hodnot parametrů popisující jednotlivé kategorie. Takto získané kombinace parametrů s konkrétními hodnotami v podstatě

určují pravidla (logické výrazy), které říkají, zda daný bod spadá do dané kategorie či nikoliv. Následně jsme na každý bod ze vstupního souboru aplikovali postupně jednotlivá pravidla v pořadí, jak jsou výše uvedena. Pokud daný bod byl již zařazen do některé z kategorií, další pravidla se již na tento bod neaplikovala. Například pokud bod byl zařazen do skupiny roviny, pak už dále nebyl testován, zda spadá ještě do některé jiné kategorie. Jednotlivé body jsme obarvili podle toho, do jaké kategorie spadají.

6.3.2 Výsledky experimentu

Pozorování jsme provedli nad všemi vstupními soubory. Níže jsou zobrazeny výsledky ze dvou vstupních množin bodů a další lze nalézt v příloze A. Jelikož nadefinované specifické části terénu jsou poměrně obecné, nepovedlo se odizolovat jeden konkrétní terénní tvar. Body, které nebyly zařazeny do žádné kategorie, jsme vykreslili šedivě.

Specifické části terénu

1. Roviny - zelené body.

- Pravidlo 1: $sklon < 3$
- Jedná se spíše o pseudoroviny, kdy hodnota sklonu v daném bodě je menší než 3° .

2. Hřbetnice a údolnice - modré body.

- Pravidlo 2: $(H_A > 0.18) \ \& \ ^1(H_S > 0.15)$
- Samotný parametr H_A detekuje i nepatrné „hrboly“ (místa, kde se nejedná o kopec či údolí), a proto jsme přidali parametr H_S , který tyto místa z větší míry eliminuje.
- Výše uvedené pravidlo nedetekuje pouze hřbetnice a údolnice, ale také například úpatnice. Obecně všechny zlomy, kde se stýkají dva větší svahy opačných směrů.

3. Terénní hrany - fialové body.

- Pravidlo 3: $H_S > 0.28$
- Jedná se o místa se značným zakřivením.

4. Prudší svahy se stejným sklonem - červené body.

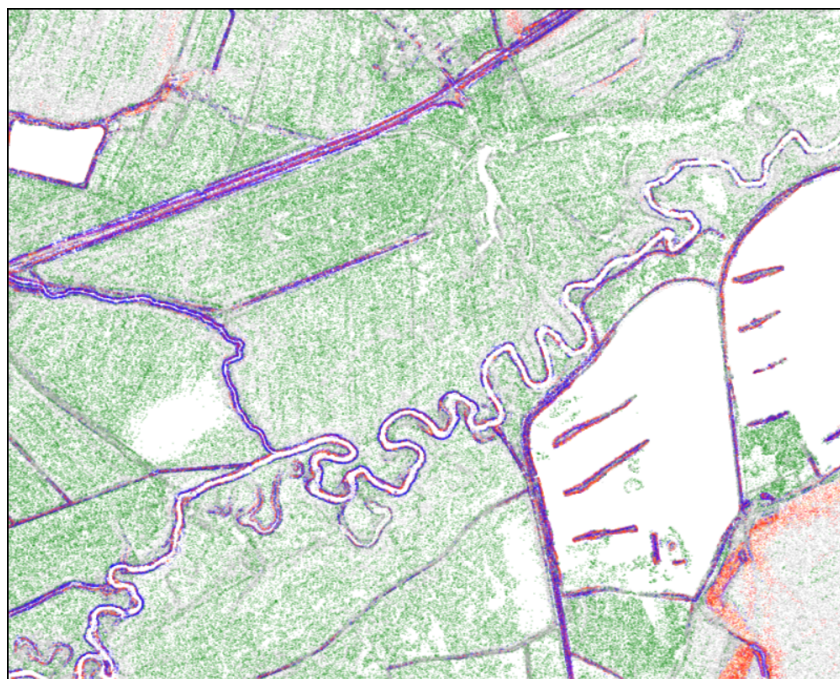
- Pravidlo 4: $(sklon > 15) \ \& \ (H_S < 0.15)$
- Zvolili jsme mezní hodnotu sklonu 15° , která může být snadno změněna, pokud bychom chtěli svahy s jiným sklonem.

¹Znak ampersand & označuje logickou spojku konjunkce (a zároveň).

