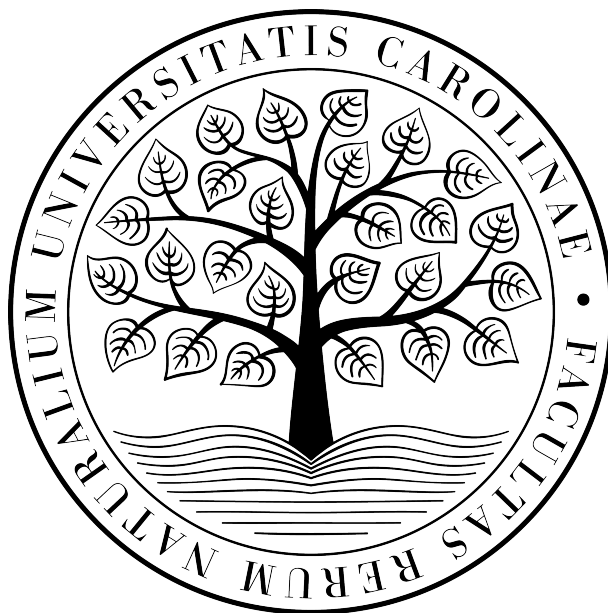


Přírodovědecká fakulta
Univerzita Karlova



Algoritmy počítačové kartografie
Úkol č. 3: Digitální model terénu

Vanda Hlaváčková a Petra Krsková

1.N-GKDPZ

Praha 2023

Zadání

Úloha č. 3: Digitální model terénu

Vstup: množina $P = \{p_1, \dots, p_n\}$, $p_i = \{x_i, y_i, z_i\}$.

Výstup: polyedrický DMT nad množinou P představovaný vrstevnicemi doplněný vizualizací sklonu trojúhelníků a jejich expozicí.

Metodou inkrementální konstrukce vytvořte nad množinou P vstupních bodů 2D Delaunay triangulaci. Jako vstupní data použijte existující geodetická data (alespoň 300 bodů) popř. navrhněte algoritmus pro generování syntetických vstupních dat představujících významné terénní tvary (kupa, údolí, spočinek, hřbet, ...).

Vstupní množiny bodů včetně níže uvedených výstupů vhodně vizualizujte. Grafické rozhraní realizujte s využitím frameworku QT. Dynamické datové struktury implementujte s využitím STL.

Nad takto vzniklou triangulací vygenerujte polyedrický digitální model terénu. Dále proveďte tyto analýzy:

- S využitím lineární interpolace vygenerujte vrstevnice se zadaným krokem a v zadaném intervalu, proveďte jejich vizualizaci s rozlišením zvýrazněných vrstevnic.
- Analyzujte sklon digitálního modelu terénu, jednotlivé trojúhelníky vizualizujte v závislosti na jejich sklonu.
- Analyzujte expozici digitálního modelu terénu, jednotlivé trojúhelníky vizualizujte v závislosti na jejich expozici ke světové straně.

Zhodnoťte výsledný digitální model terénu z kartografického hlediska, zamyslete se nad slabunami algoritmu založeného na 2D Delaunay triangulaci. Ve kterých situacích (různé terénní tvary) nebude dávat vhodné výsledky? Tyto situace graficky znázorněte.

Zhodnocení činnosti algoritmu včetně ukázek proveďte alespoň na 3 strany formátu A4.

Hodnocení:

Krok	hodnocení
Delaunay triangulace, polyederický model terénu.	10 b.
Konstrukce vrstevnic, analýza sklonu a expozice	10 b.
<i>Triangulace nekonvexní oblasti zadané polygonem.</i>	<i>+ 5 b.</i>
<i>Výber barevných stuníc při vizualizaci sklonu a expozice.</i>	<i>+ 3 b.</i>
<i>Automatický popis vrstevnic.</i>	<i>+ 3 b.</i>
<i>Automatický popis vrstevnic respektující kartografické zásady (orientace, vhodné rozložení).</i>	<i>+ 10 b.</i>
<i>Algoritmus pro automatické generování terénních tvarů (kupa, údolí, spočinek, hřbet, ...).</i>	<i>+ 10 b.</i>
<i>3D vizualizace terénu s využitím promítání.</i>	<i>+ 10 b.</i>
<i>Barevná hypsometrie.</i>	<i>+ 5 b.</i>

V rámci této úlohy nebyly vypracovány žádné bonusy.

1 Popis a rozbor problému

Digitální model terénu (*DMT*) je matematické zobrazení povrchu země, tedy včetně terénních rysů jako jsou kopce, údolí či jiné topografické prvky. Podkladová data jsou získávána pomocí LiDARu nebo fotogrammetrie. Velké množství získaných datových bodů je následně použito k tvorbě digitálního modelu terénu. Pro libovolný bod modelu je možné získat jeho nadmořskou výšku. Při kombinaci s například satelitními snímky nebo leteckými fotografiemi je pak možné výsledné modely a mapy zpřesnit. Modely se využívají pro vizualizaci a analýzu země ve 3D například pro identifikování potenciálního nebezpečí (půdní eroze, povodně), pro hledání příležitostí pro rozvoj (plánování stavby silnic a mostů, ochrana přírody) nebo jako podklad pro hydrologické modely.

Jednou z metod pro vytváření digitálních terénních modelů je TIN (*Triangular Irregular Network*). TIN modely jsou vytvářeny pomocí sítě trojúhelníků, které jsou vytvořeny na základě vstupní bodové vrstvy. Mimo výškovou informaci zachycují také údaj o sklonu terénu. Oproti jiným modelům využívající pravidelné sítě nebo vrstevnice počítá TIN výšku pro každý bod pomocí interpolace výšek okolních bodů, čímž je přesněji odhadnuta jeho výška. Rovněž je možné vytvářet trojúhelníky různých velikostí nebo jich sestavit více v oblastech s dynamičtějšími změnami. Model se tak lépe přizpůsobí nepravidelnému tvaru terénu.

1.1 Delaunay triangulace

Metodou pro vytváření trojúhelníků je mimo další i *Delaunay triangulace*. Ta vytváří trojúhelníky tak, aby se co nejvíce blížily rovnostranným, čímž minimalizuje případnou deformaci trojúhelníků - snaží se maximalizovat minimální vnitřní úhel. Vzniká tak pravidelnější síť. Princip metody pak spočívá v tom, že v kružnici opsané jakémukoliv trojúhelníku z Delaunay triangulace neleží žádný další bod ze zadané vstupní množiny.

Při tvorbě dochází k postupnému vkládání jednotlivých bodů do již vytvořené Delaunay triangulace. Nejprve je vybrán náhodný bod P_1 ze vstupní množiny. K němu je následně na základě Euklidovské vzdálenosti nalezen nejbližší bod P_2 . Vzniká tak hrana $e = (P_1, P_2)$. Dalším hledaným bodem je bod \underline{P} , který se nachází v levé polorovině vůči e a který zároveň minimalizuje poloměr kružnice opsané hraně e a tomuto bodu. Po nalezení nejvhodnějšího bodu \underline{P} splňující dané podmínky, vznikají nové hrany $e_2 = (\underline{P}, P_1)$ a $e_3 = (P_2, \underline{P})$, které tvoří první trojúhelník. Pokud by bod P_3 algoritmus nenalezl, otočí orientaci hrany e a vyhledávání bodu se opakuje (opět v její levé polorovině).

