

UNIVERZITA KARLOVA
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA



ALGORITMY POČÍTAČOVÉ KARTOGRAFIE

Digitální modely terénu

Daniela DANČEJOVÁ,
Anna KOŽÍŠKOVÁ,
Praha 2023

Zadání

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 reálujte 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 zadáným 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 slabinami 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, polyedrický model terénu.	10b
Konstrukce vrstevnic, analýza sklonu a expozice.	10b
Triangulace nekonvexní oblasti zadáné polygonem	+5b
Výběr barevných stupnic při vizualizaci sklonu a expozice.	+3b
Automatický popis vrstevnic.	+3b
Automatický popis vrstevnic respektující kartografické zásady (orientace, vhodné rozložení).	+10b
Algoritmus pro automatické generování terénních tvarů (kupa, údolí, spočinek, hřbet, ...).	+10b
3D vizualizace terénu s využitím promítání.	+10b
Barevná hypsometrie	+5b
Max celkem:	65b

Popis a rozbor problému

Realistické zobrazení zemského povrchu představuje vzhledem ke svému nepravidelnému tvaru poměrně komplikovaný proces. Modelovat a popsat takový 3D model je obtížné i vzhledem ke kartografickým zásadám a estetickým požadavkům, případně i k požadavku matematicky snadného definování. V současné době je snaha vytvářet za použití výpočetní techniky tzv. *digitální modely terénu* (dále jen DMT), které kromě reprezentace terénu ve 3D prostoru zahrnují řadu dalších kartografických technik, pomocí kterých je možné vyjádřit jeho charakter (Bayer 2008). Jedná se především o izočáry, stínování terénu, znázorňování sklonů, hypsometrie apod.

Obecně se v souvislosti s digitálním modelem terénu rozlišují dva základní pojmy, a to **DMT** a **DMP**. DMT je digitální reprezentace zemského povrchu bez zásahu lidské činnosti (tzn. bez budov), ale i přírodní sféry. V literatuře se také zmiňuje pojmem **DMR** (digitální model reliéfu), jehož význam je totožný jako pro pojem DMR. DMP (digitální model povrchu) reprezentuje zemský povrch včetně střech budov, korun stromů a dalších umělých i přírodních objektů na zemském povrchu. Dále se může v literatuře vyskytnout termín **DVM**, což je zkratka pro digitální výškový model, který pracuje výhradně s nadmořskými výškami bodů. Jak poznamenává Brůha (2016), v zahraniční literatuře se vyskytuje pro označení digitálních modelů terénu termín **DEM**, který může vyjadřovat jak digitální výškový model, tak i digitální model povrchu nebo i reliéfu.

Digitální reprezentace terénu nachází uplatnění při plánování výstavby a infrastruktury, ale například i k výpočtu **sklonu** (anglicky *slope*) a **orientaci svahu** (anglicky *aspect*), což je užitečné pro vyhodnocení hrozby přírodních rizik, jako jsou sesuvy půdy, eroze, či pády laviny. Dále se využívá v geovědních oborech pro operaci s obrazovými daty, ve vojenství, lesnictví, počítačové grafice a mnoha dalších výzkumných i komerčních sférách.

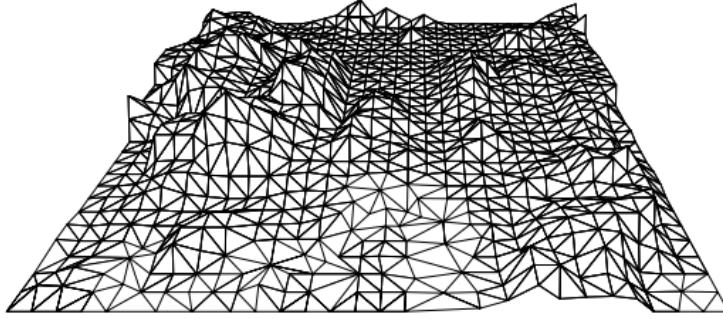
V praxi jsou nejčastěji používány 3 typy DMT:

- trojúhelníkový model terénu (polyedrický model),
- rastrový model terénu,
- plátový model terénu.

Cílem této úlohy je vytvořit model trojúhelníkový pomocí 2D *Delaunay triangulace*, a následně na něm provést analýzu výškopisu, sklonu a expozice.

Konstrukce DMT

Trojúhelníkový model terénu je založen na reprezentaci sítí trojúhelníkových ploch (obr. 1). Síť trojúhelníků (označovaná jako **TIN – triangulated irregular network**) je vytvořena za použití triangulačního algoritmu, který prokládá trojicí vrcholů rovinu v \mathbb{R}^3 , čímž vzniká nepravidelný mnohostěn přimykající se k terénu (Brůha 2016). V rámci trojúhelníku je pak prováděna lineární, nebo jiné typy interpolací pro další analýzy.



Obrázek 1: Ukážka trojúhelníkového modelu terénu (převzato z de Berg a kol. (2008, s. 191)).

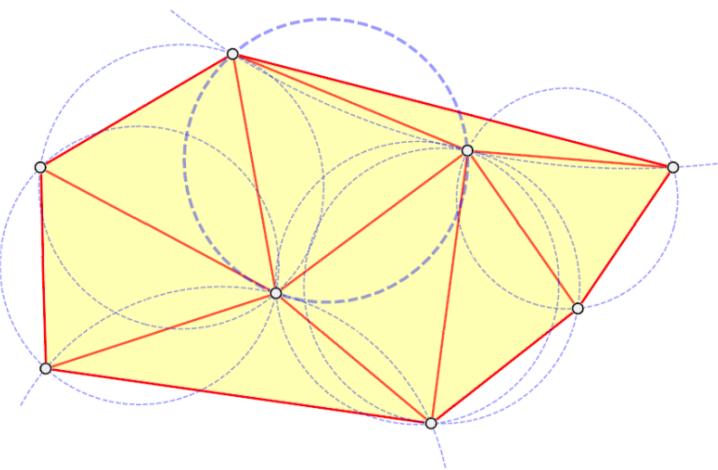
Vhodný triangulační algoritmus musí splňovat několik kritérií. Zásadní kritérium pro DMT je tvar trojúhelníků v TIN, které by se měli co nejvíce podobat rovnostranným trojúhelníkům tak, aby se výsledná síť co nejvíce přimykala k terénu. Tohoto požadavku lze dosáhnout maximalizací minimálního úhlu v trojúhelnících (koncept využívaný právě v Delaunayho triangulaci, Bayer 2023). Další kritéria můžou představovat např. schopnost triangulovat nekonvexní oblasti, oblasti obsahující díry, nebo schopnost vkládat povinné hrany trojúhelníků, čímž se ovlivní tvar terénu.