5. Prudší svahy se zakřivením - oranžové body.

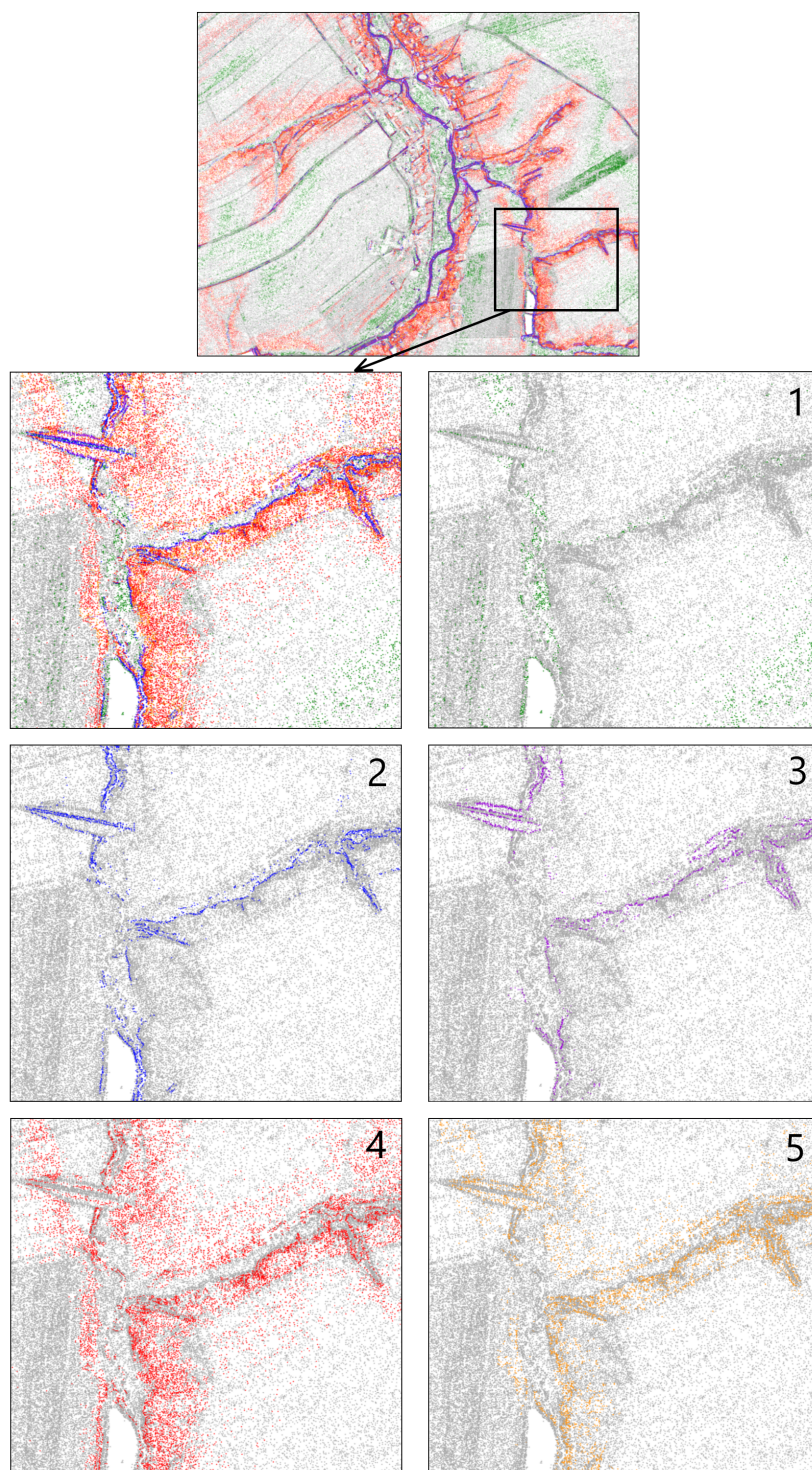
- Pravidlo 5: $sklon > 15$
- Tato kategorie slouží jako doplněk ke kategorii 4, abychom pokryli většinu bodů tvořící svah.