Vytvořené hrany jsou přidány do *Active Edge List* (*AEL*). Rovněž budou tvořit výslednou triangulaci. U první hrany dojde k otočení její orientace a je nalezen bod \underline{P} . Vzniknou tak další dvě nové hrany, které jsou, v případě, že se tam již s opačnou orientací nenachází, přidány do AEL. Pokud ano, z AEL je odstraněna a přidána do výsledné triangulace. Pokud by pro aktuální hranu nebyl nalezen bod, je hrana přidána do výsledné triangulace, jelikož je součástí konvexního obalu. Tento postup se opakuje do té doby, dokud není

Active Edge List prázdný.

Pseudokód Delaunay Triangulace

Algorithm 1 *Delaunay triangulation*

```

1: Inicializuj DT a AEL jako prázdné seznamy
2: Najdi bod  $P_1$  s nejmenší x-ovou souřadnicí
3: Najdi bod  $P_2$ , který bude Euklidovskou vzdáleností k  $P_1$  nejbližší
4: Z nalezených bodů  $P_1$  a  $P_2$  vytvoř hranu  $e$ 
5: Dokud není AEL prázdná
6:   Vezmi první hranu  $e_1$  a otoč její orientaci
7:   Najdi Delaunayovský bod  $\underline{P} = \arg \max_{p_i \in \sigma_L} < (P_1, P_i, P_2)$ 
8:   Pokud  $\underline{P}$  existuje
9:     Vytvoř zbývající strany trojúhelníku  $e_2 = (P_2, \underline{P})$  a  $e_3 = \underline{P}, P_1$ 
10:    Vzniklé hrany přidej do  $DT$ 
11:    Aktualizuj  $AEL$ :  $updateAEL(e_2, ael)$ ,  $updateAEL(e_3, ael)$ 

```

1.2 Konstrukce vrstevnic

Vrstevnice lze zkonstruovat pomocí lineární interpolace. Jedná se o metodu, která prokládá křivky lineárními funkcemi. V případě, že jsou zadány dva body x_a a y_a pomocí souřadnic, lineární interpolace je přímka mezi nimi. Z podobnosti trojúhelníků lze odvodit rovnici vzájemných vztahů.

$$\begin{aligned}
 x_a &= \frac{x_3 - x_1}{z_3 - z_1}(z - z_1) + x_1, & x_b &= \frac{x_2 - x_1}{z_2 - z_1}(z - z_1) + x_1, \\
 y_a &= \frac{y_3 - y_1}{z_3 - z_1}(z - z_1) + y_1, & y_b &= \frac{y_2 - y_1}{z_2 - z_1}(z - z_1) + y_1
 \end{aligned}$$

Tato metoda tedy hledá průsečnice roviny, které jsou určeny trojúhelníkem (z DT) a vodorovné roviny ρ o výšce h . Zda rovina ρ prochází hranou tvořenou zadanými body lze ověřit pomocí rovnice

$$(z - z_i)(z - z_{i+1}) < 0$$

1.3 Analýza sklonu terénu

Digitální modely terénu jsou hojně využívány díky jejich snadné dostupnosti jak zdrojových dat, tak softwarových nástrojů pro různé analýzy. Mezi morfologické charakteristiky povrchu pak patří orientace, normální a horizontální křivost nebo sklon.

Analýza sklonu terénu je prováděna nad každým trojúhelníkem z DMT. Pro zadanou rovinu ρ je vypočítán gradient $\nabla\rho$, tedy maximální vektor spádu, který má v daném bodě směr normály k vrstevnici a je orientován ve směru dané funkce p .

$$\nabla \rho(x_0, y_0, z_0) = \left(\frac{\partial p}{\partial x}(x_0), \frac{\partial p}{\partial y}(y_0), \frac{\partial p}{\partial z}(z_0) \right) = (a, b, c)$$

Rovina ρ je definována maticí

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & y - x_1 & z - x_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - x_1 & z_2 - x_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - x_1 & z_3 - x_1 \end{vmatrix} = 0$$

Následně pak z této matice může být vypočítána odchylka ϕ od roviny π

$$\phi = \arccos \left| \frac{n_1 n_2}{||n_1|| ||n_2||} \right|$$

Pseudokód výpočtu sklonu terénu

Algorithm 2 *Sklon terénu*

- 1: Vypočítej normálový vektor pro vstupní body P_1, P_2 a P_3
 - 2: Vypočítej jejich normu $n = \sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}$
 - 3: $\rho = \frac{n_z}{n}$
-

1.4 Analýza orientace terénu

Další charakteristikou, kterou lze analyzovat je orientace terénu. Je definována jako azimut průmětu gradientu $\nabla \rho$ roviny trojúhelníku do roviny x, y . Pro vektor gradientu v platí, že

$$v = \left(\frac{\partial p}{\partial x}(x_0), \frac{\partial p}{\partial y}(y_0) \right) = (a, b, 0)$$

Azimut vektoru v pak lze spočítat pomocí vzorce

$$A = \arctan \left(\frac{b}{a} \right)$$

Pseudokód výpočtu orientace terénu

Algorithm 3 *Orientace terénu*

- 1: Vypočítej normálové vektory pro P_1, P_2 a P_3
 - 2: $\text{aspect} = \arctan \frac{n_y}{n_x}$
 - 3: **Pokud** $\text{aspect} < 0$
 - 4: $\text{aspect} = \text{aspect} + 2\pi$
-

2 Aplikace

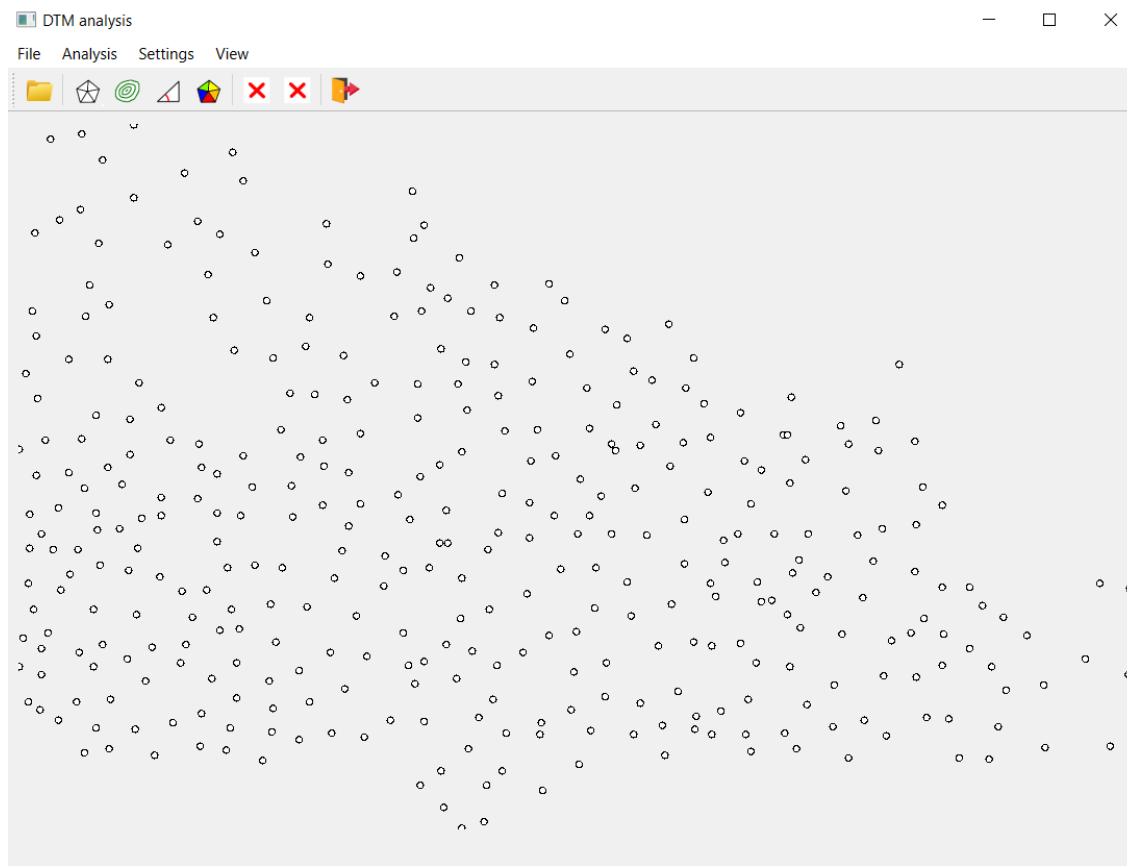
Aplikace pro tvorbu digitálního modelu terénu byla vytvořena v prostředí *Qt Creator*. Vstupní data jsou tvořena množinou bodů. Výstupem je pak polyedrický DMT, který je vytvořen nad vstupní množinou a je představován vrstevnicemi, které jsou doplněny vizualizací sklonu trojúhelníků a jejich expozicí.