Delaunayho triangulace

Delaunayho triangulace (dále jen \mathcal{DT}) je jedna z nejčastěji používaných triangulací, v oblasti GIS představuje standard. Lze ji tvořit jak ve 2D, tak ve 3D prostoru. Má následující vlastnosti:

- Uvnitř kružnice opsané libovolnému trojúhelníku t v \mathcal{DT} neleží žádný jiný bod množiny P .
- \mathcal{DT} maximalizuje minimální úhel v $\forall t$, avšak \mathcal{DT} neminimalizuje maximální úhel v t .
- \mathcal{DT} je lokálně optimální i globálně optimální vůči kritériu minimálního úhlu.
- \mathcal{DT} je jednoznačná, pokud žádné čtyři body neleží na kružnici.

Výsledné trojúhelníky \mathcal{DT} se pak vizuálně podobají rovnostranným trojúhelníkům (obr. 2).



Obrázek 2: Ukázka \mathcal{DT} (převzato z Bayer 2023).

Metod přímé konstrukce \mathcal{DT} existuje několik, pro jednoduchost bude v této úloze implementována varianta inkrementální konstrukce s časovou složitostí $O(n^3)$. Tato metoda je založena na postupném přidávání bodů do již vytvořené \mathcal{DT} .

Je daná množina P tvořená body $\{p_1, \dots, p_n\}$, kde každý bod $p_i = \{x_i, y_i, z_i\}$. Algoritmus prochází každý bod $p_i \in P$ a hledá k němu nejbližší bod takový, jehož euklidovská vzdálenost k němu je nejmenší. Nalezne-li se tento bod, vznikne první (orientovaná) Delaunayovská hrana e ve vznikajícím trojúhelníku, která je tvořená body (p_1, p_2) . K hraně e se následně bude hledat třetí bod \bar{p} do trojúhelníku, který:

- leží v levé polovině od orientované hrany e ,
- maximalizuje vnitřní úhel $\angle(p_1, p, p_2)$:

$$\bar{p} = \arg \max_{\forall p_i \in \sigma L(e)} \angle(p_1, p, p_2),$$

kde $p_i \in \sigma_l(e)$. Pokud takový bod \bar{p} neexistuje, změní se orientace hrany e a hledání bodu \bar{p} se opakuje stejným způsobem.

Do \mathcal{DT} je přidán seznam hran trojúhelníku $\Delta(p_1, p_2, \bar{p})$:

$$e_1 = (p_2, \bar{p}), \quad e_2 = (\bar{p}, p_1),$$

pokud splní podmínu, že opačně orientované hrany

$$e'_1 = (\bar{p}, p_2), \quad e'_2 = (p_1, \bar{p}),$$

nejsou v AEL (Active Edges List) – v aktivním seznamu hran. Tato datová struktura obsahuje hrany e takové, ke kterým se hledají body \bar{p} . Pokud se tento seznam vyprázdní, \mathcal{DT} je vytvořena.

Algorithm 1: Pseudokód inkrementální konstrukce \mathcal{DT}

```

Inicializuj  $AEL = []$ ,  $\mathcal{DT} = []$ 
Zvol bod  $p_1 \in P$  s minimální x-ovou souřadnicí
Najdi bod  $p_2$ , který má k  $p_1$  nejmenší vzdálenost
Vytvoř hrany  $e = [p_1, p_2], e' = [p_2, p_1]$ 
 $AEL \leftarrow e, AEL \leftarrow e'$ 
while  $AEL$  není prázdný do
    Vezmi první hranu  $e$  z  $AEL$ 
    Prohod' její orientaci
    Najdi k této hraně Delaunayovský bod  $\underline{p}$ 
    if  $\exists \bar{p}$  then
        Vytvoř zbývající hranu trojúhelníku  $e_1 = (p_2, \bar{p}), e_2 = (\bar{p}, p_1)$ 
         $\mathcal{DT} \leftarrow e'_1, \mathcal{DT} \leftarrow e_2, \mathcal{DT} \leftarrow e_3$ 
        Aktualizuj  $AEL$  podle hran  $e_2, e_3$ 
    end if
end while
vrat  $\mathcal{DT}$ 

```

Konstrukce vrstevnic

Vrstevnice modelu byly vytvořeny lineární interpolací. Tato metoda je založená na analytické geometrii: hledá se průsečnice roviny \mathcal{T} určené trojúhelníkem $t \in \mathcal{DT}$ a vodorovné roviny s výškou h , co se opakuje pro každý trojúhelník. Na základě podobnosti trojúhelníků můžeme nalézt souřadnice bodů A, B průsečnice podle vztahů:

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

Ve vlastní implementaci je také ověřeno, zda rovina ρ protíná hranu (p_i, p_{i+1}) trojúhelníku pomocí vztahu:

$$\Delta z_i \Delta z_{i+1} < 0,$$

kde $\Delta z_i = z_i - z$, $\Delta z_{i+1} = z_{i+1} - z$.

Analýza sklonu terénu

Pro účely analýzy hydrologických poměrů, sesuvů, návrhy komunikací, stavebních objektů atd. je potřebné získat informace o sklonu terénu na zájmovém území. V trojúhelníkovém modelu DMT je výpočet sklonu proveden nad každým trojúhelníkem pomocí gradientu (obr. 3).