Z výsledků je vidět poměrně dobré pokrytí jak snížených, tak vyvýšených terénních celků, jako jsou například údolí či kopce, avšak pouhým okem je obtížné jednotlivé terénní tvary mezi sebou rozeznat. Některé body tvořící dno údolí nemusí být zařazeny do žádné z kategorií, jelikož se jedná o mírné svahy, konkrétně jejich hodnota sklonu se pohybuje mezi 3 až 15°. Dále jsme schopni ohraničit například železnice, které se v terénu často nachází na vyvýšeném podkladu, a stejně tak zapuštěné silnice. Ovšem pokud jsou silnice na stejné výškové úrovni, jako je okolní terén, pak je nejsme schopni detekovat. Na obrázku 6.12 je vidět ohraničení koryta řeky a v určitých případech lze ohraničit i větší vodní plochy, na kterých nemáme naměřené žádné body (souvislá bílá místa).



Obr. 6.12: Soubor 1 - obarvení bodů podle kategorií.

Obrázek 6.13 zobrazuje kromě celého zkoumaného území i přibližnou část, kterou jsme pro přehlednost vykreslili i po jednotlivých kategoriích. Je vidět, že modré a fialové body se nachází přibližně na stejných místech, což je způsobeno tím, že body z kategorie 2 jsou podmnožinou bodů z kategorie 3.

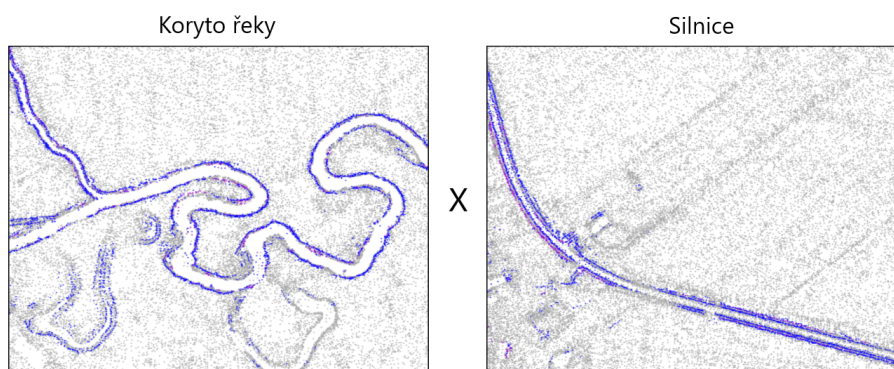


Obr. 6.13: Soubor 2 - obarvení bodů podle kategorií. Obrázky 1-5 reprezentují každou kategorii samostatně. (1 - roviny, 2 - přechody mezi svahy opačných směrů, 3 - místa se značnou změnou sklonu, 4 - svahy se stejným sklonem nad 15° , 5 - zakřivená místa svahů se sklonem nad 15°)

6.4 Hypotézy o rozpoznávání terénních rysů

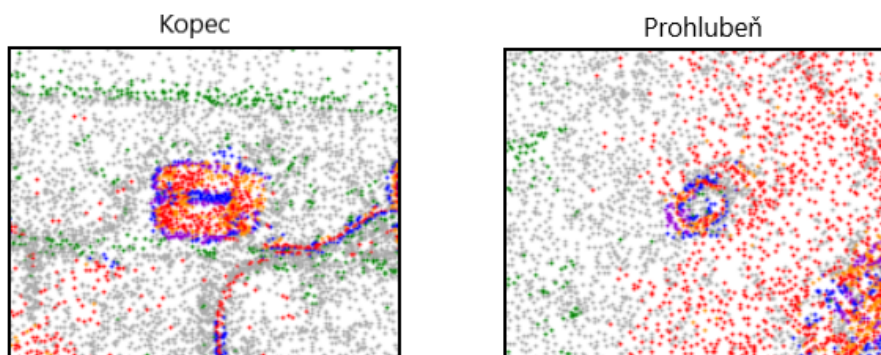
V této části navážeme na výsledky z předchozího experimentu, u kterého jsme našli pravidla pro zařazení bodů do jednotlivých kategorií reprezentující určitou část terénu. Tyto části pokryly poměrně velkou část území a nikoliv pouze jednotlivé terénní tvary, které bychom mohli mezi sebou jednoznačně rozeznat. Nyní je naším cílem na základě vykreslených bodů podle kategorií vytvořit hypotézy o rozpoznání jednotlivých terénních rysů. Tedy nalézt určité vztahy mezi dílčími částmi terénu, podle kterých lze identifikovat konkrétní terénní tvar a zároveň ho odlišit od ostatních. Nebudeme se omezovat pouze na terénní tvary popsané v kapitole 3, ale zaměříme se na veškeré terénní rysy, které lze z uvedených výsledků vypožorovat.