Po spuštění aplikace přes soubor *mainform.py* je otevřeno okno, jehož většinu tvoří prázdná plocha pro vykreslení bodů. V horní části se pak nachází menu s jednotlivými funkcemi. V záložce *File* je možné pomocí funkce *Open* vyvolat dialogové okno a vybrat vstupní data ve formátu *.txt*, která jsou následně vykreslena (viz obr. 1). Možnost *Exit* pak slouží k zavření aplikace.

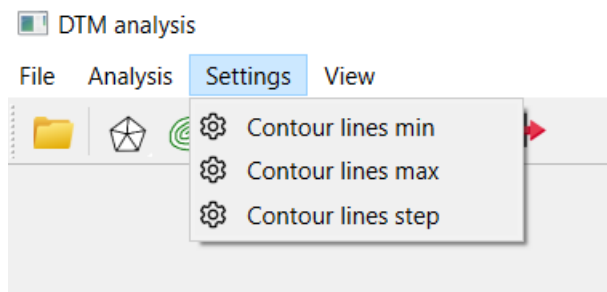
Nahrané body je možné analyzovat s využitím funkcí v záložce *Analysis*. Funkce *Generate DT* vytvoří z bodů trojúhelníky Delaunayho triangulace. Jejich vytvoření je nutné pro spuštění dalších analýz. Funkce *Create contour lines* vytváří vrstevnice, funkce *Analyse slope* vede k obarvení trojúhelníků na základě jejich sklonu a funkce *Analyse aspect* vede k přebarvení trojúhelníků dle jejich orientace vůči světovým stranám.

V záložce *Settings* je možné definovat parametry pro tvorbu vrstevnic, konkrétně minimální a maximální nadmořskou výšku a krok, se kterým mají být vytvořeny. Po kliknutí na vybraný parametr (obr. 2) se objeví vyskakovací okno, do kterého uživatel zadá požadovanou hodnotu a tlačítkem *OK* ji potvrdí (obr. 3). Poslední záložka menu *View* nabízí možnost vymazat všechny výsledky analýz a ponechat pouze nahrané vstupní body *Clear results* nebo vymazat výsledky včetně vykreslených bodů *Clear all*.

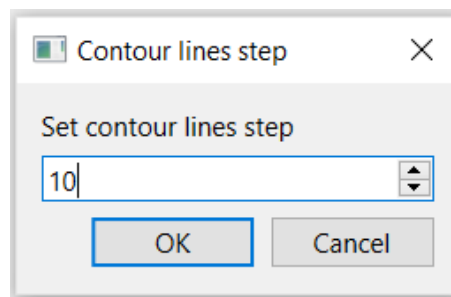
Popsané funkce je možné vyvolat i pomocí ikon umístěných pod záložkami menu, v pořadí zleva se jedná o funkce *Open file*, *Generate DT*, *Create contour lines*, *Analyse slope*, *Analyse aspect*, *Clear results*, *Clear all* a *Exit*. Ikony odpovídají jednotlivým funkcím v záložkách menu a po umístění kurzoru myši na ikonu je vypsán i název odpovídající funkce.



Obrázek 1: Ukázka aplikace s nahranou bodovou vrstvou



Obrázek 2: Nastavení parametrů pro tvorbu vrstevnic



Obrázek 3: Nastavení kroku vrstevnic

3 Dokumentace

Program byl vytvořen v prostředí PyCharm v programovacím jazyce Python s využitím *Qt Creator* a modulu *pyshp*, který umožňuje práci se shapefiley. Program se skládá ze souborů *mainform.py*, *Qpoint3DF.py*, *edge.py*, *triangle.py*, *draw.py* a *algorithms.py*, které obsahují názvům odpovídající třídy. Ve složce *icons* se pak nachází obrázkové soubory využité pro ikony jednotlivých funkcí.

3.1 Třída MainForm

Tato třída slouží pro konfiguraci uživatelského rozhraní aplikace a jeho propojení na metody definované v ostatních třídách. Třída obsahuje 22 metod.

V inicializační metodě dochází k inicializaci parametrů pro tvorbu vrstevnic. Metody *setupUi* a *retranslateUi* byly vytvořeny automaticky na základě vytvořeného prostředí v *Qt Creator*. V první z nich jsou jednotlivé položky menu a tlačítka napojeny na připravené metody.

Metoda *openFile* ukládá do proměnných *width* a *height* aktuální šířku a výšku okna pro vykreslování bodů. Následně volá metodu *loadData* třídy *Draw*, čímž dochází k načtení vstupních dat a jejich vykreslení.

Metoda *runDT* slouží k vytvoření Delaunayho triangulace a k jejímu vykreslení. Nejprve jsou pomocí metody *getPoints* třídy *Draw* načteny vykreslené body. Metodou *createDT* třídy *Algorithms* je z nich vytvořena Delaunayho triangulace, která je metodou *setDT* předána třídě *Draw*. Následně je vyvolána metoda pro překreslení okna, aby došlo k vykreslení vytvořené trojúhelníkové sítě.

Metoda *runContourLines* slouží k vytvoření vrstevnic a jejich vykreslení. Metodou *getDT* je ze třídy *Draw* načtena vytvořená Delaunayho triangulace. Na základě globálně nastavených parametrů jsou metodou *createContourLines* třídy *Algorithms* vytvořeny základní a zdůrazněné vrstevnice, které jsou metodou *setContours* předány třídě *Draw* a na závěr je vyvolána metoda pro překreslení okna.

Metoda *runSlope* slouží k analýze a vykreslení sklonu trojúhelníků. Metodou *getDT* je ze třídy *Draw* načtena vytvořená Delaunayho triangulace a metodou *analyzeDTMSlope* třídy *Algorithms* je vytvořena síť trojúhelníků s analyzovaným sklonem, která je metodou *setTriangles* předána třídě *Draw*. Na závěr je vyvolána metoda pro překreslení okna.