Obecná rovnice roviny ρ má tvar:

$$\rho : ax + by + cz + d = 0,$$

gradient $\nabla f(x_0, y_0, z_0)$ funkce $f(x, y, z)$ v bodě $p = [x_0, y_0, z_0]$ pak určuje vztah:

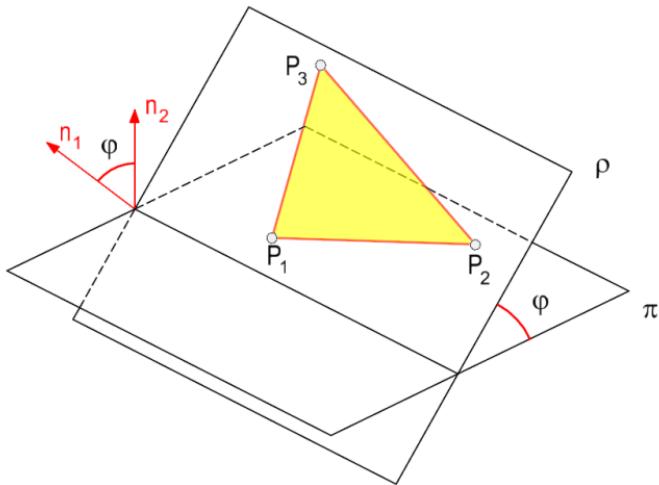
$$\nabla f(x_0, y_0, z_0) = \left(\frac{\partial f}{\partial x}(x_0), \frac{\partial f}{\partial y}(y_0), \frac{\partial f}{\partial z}(z_0) \right) = (a, b, c)$$

Mějme vodorovnou rovinu π . Roviny ρ a π mají normálové vektory n_1, n_2 , přičemž pro rovinu π uvažujeme s jednotkovým vektorem:

$$n_1 = (a, b, c), \quad n_2 = (0, 0, 1),$$

odchylku φ rovin ρ a π – hledaný sklon pak určíme ze vztahu:

$$\varphi = \arccos \frac{n_1 \cdot n_2}{\|n_1\| \|n_2\|} = \arccos \frac{c}{\|n_1\|}.$$



Obrázek 3: Vizualizace výpočtu sklonu trojúhelníka (převzato z Bayer 2023).

Analýza expozice terénu

Expozice, resp. orientace terénu je definovaná jako azimut průmětu gradientu $\nabla \rho$ do roviny x, y , čímž vznikne vektor \vec{v} s nulovou složkou z (obr. 4):

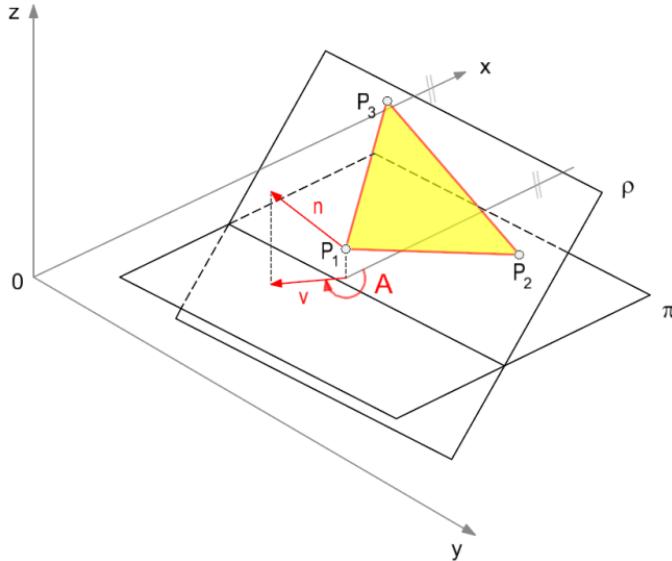
$$\vec{v} = \left(\frac{\partial \rho}{\partial x}(x_0), \frac{\partial \rho}{\partial y}(y_0), 0 \right) = (a, b, 0).$$

Azimut A vektoru \vec{v} je pak měřen od osy y dle vztahu:

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

ve vlastní implementaci jsou však pro účely správné vizualizace potřebné dodatečné korekce: v prostředí *Canvas* frameworku QT je kladný směr osy y dolu (došlo tedy k prohození odčítání severního a jižního směru) a místo arctan byla využita funkce arctan 2.

Analýza expozice terénu nachází využití zejména v zemědělství, hydrologii a stavebnictví.



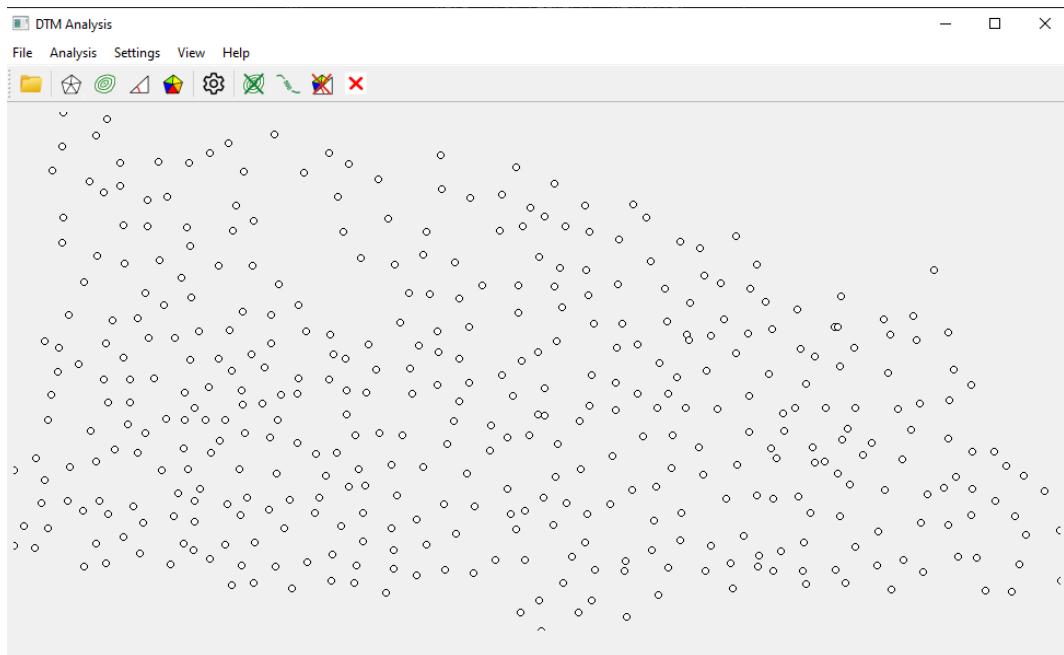
Obrázek 4: Vizualizace výpočtu orientace trojúhelníka (převzato z Bayer 2023).