Již víme, že body z kategorie 1 a 2 (modré a fialové body) z velké části ohraničují koryta řek a silnice. Samozřejmě tyto body se vyskytují i v jiných částech, ovšem pro koryta řek a silnice jsou typické dvě souběžné linie těchto bodů. V případě, že se kolem linie modrých a fialových bodů vyskytuje větší oblast bez bodů, pak se pravděpodobně jedná o ohraničení vodní plochy. Hlavním rozdílem mezi korytem řeky a silnicí je, že uvnitř koryta řeky nejsou naměřeny žádné body (Obr. 6.14), zatímco silnice vždy nějaké obsahuje. U úzkých silnic a potoků může být velmi obtížné detekovat mezeru mezi liniemi modrých a fialových bodů. V takovém případě jsou silnice a úzká koryta vodních toků tvořena pouze jednou širší linií těchto bodů, a jejich rozlišení lze provést na základě míry zakřivení této linie bodů. Koryta vodních toků velmi často zahýbají, zatímco silnice na většině úsecích vedou jedním přímým směrem. Dalším znakem odlišující koryto vodního toku od silnice je výškové umístění. Koryto řeky je vždy zapuštěné v terénu, ale silnice se může nacházet i na vyvýšeném podkladu.



Obr. 6.14: Porovnání koryta řeky a silnice.

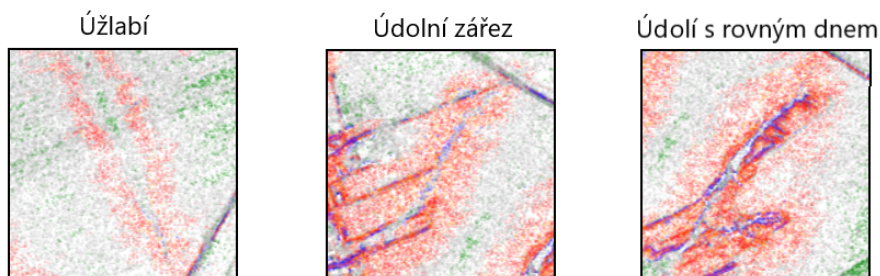
Nyní se zaměříme na rozpoznávání uzavřených kopců a prohlubní. Oba tyto tvary jsou ohraničené modrými a fialovými body, které tvoří relativně uzavřenou křivku. Od těchto bodů směrem dovnitř se nachází červené a oranžové body reprezentující svahy (Obr. 6.15), u kterých však nejsme schopni říci, zda svah klesá či stoupá směrem do středu uzavřené oblasti. Pro odlišení kopců od prohlubní si musíme pomoci buď směrem sklonu svahů anebo využitím z-ové souřadnice. V případě kopce mají body blíže ke středu uzavřené oblasti větší hodnotu z-ové souřadnice než body na okraji uzavřené oblasti. Logicky u prohlubně je tomu naopak. Modré a fialové body se mohou vyskytovat i uvnitř těchto terénních tvarů. Pokud opět tvoří uzavřenou křivku, tak v případě kopce se jedná o ohraničení temene a můžeme kopec považovat za plošinu. Jedná-li se o prohlubeň, tak tyto body ohraničují dno prohlubně. Pokud tyto „vnitřní“ modré body netvoří uzavřenou křivku, pak se v případě kopce jedná o ostrý hřbet, nebo zářez na dně prohlubně. V případě, že v uzavřené oblasti kopce se nevyskytují žádné další modré body, můžeme kopec označit za kupu.



Obr. 6.15: Porovnání kopce a prohlubně.

Dále se podíváme na rozpoznávání protáhlých sníženin a vyvýšenin, což jsou údolí a vrcholové hřbety. Tyto tvary lze detekovat především podle svahů (červené a oranžové body) tak, že nalezneme dva svahy blízko u sebe, oddělené jinými než červenými a oranžovými body. Tedy svahy mohou být oddělené buď modrými a fialovými body, které značí ostrý přechod svahů, nebo je mezi svahy mezera ve smyslu šedivých a zelených bodů. V takovém případě se jedná o pozvolný přechod mezi svahy. Pro odlišení sníženiny od vyvýšeniny musíme opět využít z-ovou souřadnici nebo si zjistit, do jakých směrů jsou svahy nakloněné.