Metoda *runAspect* funguje na stejném principu jako předchozí metoda, ale analyzuje orientaci trojúhelníka vůči světovým stranám a využívá k tomu metodu *analyzeDTMAsspect* třídy *Algorithms*.

Metody *setContourMin*, *setContourMax* a *setContourStep* slouží k nastavení parametrů pro tvorbu vrstevnic. Pomocí dialogového okna uživatel zadá hodnotu pro minimální, respektive maximální nadmořskou výšku pro tvorbu vrstevnic nebo krok, se kterým mají být vytvořeny. Tyto informace pak metody ukládají do připravených proměnných.

Metody *clearAll* a *clearResults* slouží k vymazání bodů a všech výsledků, respektive k vymazání pouze výsledků, a využívají k tomu odpovídající metody třídy *Draw*.

3.2 Třída QPoint3DF

Tato třída slouží k definování datového typu bodu v prostoru, dědí od třídy *QPointF* a na vstupu má tři argumenty odpovídající třem souřadnicím bodu v datovém typu *float*. V inicializační metodě dochází k předání a inicializaci všech tří souřadnic a metoda *getZ* navrácí z-ovou souřadnici bodu.

3.3 Třída Edge

Tato třída slouží k definici datového typu pro hranu trojúhelníka a na vstupu má argumenty pro počáteční a koncový bod hrany, oba typu *QPoint3DF*. V inicializační metodě dochází k nastavení počátečního a koncového bodu hrany, které jsou vráceny pomocí příslušných metod *getStart* a *getEnd*.

Metoda *switchOrientation* vrací nově vytvořenou hranu s prohozeným počátečním a koncovým bodem vstupní hrany. Dále je definován operátor pro porovnání, zda jsou dvě zadané hrany stejné, tedy jestli si odpovídají jejich počáteční a koncové body.

3.4 Třída Triangle

Tato třída slouží k definování datového typu pro trojúhelník a na vstupu má tři argumenty odpovídající bodům tvořící vrcholy trojúhelníka typu *QPoint3DF*, dále sklon a orientaci trojúhelníka, oba datového typu *float*. V první metodě dochází k inicializaci předávaných vstupních argumentů a k vytvoření trojúhelníka. Jeho jednotlivé vrcholy, sklon a orientace jsou vráceny příslušnými metodami *getP1*, *getP2*, *getP3*, *getSlope* a *getAspect*.

3.5 Třída Algorithms

Tato třída v sobě implementuje algoritmy pro analýzu digitálního modelu terénu. Metoda *get2LinesAngle* má na vstupu čtyři body typu *QPoint3DF* tvořící dvě linie, mezi kterými počítá úhel. Nejprve dochází k výpočtu vektorů, jejich skalárního součinu a norem obou vektorů. Následně je spočítán argument pro funkci *cosinus*, který je zaokrouhlen na hodnotu 1 nebo -1, pokud je větší, respektive menší. Metoda pak vrací vypočítaný úhel.

Metoda *getPointLinePosition* slouží k určení polohy bodu vůči přímce a na vstupu má analyzovaný bod a dva body definující přímku, všechny typu *QPoint3DF*. Nejprve dochází k výpočtu vektorů a následně determinantu matice tvořené těmito vektory. Pokud je determinant kladný, bod leží v levé polorovině od přímky a metoda vrátí hodnotu 1. V případě záporného determinantu bod leží v pravé polorovině a dochází k návratu hodnoty 0. Pokud bod leží na přímce, vyjde nulový determinant a metoda pak vrací hodnotu -1.

Metoda *getDelaunayPoint* má na vstupu dva body typu *QPoint3DF* a seznam všech bodů, také typu *QPoint3DF*. Metoda prochází všechny body a vrací index bodu, který se dvěma vstupními body svírá největší úhel a splňuje tak podmínku Delaunayho triangulace pro maximalizaci minimálního úhlu. Metoda *getNearestPoint* má na vstupu body typu *QPoint3DF* a seznam všech bodů, také typu *QPoint3DF*, a vrací bod ze seznamu, který je nejbližší vstupnímu bodu.

Metoda *updateAEL* má na vstupu hranu typu *Edge* a seznam *AEL* tvořený hranami typu *Edge*. V metodě dochází na základě porovnání s opačně orientovanou hranou k aktualizaci seznamu dostupných hran *AEL* tak, aby obsahoval pouze hrany, které mohou dále vstupovat do Delaunayho triangulace.

Metoda *createDT* má na vstupu seznam bodů typu *QPoint3DF* a na základě teorie popsané v kapitole 1.1 vytváří Delaunayho triangulaci definovanou seznamem hran typu *Edge*. Metoda *getContourLinePoint* má na vstupu dva body typu *QPoint3DF*, výšku roviny typu *float* a na základě teorie pro výpočet průsečíku rovin popsanou v kapitole 1.2 vrací bod typu *QPoint3DF* představující průsečík mezi hranou trojúhelníku a zadanou rovinou tvořící základ pro tvorbu vrstevnic.

Metoda *createContourLine* má na vstupu seznam hran typu *Edge* tvořící Delaunayho triangulaci, minimální a maximální nadmořskou výšku pro tvorbu vrstevnic a krok vrstevnic, všechny typu *float*. Metoda postupně prochází všechny trojúhelníky a pro ně všechny nadmořské výšky definované vstupními parametry a na základě teorie pro výpočet průsečnice popsané v kapitole 1.2 rovin vytváří hrany typu *Edge* tvořící vrstevnice, které ukládá do seznamu a ten na závěr vrací. Při vytváření hran je zároveň kontrolováno, zda neodpovídá zdůrazněné vrstevnici a pokud ano, je přidána i do příslušného seznamu, který metoda také vrací.

Metoda *getNormVector* má na vstupu tři body typu *QPoint3DF* a počítá a vrací složky normálního vektoru trojúhelníka.

Metoda *getSlope* má na vstupu tři body typu *QPoint3DF* a na základě teorie popsané v kapitole 1.3 vrací hodnotu sklonu trojúhelníku.

Metoda *getAspect* má na vstupu tři body typu *QPoint3DF* a na základě teorie popsané v kapitole 1.4 vrací hodnotu expozice trojúhelníku.

Metoda *analyzeDTMSlope* má na vstupu seznam hran typu *Edge* tvořící Delaunayho triangulaci. Metoda postupně prochází všechny trojúhelníky, definuje body tvořící jejich vrcholy, pomocí připravené metody počítá sklon trojúhelníka, za jeho expozici ukládá hodnotu -1 a na základě těchto parametrů vytváří trojúhelníky datového typu *Triangle*, které ukládá do vytvořeného seznamu, který na závěr vrací.

Metoda *analyzeDTMAspect* funguje na stejném principu jako předchozí metoda, ale počítá orientaci trojúhelníka a za jeho sklon ukládá hodnotu -1.

3.6 Třída Draw

Tato třída zajišťuje grafické rozhraní aplikace a obsahuje 10 metod.

V inicializační metodě jsou definovány proměnné pro ukládání bodů, Delaunayho triangulace, základních a zdůrazněných vrstevnic a trojúhelníků.

Metoda *loadData* slouží k načtení vstupních dat a vykreslení bodů. Na vstupu má argumenty *width* a *height*, které odpovídají aktuální šířce a výšce okna pro vykreslení polygonů. Nejprve dochází k vyvolání dialogového okna, ze kterého je získána cesta k souboru se vstupními daty. Pokud je okno zavřeno bez vybrání souboru, metoda vrací prázdný seznam bodů. Následně jsou inicializovány seznamy pro ukládání souřadnic bodů.