Implementace

V rámci této úlohy bylo ve frameworku QT vytvořené uživatelské prostředí pro tvorbu digitálního modelu terénu s využitím zmíněných algoritmů v předcházející kapitole.

Vstupní data

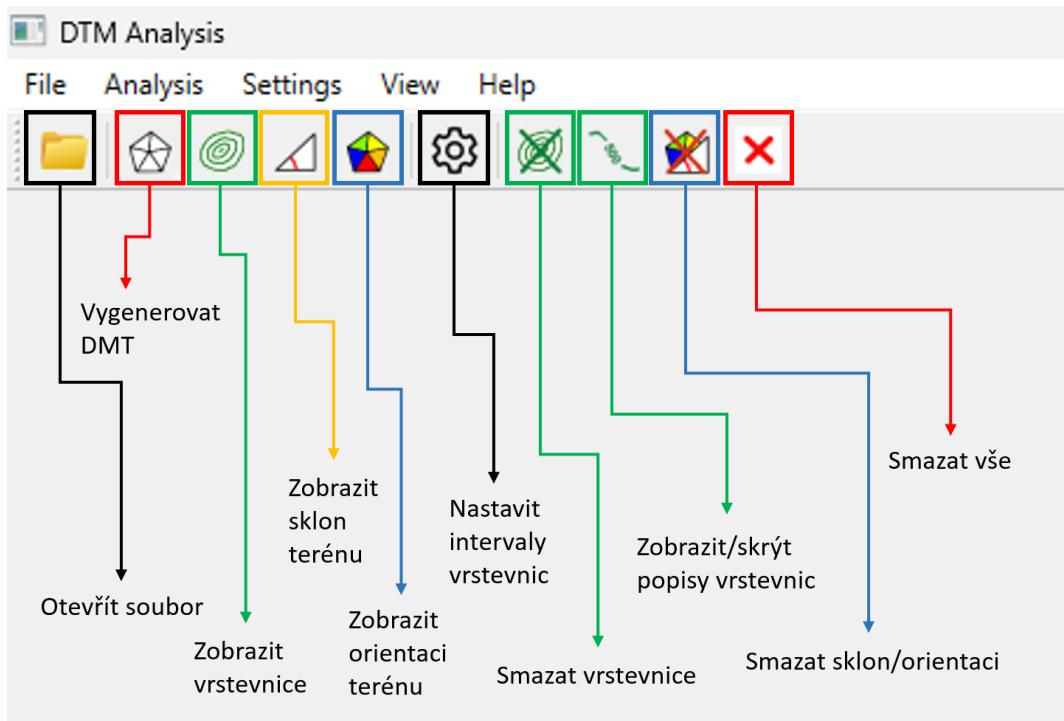
Aplikace (obr. 5) je přizpůsobena na načítání geografických vstupních dat v Křovákově souřadnicovém referenčním systému (EPSG:5514) ve formátu CSV. Aplikace umí rozpoznat načítání prázdného, či nevalidního CSV souboru. Uživatel je na takovou skutečnost upozorněn. K aplikaci jsou přiloženy testovací data ve formátu CSV ve složce *input_files* pod názvem *terrain.csv*.



Obrázek 5: Ukázka načtení bodového mračna (vlastní zpracování).