Zjistíme-li, že se jedná o údolí, potom můžeme využít modré a fialové body k určení jeho typu (Obr. 6.16). V případě, že se mezi svahy nevyskytují žádné tyto body, pak se jedná o úžlabinu, která nemá žádné zřetelné úpatnice. Pokud jsou svahy oddělené jednou linií modrých bodů reprezentující údolnici, pak se jedná o údolní zářez. Poslední možností je údolí s rovným dnem, které je ohraničené dvěma liniemi modrých či fialových bodů a mezi nimi jsou šedivé a zelené body.



Obr. 6.16: Různé typy údolí.

Realizace hypotéz

Pro implementaci hypotéz je třeba nadefinovat vhodné datové struktury pro reprezentaci dílčích částí terénu a hlavně zachytit sousednost mezi dílčími částmi. Jedna z možností je využití mřížky a porovnávání sousedních buněk. Mřížka umožňuje snadno zachytit sousednost, ale jsme omezeni na pravidelný čtvercový tvar a v určitých situacích se může hodit větší mřížka a jindy zase menší. Tento přístup vyžaduje nalézt vhodný algoritmus pro procházení buněk a definující, jaké buňky spolu mají sousedit tak, aby pokryly jeden konkrétní terénní tvar. Implementace navržených hypotéz zůstává nedořešeným problémem vyžadující mnoho další práce.

6.5 Shrnutí dosažených výsledků

Z vybraných parametrů jsme využili především z -ovou souřadnici, sklon a směr sklonu. Jenom z těchto parametrů lze poměrně dobře pokrýt veškeré sníženiny a vyvýšeniny a udělat si tak představu o členitosti terénu. Parametry křivosti jsme téměř nevyužili, jelikož jsme je nahradili indexem homogenity sklonu.

Ukázalo se, že segmentace terénu není příliš vhodná pro nerovnoměrně distribuované body. Hlavním problémem byly chybějící body v mřížce. Segmentaci jsme provedli pro všechny kombinace vybraných parametrů a žádná nepřinesla výsledek, který by vhodně rozdělil terén na homogenní oblasti. Proto původní záměr segmentace, nalézt hraniční body, jsme zavrhnuli a místo toho jsme se zaměřili na vlastnosti indexů homogenity jednotlivých parametrů. Obecně index homogenity udával míru změny daného parametru vzhledem k okolním bodům. Parametr H_Z poskytl stejnou informaci jako samotný sklon a indexy homogenity profilové a planární křivosti také nepřinesly žádnou novou užitečnou vlastnost. Užitečným parametrem se stal index homogenity směru sklonu, který detekoval body na přelomu svahů opačných směrů.

Pomocí dostupných parametrů jsme našli pravidla pro detekci specifických částí terénu. Pro nalezení rovin a svahů s hodnotou sklonu nad 15° jsme využili parametr sklon a pro detekci zakřivených míst na svahu přispěl index homogenity sklonu, který jsme také využili pro nalezení terénních hran. Detekce hřbetnic a údolnic byla založená především na indexu homogenity směru sklonu, který ovšem neurčil pouze hřbetnice a údolnice, ale i další terénní hrany. Po vykreslení těchto specifických částí terénu jsme dostali ohraničení vodních toků a dopravních cest za podmínky, že okolní terén není na stejné výškové úrovni. Jednoznačně rozpoznatelným prvkem byly větší vodní plochy, které neobsahovaly žádné naměřené body. Dále jsme pokrývali území veškerých sníženin a vyvýšenin, ale bez jejich rozlišení, k čemuž lze využít výsledky z obarvení bodů podle směru sklonu. Bohužel nadefinované specifické části terénu byly poměrně obecné a nepovedlo se z nich klasifikovat jednotlivé terénní tvary. K tomu jsme navrhli určité hypotézy, podle kterých lze již rozpoznat konkrétní terénní rysy. Podle těchto hypotéz bychom dokázali rozpoznat koryta vodních toků, silnice, kupy, plošiny, vrcholové hřbety a různé typy údolí jako je úžlabina, údolní zářez nebo údolí s rovným dnem.

7 Závěr

V této bakalářské práci jsme si uvedli základní přehled terénních tvarů i s jejich stručným popisem. Pro popis vlastností terénu v jednotlivých bodech jsme vybrali pět parametrů. Pomocí parametru výškové souřadnice z byly vypočteny další parametry, mezi které patří sklon, směr sklonu, profilová a planární křivost.