Dále je po řádcích procházen celý soubor a do připravených seznamů jsou ukládány jednotlivé souřadnice. Z nich jsou následně získány minimální a maximální hodnoty. Dále jsou procházeny všechny body a jejich x-ové a y-ové souřadnice jsou na základě rozměrů okna a extrémních souřadnic upraveny tak, aby mohly být vykresleny v okně. Na závěr je z přepočítaných souřadnic vytvořen bod a ten přidán do příslušného seznamu.

Metoda *getAspectColor* má na vstupu úhel odpovídající orientaci trojúhelníka na základě jeho příslušnosti do intervalu definujícího světovou stranu je metodou vrácena odpovídající barva.

Metoda *paintEvent* má na vstupu argument *QPaintEvent*. Tato metoda slouží k vykreslení bodů a výsledků analýz. Pomocí *for* cyklu jsou procházeny a vykresleny všechny body. Dále jsou procházeny všechny trojúhelníky a na základě hodnot sklonu nebo expozice je příslušná analýza vykreslena. Dále jsou pomocí *for* cyklu procházeny a vykresleny všechny trojúhelníky Delaunayho triangulace a základní a zdůrazněné vrstevnice.

Metoda *setDT* má na vstupu seznam hran typu *Edge* tvořící Delaunayho triangulaci, který přiřazuje do odpovídající proměnné třídy *Draw*.

Metoda *setContours* má na vstupu dva seznamy hran typu *Edge* představující základní a zdůrazněné vrstevnice, které přiřazuje do odpovídajících proměnných třídy *Draw*.

Metoda *setTriangles* má na vstupu seznam trojúhelníků typu *Triangles*, který přiřazuje do odpovídající proměnné třídy *Draw*.

Metoda *getPoints* vrací seznam vykreslených bodů.

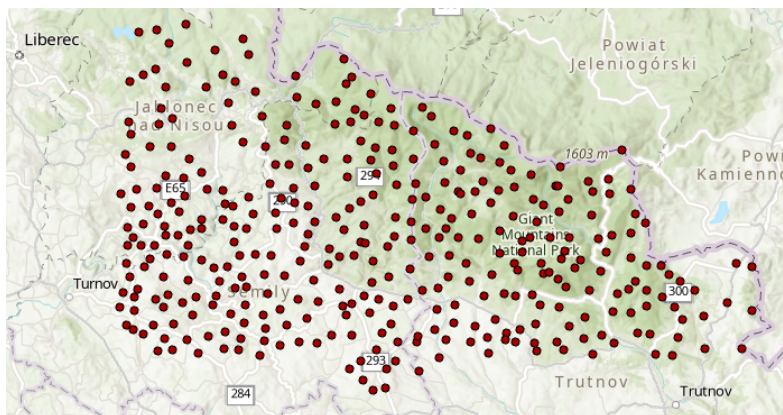
Metoda *getDT* vrací seznam hran typu *Edge* tvořící Delaunayho triangulaci.

Metoda *clearAll* slouží k vymazání všech bodů a výsledků. Všechny odpovídající proměnné jsou tak nastaveny na prázdné seznamy a dochází k vyvolání metody na překreslení okna.

Metoda *clearResults* slouží k vymazání výsledků analýz, ale k zachování bodů. Stejně jako v předchozím případě všem proměnným kromě načtených bodů přiřazuje prázdné seznamy a poté dochází k vyvolání metody na překreslení okna.

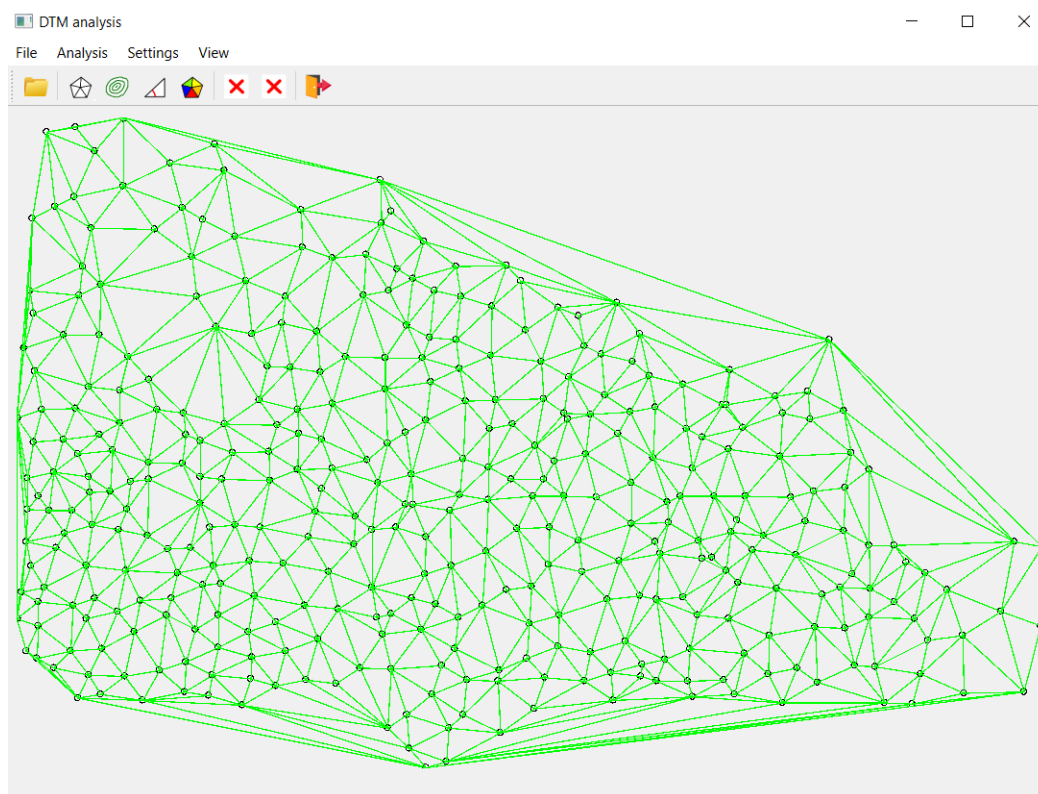
4 Výsledky

Pro otestování aplikace byla zvolena množina 366 bodů z oblasti Krkonoš (obr. 4) tvořena bodovým polem převzatým z dat ČÚZK (2023).