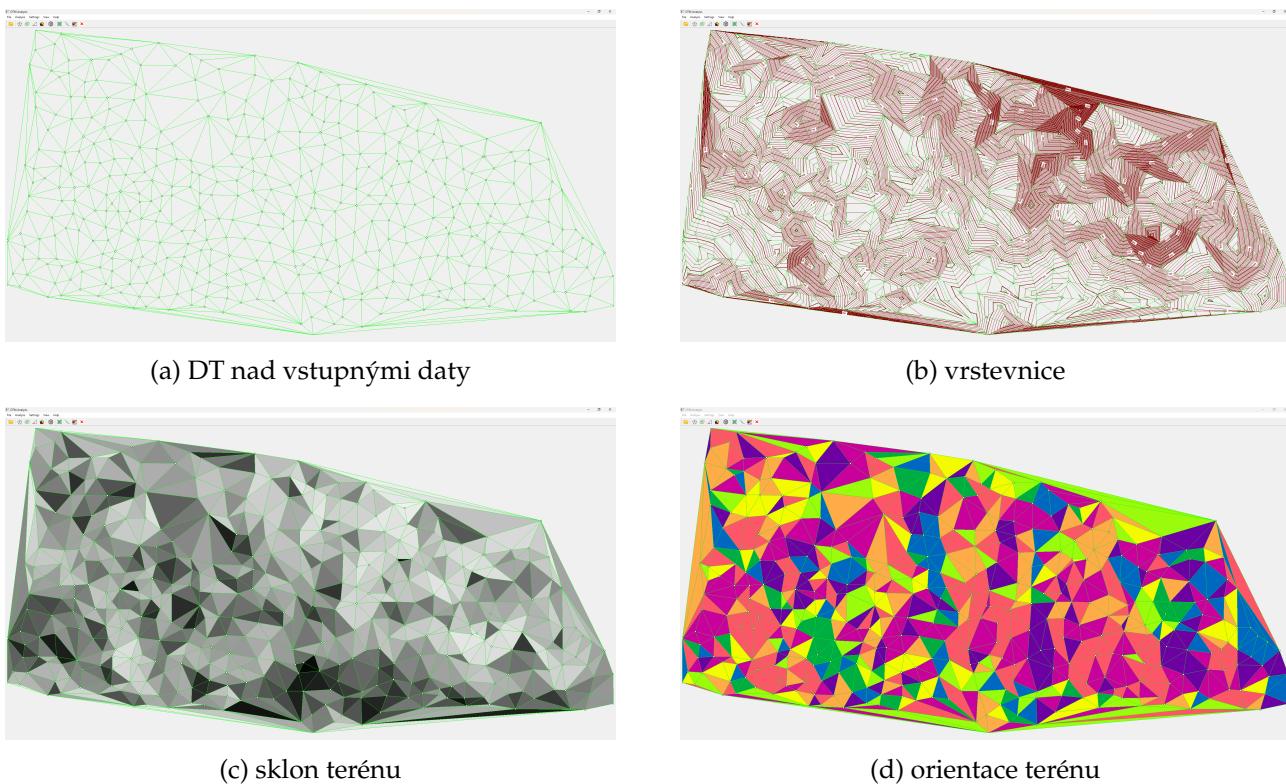
Aplikace

Grafické rozhraní aplikace bylo vytvořeno v prostředí Qt Creator 9.0.1 a dále upravováno v prostředí programovacího jazyka Python 3.11. Ovladatelnost a možnosti aplikace popisuje obr. 6.



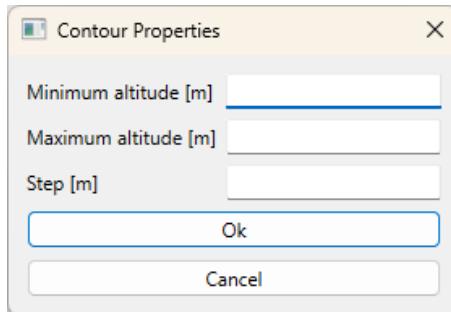
Obrázek 6: Ukázka grafického okna aplikace s popisem funkcí (vlastní zpracování).

Uživatel má možnost na vstupních datech provést Delaunayho triangulaci (obr. 7a). Následně lze nad vytvořenou triangulací vygenerovat vrstevnice (obr. 7b). Pro výslednou DT lze zobrazit sklon (obr. 7c) v šedotónových barvách a orientaci terénu (obr. 7d) v barevné paletě podle ESRI (Buckley 2008). Pokud uživatel spustí výpočet DT, aniž by měl načtena data, bude na tuto skutečnost upozorněn vyskakovacím oknem. Podobným způsobem se uživateli zobrazí upozornění, když klikne na výpočet vrstevnic, nebo zobrazení sklonu/orientace terénu.



Obrázek 7: Ukázka analytických funkcí pro DMT

Uživatel má také možnost upravit generování vrstevnic nastavením vlastního intervalu nadmořských výšek a kroku (obr. 8). Aktuální verze aplikace podporuje jen int číselné hodnoty pro všechny nastavení. Pokud uživatel zadá nevalidní vstup nebo nevyplní všechny pole v dialogovém okně, vrstevnice se budou generovat dle výchozích nastavení přizpůsobených pro výškové poměry Česka (v intervalu 0–1 600 m n. m., krok 10 m).



Obrázek 8: Nastavování intervalu a kroku generování vrstevnic (vlastní zpracování).

Třídy a metody

Funkční chod aplikace si vyžaduje sedm povinných skriptů, v kterých jsou implementovány potřebné třídy a metody: `mainform.py`, `algorithms.py`, `draw.py`, `dialog.py`, `Edge.py`, `QPoint3DF.py` a `triangle.py`.

Třída MainForm

Třída MainForm ze souboru `mainform.py` zabezpečuje inicializaci okna aplikace, vrchní lišty, panelu nástrojů, ikon a tlačítek. Zároveň propojuje jednotlivé interaktivní položky okna s metodami, které vykonají specifické akce. Týkají se především otevření souboru, spouštění konkrétních algoritmů apod. Část této třídy byla vygenerována v prostředí Qt Creator 9.0.1 (metody `setupUi()` a `translateUi()`). Níže jsou vyjmenovány nově implementované metody:

- `runDT()`

Provede výpočet DT z načteného bodového mračna.

- `runContourSettings()`

Otevře dialogové okno pro nastavení parametrů generování vrstevnic.

- `runContourLines()`

Vygeneruje vrstevnice dle nastavení.

- `runSlope()`

Provede výpočet sklonu svahů nad DT.

- `runAspect()`

Provede výpočet orientace svahů nad DT.

- `clearButton()`

Zavolá metodu `clearCanvas()` z třídy Draw, která vyprázdní okno.

- `clearSlopeAspectClick()`

Zavolá metodu `clearSlopeAspect()` z třídy `Draw`, která smaže polygony sklonu/orientace svahů.

- `clearContoursClick()`

Zavolá metodu `clearContourLines()` z třídy `Draw`, která smaže vrstevnice.

- `showContourLabelsClick()`

Zavolá metodu `showContourLinesLabels()` z třídy `Draw`, která obstarává vykreslení popisků vrstevnic.

- `aboutClick()`

Otevře repositář s aplikací v portálu GitHub.

- `exitClick()`

Ukončí aplikaci.

- `alert(type_alert=0)`

Spouští upozorňovací okno podle typu upozornění definovaného indexem 0 až 3:

0 – data nenačtena

1 – DT neprovedena, nemožno vygenerovat vrstevnice

2 – DT neprovedena, nemožno vypočítat sklon terénu

3 – DT neprovedena, nemožno vypočítat orientaci terénu

- `openFile()`

Otevře CSV soubor a načte ho do proměnné.

- `processFile()`

Zabezpečuje otevření souboru. Samotný soubor načte do proměnné pomocí metody `openFile()` a následně zavolá metodu `clearCanvas()` pro vyprázdnění okna. Pokud je vstupní CSV nečitelný, uživatele na to upozorní vyskakovacím oknem.

Třída Algorithms

V této třídě jsou obsaženy algoritmy pro konstrukci a analýzu DMT, které byly popsány v kapitole *Popis a rozbor problému*. Obsahuje dvě skupiny metod:

1. Metody pro samotnou konstrukci a analýzu DMT (DT, konstrukce vrstevnic, výpočet sklonu a orientace terénu);
2. Pomocní metody pro zmíněné algoritmy (výpočet euklidovské vzdálenosti, výpočet úhlů, nalezení Delaunayovského bodu, aktualizace *Active Edges List* apod).