Pro rozdělení terénu na menší a geometricky jednodušší části jsme zvolili metodu segmentace terénu. Proces segmentace jsme museli patřičně upravit tak, aby byl aplikovatelný i na nerovnoměrně distribuované body. Segmentace byla provedena na šesti vstupních souborech se skutečnými daty a ze získaných výsledků jsme zjistili, že tato metoda není příliš vhodná pro nerovnoměrně distribuované body. Ze segmentace jsme získali indexy homogenity jednotlivých parametrů a ty jsme podrobili zkoumání, zda nám poskytnou nějakou užitečnou vlastnost terénu v daném bodě.

Dále jsme s využitím všech dostupných parametrů hledali logické funkce, které by našly specifické části terénu. Po sloučení těchto částí jsme provedli jejich analýzu. Kromě jednoznačně rozpoznatelných stojatých vodních ploch jsme dokázali z velké části ohraničit koryta vodních toků a silnic. Dále jsme detekovali veškerá místa sníženin a vyvýšenin, která ovšem nejsou mezi sebou rozlišitelná bez využití parametru směru sklonu. Na závěr jsme navrhli hypotézy o jednoznačném rozpoznání jednotlivých terénních tvarů na základě vztahů mezi nalezenými specifickými částmi terénu. Vytvořené hypotézy ke klasifikaci terénních tvarů mohou sloužit jako dobrý základ pro budoucí práce.

Literatura

- [1] *How Aspect works* [online]. Dostupné z: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-aspect-works.htm>.
- [2] *Curvature* [online]. Dostupné z: http://surferhelp.goldensoftware.com/gridops/Curvature.htm?tocpath=Gridding%7CGrid%20operations%7CGrid%20Calculus%7C_____5.
- [3] *Digitální model reliéfu České republiky 4. generace (DMR 4G)* [online]. Dostupné z: [https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(ilm3hsr4wxcyxjmrzuatebr\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR4G-V&head_tab=sekce-02-gp&menu=301](https://geoportal.cuzk.cz/(S(ilm3hsr4wxcyxjmrzuatebr))/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR4G-V&head_tab=sekce-02-gp&menu=301).
- [4] *Vektor* [online]. Dostupné z: <http://voho.eu/wiki/vektor>.
- [5] *How Curvature works* [online]. Dostupné z: <http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/00q90000000t000000>.
- [6] *How Slope works* [online]. Dostupné z: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-slope-works.htm>.
- [7] BOGUSZAK, F. – ŠLITR, J. *Topografie*, 1962.
- [8] CORRAL, M. *Tangent Plane to a Surface* [online]. 2021. Dostupné z: [https://math.libretexts.org/Bookshelves/Calculus/Book%3A_Vector_Calculus_\(Corral\)/02%3A_Functions_of_Several_Variables/2.03%3A_Tangent_Plane_to_a_Surface](https://math.libretexts.org/Bookshelves/Calculus/Book%3A_Vector_Calculus_(Corral)/02%3A_Functions_of_Several_Variables/2.03%3A_Tangent_Plane_to_a_Surface).
- [9] ŠIFFEL, P. *Terénní tvary. Presentace*, 2008. Dostupné z: <https://spszem.cz/storage/files/66/map2-si.pdf>.
- [10] MACMILLAN, R. A. – SHARY, P. *Chapter 9 Landforms and Landform Elements in Geomorphometry*, 2014.
- [11] MONHART, V. *Metody znázorňování výškopisu na mapách. Bakalářská práce, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, KMA*, 2006.
- [12] PEDRINI, H. – SCHWARTZ, W. R. *Topographic Feature Identification Based on Triangular Meshes*.
- [13] PILOYAN, A. – KONEČNÝ, M. *Semi-automated classification of landform elements in Armenia based on SRTM DEM using K-means unsupervised classification*, 2017.
- [14] STEPINSKI, T. F. – GHOSH, S. – VILALTA, R. *Automatic Recognition of Landforms on Mars Using Terrain Segmentation and Classification*, 2006.
- [15] VALENTINE, A. P. – KALNINS, L. M. – JEANNOT, T. *Discovery and analysis of topographic features using learning algorithms: A seamount case study. Geophysical research letters*. 2013, 40, s. 3048–3054.