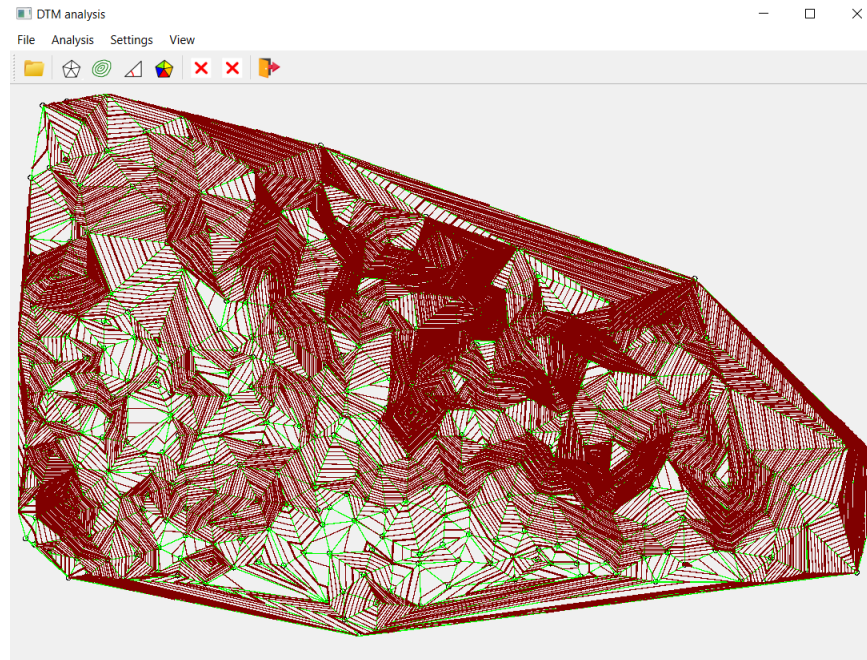
Obrázek 4: Přehled rozmístění vstupních bodových dat na podkladové mapě

Prvním krokem pro tvorbu DMT a jeho analýz je vytvoření 2D Delaunayho triangulace. Její výsledek pro vstupní množinu bodů je na obrázku 5.

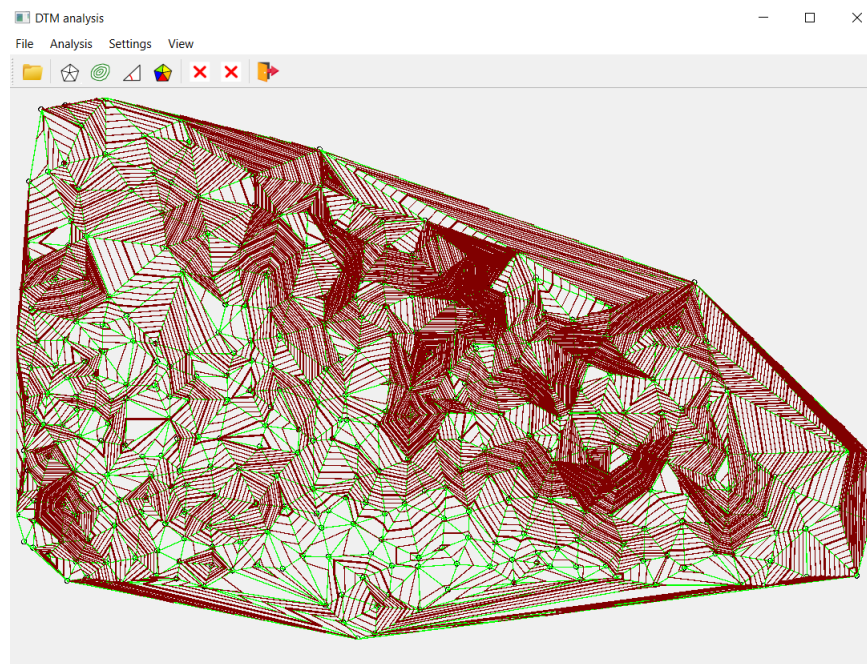


Obrázek 5: Výsledek Delaunayho triangulace pro vstupní body

Výsledek vrstevnic vytvořených s defaultním nastavením parametrů na rozsah nadmořských výšek 0 až 2000 m a s krokem 10 m je na obrázku 6. Pro zvolenou bodovou vrstvu se ukázal tento krok jako nevhodný a výsledné vrstevnice jsou možná až příliš podrobné a v některých místech splývají do sebe. Vrstevnice s krokem 15 m na obrázku 7 jsou již přehlednější a dávají lepší přehled o průběhu terénu.

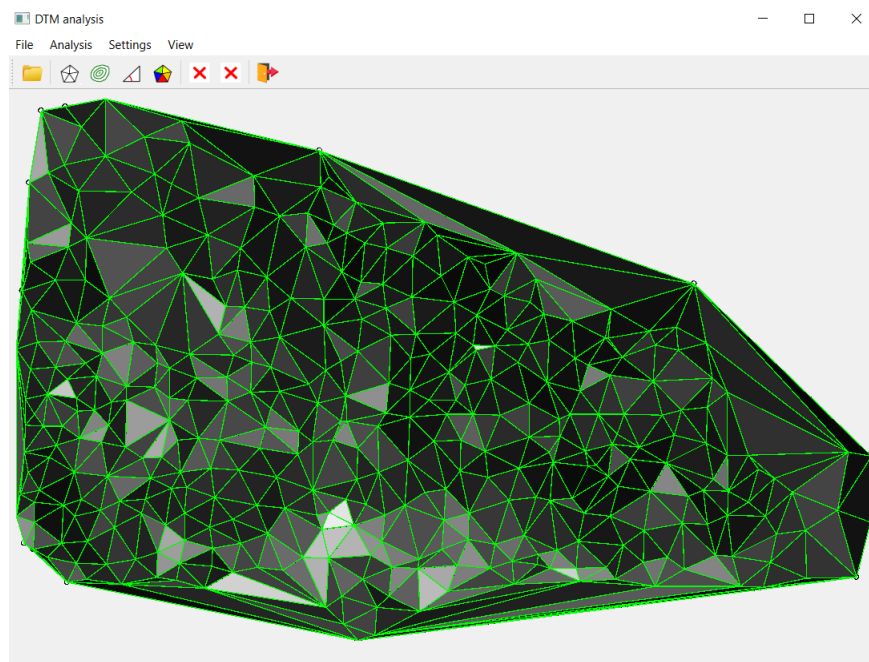


Obrázek 6: Vrstevnice vytvořené s krokem 10 m



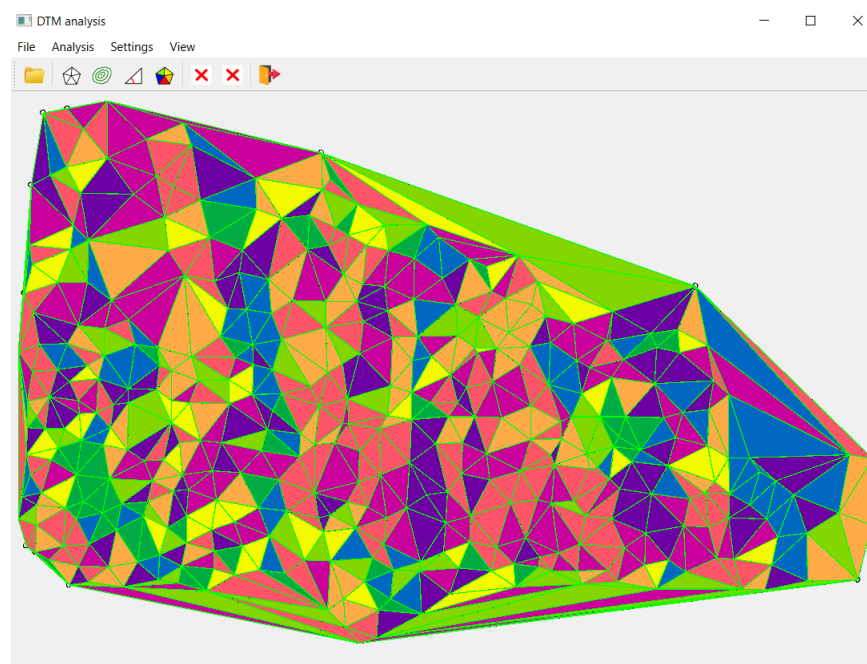
Obrázek 7: Vrstevnice vytvořené s krokem 105 m

Další analyzovanou vlastností vytvořeného DMT je sklon jednotlivých trojúhelníků, který aplikace vizualizuje pomocí odstínů šedi. Výsledky pro vstupní množinu bodů jsou na obrázku 8.