Algoritmy v první skupině již byly detailně popsány výše, druhá skupina obsahuje celkem 11 algoritmů uvedených níže. Jejich podrobnější popis se nachází uvnitř této třídy ve skriptu `algorithms.py`.

- `get2LinesAngle(p1, p2, p3, p4)`

Vypočte úhel mezi dvěma vstupními liniemi.

- `euclidDistance(p1, p2)`

Vypočte euklidovskou vzdálenost mezi dvěma body.

- `getPointAndLinePosition(p, p1, p2)`

Vrátí hodnotu podle polohy bodu p vzhledem k linii danou body $(p1, p2)$:

-1 – bod je kolineární

0 – bod leží na pravé polorovině

1 – bod leží na levé polorovině

- `getDelaunayPoint(p1, p2, points)`

Vyhledá optimální Delaunayovský bod.

- `updateAEL(edge, ael)`

Aktualizuje seznam aktivních hran – hrany do něj přidává nebo odebírá.

- `getNearestPoint(p, points)`

Vyhledá nejbližší bod z bodového mračna k danému bodu p .

- `getContourLinePoint(p1, p2, z)`

Vrátí 3D bod ležící na vrstevnici.

- `setContourDefaultSettings()`

Nastaví výchozí hodnoty parametrů pro generování vrstevnic.

- `getNormalVector(p1, p2, p3)`

Vrátí normálový vektor roviny dané body $p1, p2, p3$.

- `createSlope(p1, p2, p3)`

Vypočte hodnotu sklonu roviny dané body $p1, p2, p3$.

- `createAspect(p1, p2, p3)`

Vypočte azimut určující orientaci roviny dané body $p1, p2, p3$ vůči světovým stranám.

Třída Draw

Třída Draw ze souboru `draw.py` slouží pro inicializaci proměnných nesoucí prostorovou informaci, načítání a vykreslování geoprostorové informace. Tato třída má 5 list atributů, 4 int atributy a 1 bool atribut pro manipulaci se vstupními daty.

Třída Draw pak obsahuje následující metody:

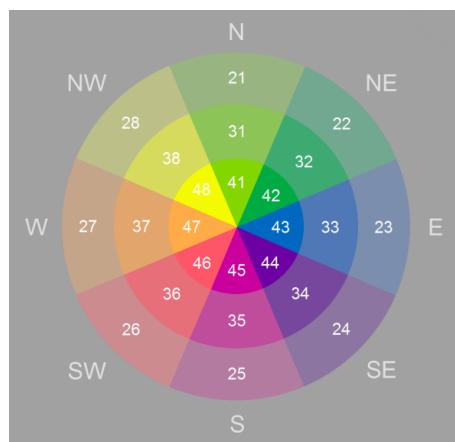
- `setContourSettings`

Zobrazí dialogové okno z třídy `InputDialog` a nastaví hodnoty vstupních parametrů pro vygenerování vrstevnic.

- `getContourSettings`

Vrátí hodnoty parametrů pro vygenerování vrstevnic.

- `contourInvalidInput`
Zobrazí vyskakovací okno upozorňující uživatele na špatně zadaný vstup.
- `paintEvent(e)`
Vykresluje objekty (body a polygony) na plátno (Canvas).
- `getAspectColor(aspect)`
Vrátí barvu orientace svahu podle barevné palety z ESRI.



Obrázek 9: Barevná paleta expozice svahu (Buckley 2008).

- `setDT(dt)`
Nastaví seznam hran v DT.
- `setSlopeAspect(triagles)`
Nastaví seznam objektů třídy Triangle pro vykreslení polygonů sklonu/orientace terénu.
- `getDT()`
Vrátí seznam hran v DT.
- `getZMin()`
Vrátí minimální Z souřadnici.
- `getZMax()`
Vrátí maximální Z souřadnici.
- `getDZ()`
Vrátí hodnotu kroku pro vykreslení vrstevnic.
- `setContours(contours, index_contours)`
Nastaví seznam vrstevnic a seznam zvýrazněných vrstevnic.
- `getPoints()`
Vrátí bodové mračno.

- `switchSlopeAspect(val)`
 Nastavuje vykreslení polygonů sklonu nebo orientace terénu na základě hodnoty *val*:
 -1 – nevykreslit ani sklon, ani orientaci terénu
 0 – vykreslit sklon terénu
 1 – vykreslit orientaci terénu
- `clearCanvas()`
 Smaže všechny objekty na plátně (Canvas).
- `clearContourLines()`
 Smaže vrstevnice.
- `clearSlopeAspect()`
 Smaže polygony sklonu/orientace terénu.
- `showContourLinesLabels()`
 Zobrazí/skryje popisy vrstevnic.
- `loadData(data)`
 Prochází vstupní CSV soubor a načte geoprostorovou informaci.
- `findBoundingPoints(p, xmin, ymin, xmax, ymax)`
 Naleze minimální a maximální souřadnice pro vykreslování vstupních dat.
- `resizeContent(xmin, ymin, xmax, ymax)`
 Roztáhne vstupní data na plátno podle velikosti okna aplikace.

Třída InputDialog

Třída InputDialog dědí z předdefinované třídy `QDialog` a je přizpůsobena pro zobrazení dialogového okna pro nastavení parametrů generování vrstevnic a jejich následné vracení. Obsahuje tři metody: dvě zabezpečují zpracování signálu po stisknutí příslušného tlačítka a poslední zajíšťuje samotné vrácení nastavených parametrů (minimální Z souřadnice, maximální Z souřadnice, krok pro vykreslení vrstevnic).

Třída QPoint3DF

Třída `QPoint3DF` slouží pro vytvoření objektu reprezentujícího bod v 3D prostoru. Dědí atributy pro *x*, *y* souřadnice z předdefinované třídy `QPointF` a je jí přidělen nový atribut pro uschování *Z* souřadnice. Obsahuje jedinou metodu, která vrátí hodnotu *Z* souřadnice bodu. Všechny body vstupního bodového mračna jsou inicializovány právě jako `QPoint3DF` objekty.