- [16] VICHROVÁ, M. Topografické mapování. Dostupné z:
[http://old.gis.zcu.cz/projekty/Geomatika_multimedialne/TOMA/
Topograficka%20mapovani%20CR_T.pdf](http://old.gis.zcu.cz/projekty/Geomatika_multimedialne/TOMA/Topograficka%20mapovani%20CR_T.pdf).

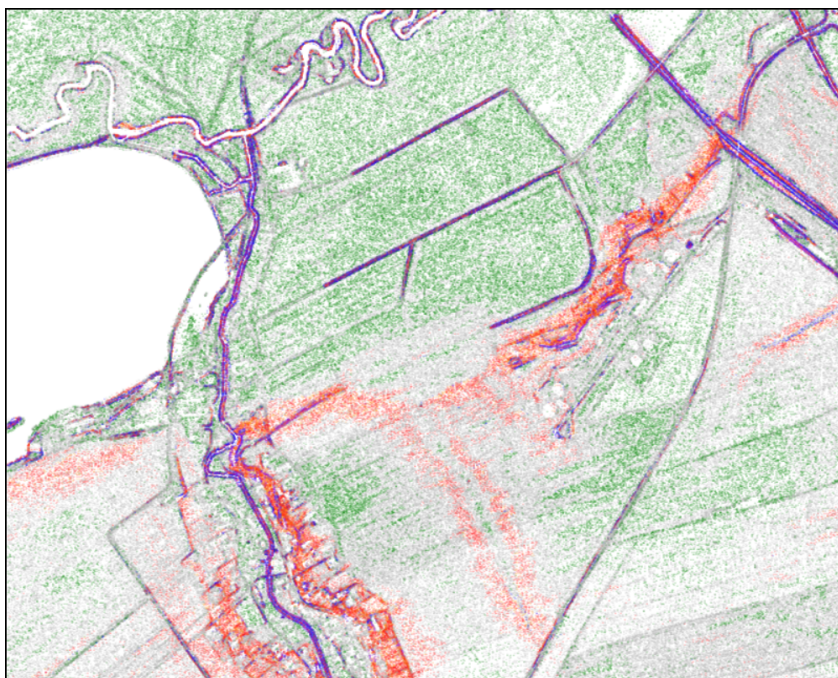
Příloha A - výsledky z dalších vstupních souborů



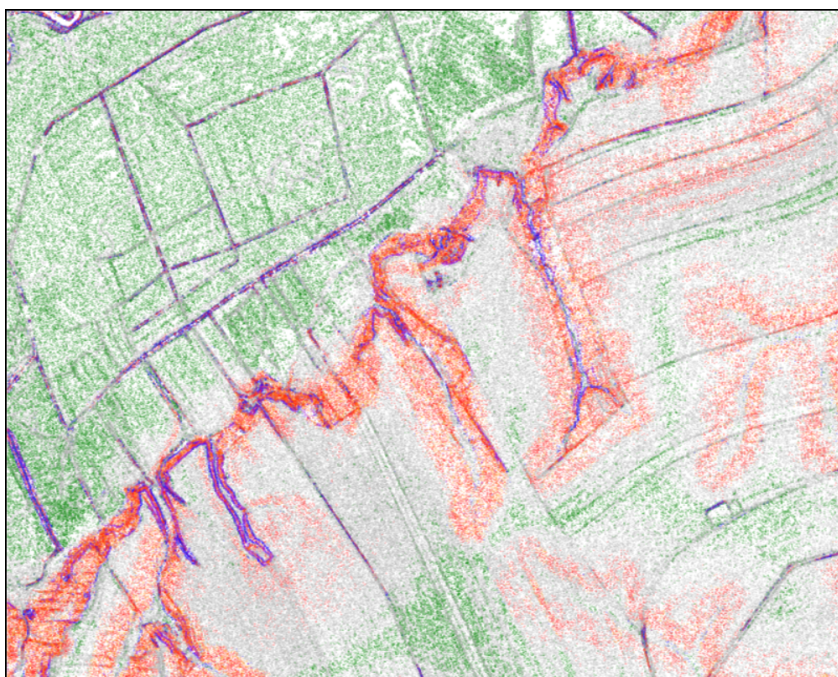
Obr. 7.1: Soubor 3 - obarvení bodů podle kategorií.



Obr. 7.2: Soubor 4 - obarvení bodů podle kategorií.



Obr. 7.3: Soubor 5 - obarvení bodů podle kategorií



Obr. 7.4: Soubor 6 - obarvení bodů podle kategorií.