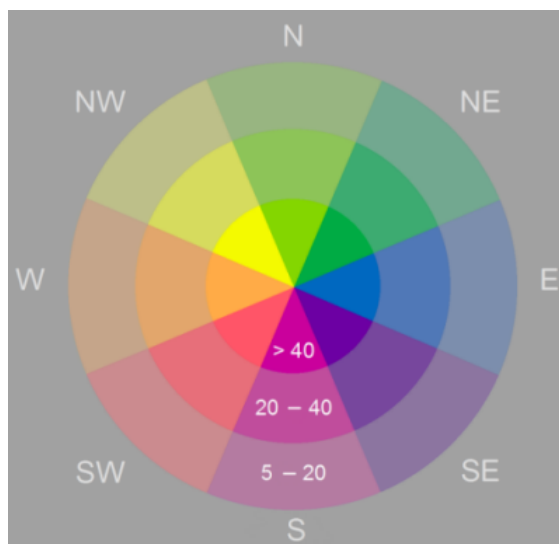


Obrázek 8: Analýza sklonu DMT

Poslední analýzou, kterou aplikace umožňuje, je orientace vůči světovým stranám (viz obr. 9), které vizualizuje pomocí definované barevné stupnice, která odpovídá barvám používaným v ArcGIS Pro (obr. 10).

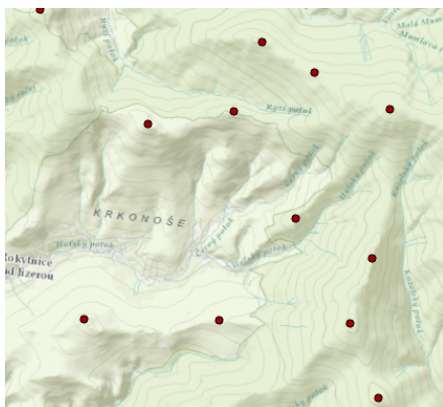


Obrázek 9: Analýza orientace DMT

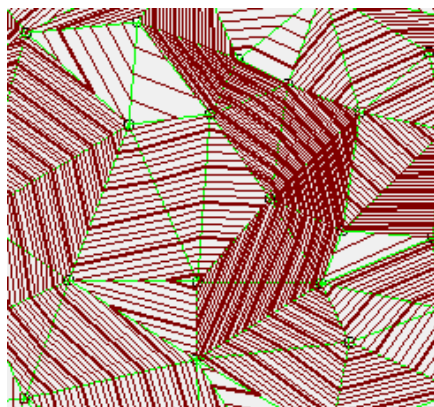


Obrázek 10: Barevná stupnice využitá pro vizualizaci orientace (zdroj: ESRI 2023)

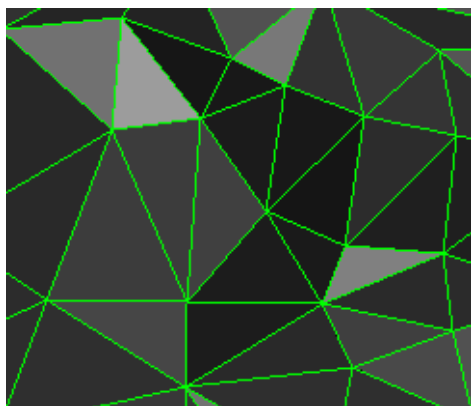
Funkčnost aplikace byla otestována na vybraných terénních tvarech. Prvním z nich bylo údolí, pro které platí, že se od středové oblasti ke krajům nadmořské výšky zvyšují. V nahraných datech chybějí body přímo v údolí, ale v jedné části byla nalezena tato oblast připomínající k východu lehce otevřené údolí a její zobrazení v mapě a výsledky analýz jsou na obrázcích 11 až 14. Pro správné vykreslení vrstevnic by bylo dobré mít další body v nejnižších částech údolí, ale i tak je z vrstevnic patrné uzavření údolí z pravé strany a pokles nadmořských výšek z jihu. Výsledek analýzy sklonu terénu dobře odpovídá jeho průběhu patrnému z vrstevnic a i orientace odpovídá tomu, že jednotlivá úbočí údolí směřují k sobě.



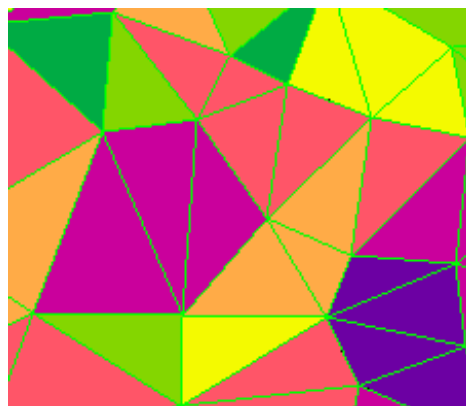
Obrázek 11: Zvolené údolí v mapě



Obrázek 12: Vrstevnice v údolí s krokem 10 m

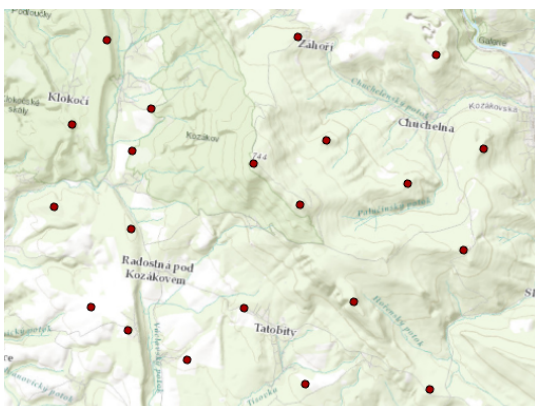


Obrázek 13: Sklon v oblasti údolí

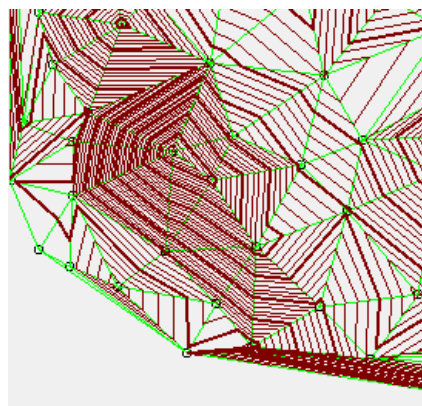


Obrázek 14: Orientace v oblasti údolí

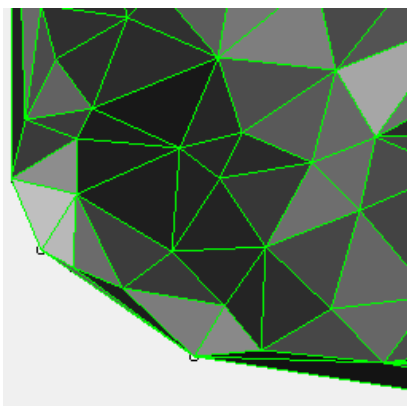
Dalším analyzovaným tvarem terénu je hřbet, pro který naopak platí, že se od středové části nadmořské výšky snižují. Přehled zvoleného hřbetu a výsledky analýz jsou na obrázcích 15 až 18. Průběh hřbetu je z vykreslených vrstevnic dobře patrný a tomuto průběhu odpovídá i výsledek analýzy sklonu. Výsledek orientace také nasvědčuje tomu, že jsou jednotlivé plochy orientovány směrem od sebe, což odpovídá hřbetu.