Třída Edge

Třída `Edge` slouží pro reprezentaci hrany v 3D prostoru definovanou 2 body typu `QPoint3DF`. Tyto body inicializuje jako počáteční a koncový bod hrany, v rámci implementované metody je pak možné prohodit orientaci takové hrany změnou počátečního a koncového bodu – tento koncept je využit v

inkrementální verzi konstrukce DT. V rámci třídy je také definovaná ekvivalentní operace pro posouzení, zda jsou dva Edge objekty shodné.

Pro účely určení polohy popisů vrstevnic jsou v této třídě dodatečně implementovány metody pro nalezení středu hrany promítnuté do 2D prostoru.

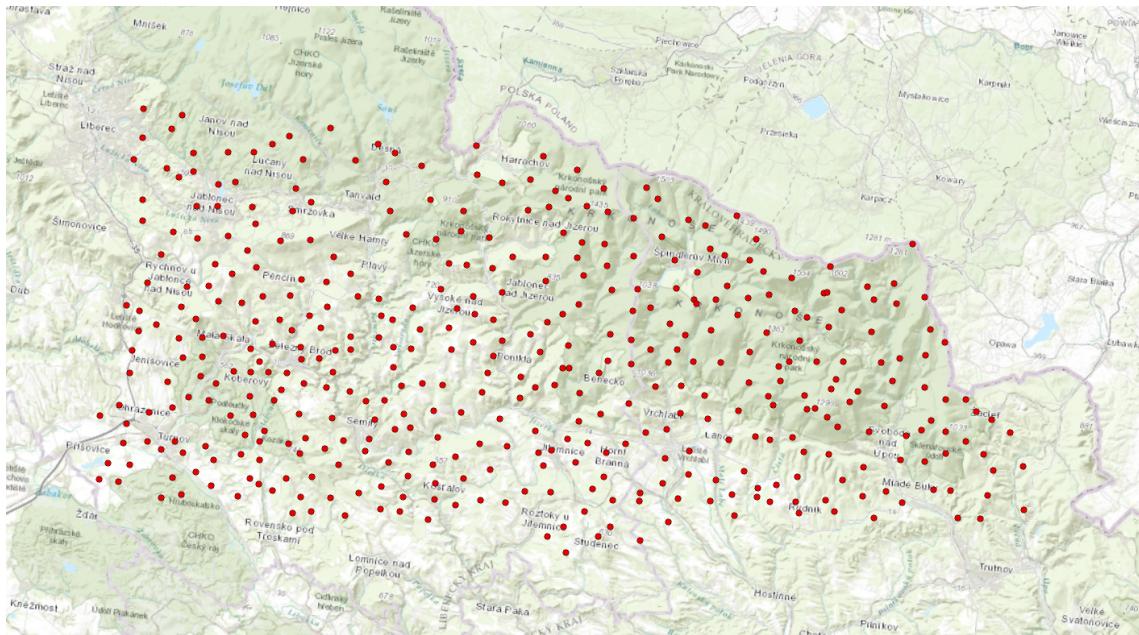
Třída Triangle

Třída Triangle slouží pro vytváření objektů reprezentující trojúhelníky ve vytvořené trojúhelníkové síti. Takový trojúhelník je definován 3 body typu QPoint3DF a navíc obsahuje atributy `_slope` a `_aspect` pro uložení hodnot sklonu roviny trojúhelníku nebo orientace trojúhelníku vůči světovým stranám. Třída obsahuje metody, kterými vrací konkrétní bod trojúhelníku a hodnotu sklonu/azimutu pro odečítání orientace trojúhelníku.

Výsledky

Data `terrain.csv` obsahují celkem 418 trigonometrických bodů z databáze bodových polí ČÚZK (ČÚZK 2023). Body jsou rozmístěny v části Krkonoš a jejich předhůří (obr. 10). Pro analýzu funkčnosti implementovaných metod tvorby DMT byly vybrány tři oblasti se specifickým tvarem reliéfu:

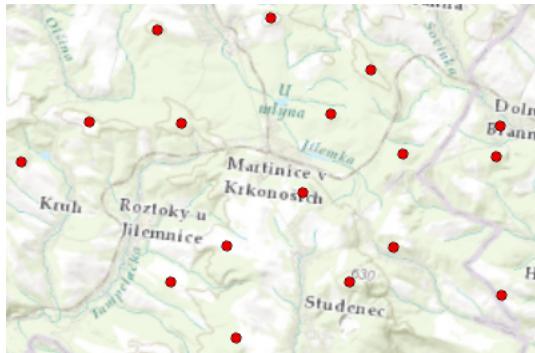
1. oblast s malou vertikální členitostí (rovina, údolí),
2. oblast s velkou vertikální členitostí (vrcholy, hřbety),
3. oblast s hřebenem a údolími.



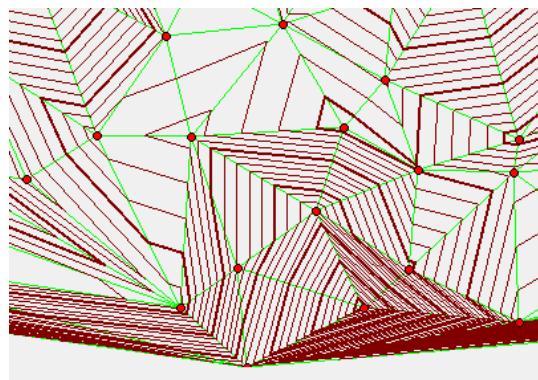
Obrázek 10: Vymezení trigonometrických bodů na podkladové mapě.