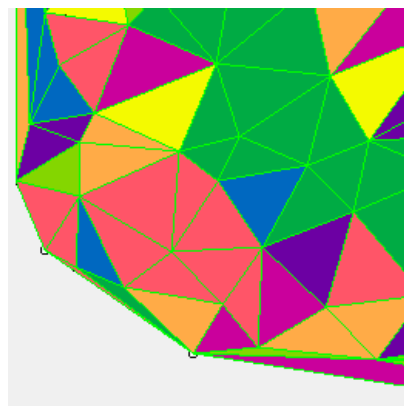
Obrázek 15: Zvolený hřbet v mapě



Obrázek 16: Vrstevnice na hřbetu s krokem 10 m

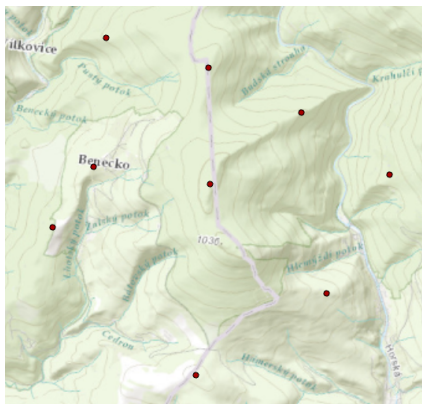


Obrázek 17: Sklon v oblasti hřbetu

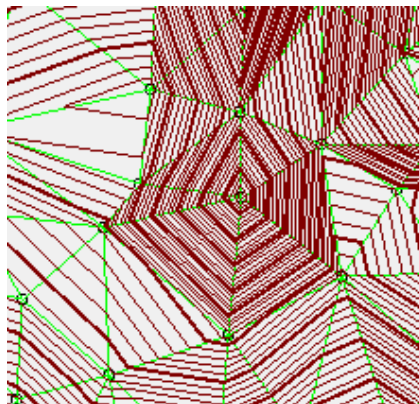


Obrázek 18: Orientace v oblasti hřbetu

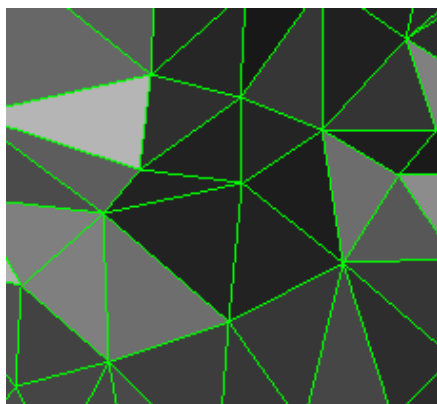
Posledním analyzovaným tvarem je samostatný vrchol, jehož přehled v mapě a výsledky analýzy jsou opět na obrázcích 19 až 22. Z vrstevnic je vrchol a průběh terénu v jeho okolí opět dobře patrný a odpovídá mu i výsledek analýzy sklonu. Vrchol je dobře patrný i ve výsledku analýzy orientace, jelikož je společným vrcholem šesti trojúhelníků, z nichž má každý jinou orientaci a chybí zde pouze plocha orientovaná přímo na sever a přímo na jih.



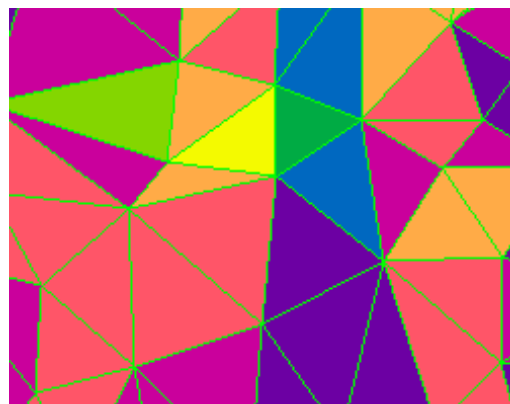
Obrázek 19: Zvolený vrchol v mapě



Obrázek 20: Vrstevnice na vrcholu s krokem 10 m



Obrázek 21: Sklon v oblasti vrcholu



Obrázek 22: Orientace v oblasti vrcholu

Aplikace nedává dobré výsledky triangulace v okrajových oblastech, kde jsou velké vzdálenosti mezi body a dochází zde tak ke vzniku protáhlých úzkých trojúhelníků. Tento problém by mohlo řešit umělé vkládání bodů do těchto okrajových oblastí, které by zajistily vznik přibližně rovnostranných trojúhelníků a díky tomu lepšího výsledku triangulace.

5 Závěr

Vytvořená aplikace vytváří digitální model nad vstupní množinou dat pomocí Delaunay triangulace. Rovněž je možné nad vytvořeným modelem provádět analýzy jako je sklon a orientace terénu nebo vytvořit vrstevnice lineární metodou.

Pro vykreslení vrstevnic a analýzu sklonu a orientace trojúhelníků je nutné nejdříve vytvořit Delaunayho triangulaci. Pokud není načtena a uživatel klikne na některou z analýz, nic se nestane, možným vylepšením aplikace by tak mohlo být zakomponování tvorby DT do jednotlivých analýz, pokud ještě nebyla vytvořena. Zajímavým rozšířením aplikace by také mohla být současná vizualizace sklonu i orientace terénu dle Buckley (2008), kdy orientaci vyjadřuje odstín použité barvy a sklon její sytost. Mimo výše uvedené by možným rozšířením programu mohlo být splnění bonusových úloh, jako je třeba 3D vizualizace terénu s promítáním. Trojrozměrný prostor by umožňoval snazší orientaci v hodně členitém terénu.

6 Zdroje

přednášky z předmětu *Algoritmy počítačové kartografie*, dostupné z: <http://web.natur.cuni.cz/bayertom/index.php/teaching/algoritmy-pocitacove-kartografie>

BRŮHA, L. (2016): Analýzy digitálních modelů terénu, <https://www.natur.cuni.cz/geografie/geoinformatika-kartografie/ke-stazeni/projekty/moderni-geoinformacni-metody-ve-vyuce-gis-kartografie-a-dpz/analyzy-digitalnich-modelu-terenu/> (25. 4. 2023).

BUCKLEY, A. (2008): Aspect-slope map, ArcGIS Blog, <https://www.esri.com/arcgis-blog/products/product/mapping/aspect-slope-map/> (24. 4. 2023).

ČÚZK (2023): Stahovací služba WFS - Bodová pole, Český úřad zeměměřický a katastrální, [https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(c1uays3zmw2yuzhthstlhr0w\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&side=wfs&metadataID=CZ-CUZK-WFS-BODOVAPOLE-P&metadataXSL=metadata.sluzba&head_ab=sekce-03-gp&menu=3334&fbclid=IwAKcCw](https://geoportal.cuzk.cz/(S(c1uays3zmw2yuzhthstlhr0w))/Default.aspx?mode=TextMeta&side=wfs&metadataID=CZ-CUZK-WFS-BODOVAPOLE-P&metadataXSL=metadata.sluzba&head_ab=sekce-03-gp&menu=3334&fbclid=IwAKcCw) (25.4.2023).

ESRI (2023): Aspect-Slope function, ArcGIS Pro, <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/analysis/raster-functions/aspect-slope-function.htm> (24. 4. 2023).