Případ 1: Oblast s malou vertikální členitostí

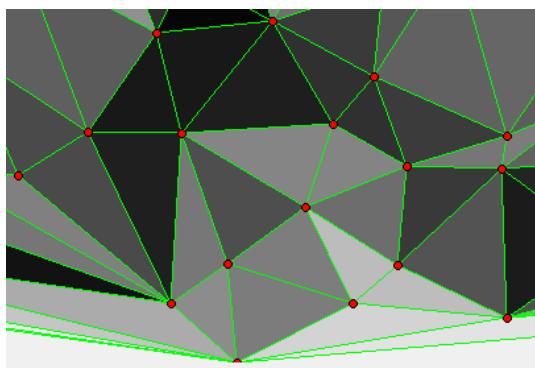
První zájmovou oblast zobrazuje obr. 11 v šesti oknech. Rozmístění bodů na podkladové mapě se nachází v okně (a), z čehož je zřejmé, že severní část oblasti je jen velmi málo členitá, vertikální členitost pak hlavně roste směrem na jihovýchod. Vygenerované vrstevnice s krokem 5 m, 10 m a 20 m jsou zobrazeny v oknech (b), (d), (f). Vrstevnice v rovinaté části odpovídají skutečnému průběhu terénu, s rostoucí nadmořskou výškou směrem na jihovýchod je pak správně naznačena změna členitosti s vyšší hustotou vrstevnic. Vrstevnice v nejjižnější části oblasti však zřejmě nejsou interpolovány správně, co je způsobeno tím, že zájmová oblast se nachází na okraji datasetu, pro který chybí další údaje o průběhu terénu. Je však zřejmé, že pro postačující výsledky lineární interpolace chybí množství bodů; jednotlivé segmenty tvořící vrstevnice jsou ostré, čímž dochází ke ztrátě informace o skutečné změně v tvaru reliéfu.



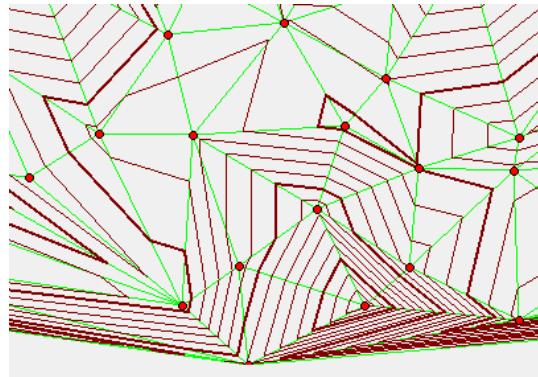
(a) zájmová oblast na podkladové mapě



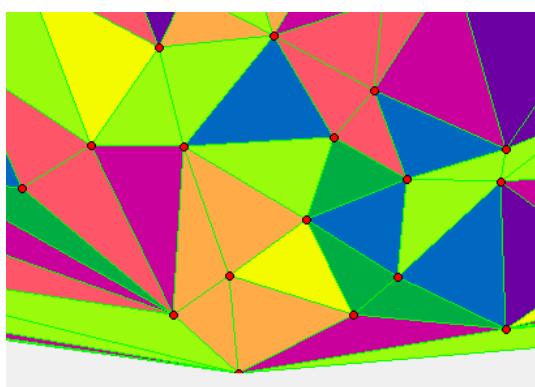
(b) vrstevnice s krokem 5 m



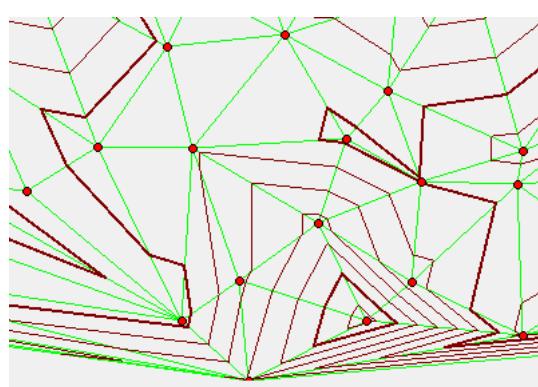
(c) sklon terénu



(d) vrstevnice s krokem 10 m



(e) orientace terénu



(f) vrstevnice s krokem 20 m

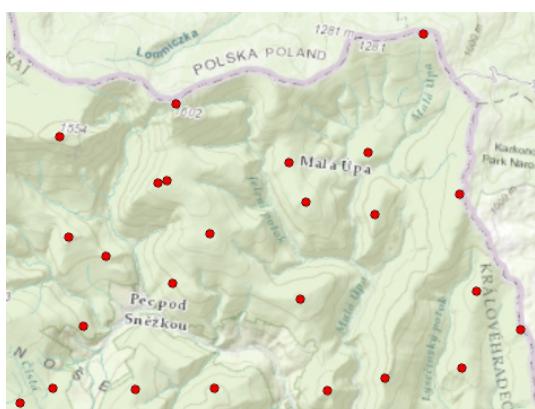
Obrázek 11: Zájmová oblast 1

Okno (c) znázorňující sklon svahů odpovídá vygenerovaným vrstevnicím: oblast s tmavými trojúhelníky naznačuje menší členitost, světlejší trojúhelníky naopak vyšší sklon svahu. Opět je důležité upozornit na světlé trojúhelníky v jižní části, které by podle takové analýzy znamenaly vysokou sklonitost terénu. Tento výsledek není správný a souvisí s okrajem analyzovaného území. Orientace svahů v okně (e) pak poukazuje na typy tvarů reliéfu: v jižní části je barevná paleta rozmanitější, což značí různou orientaci svahů kopce, resp. vrcholu, v severní části jsou pak barvy homogennější, protože na rovnějších oblastech nedochází k výrazné změně orientace svahů.

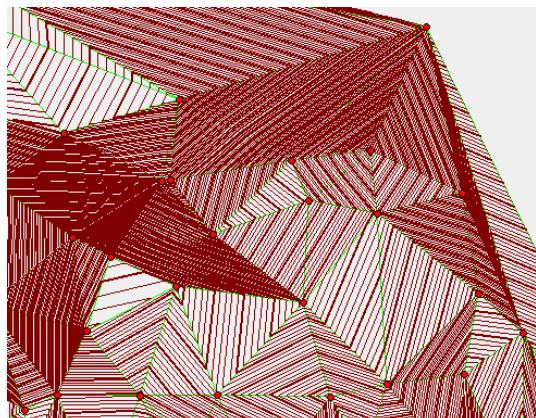
Případ 2: Oblast s velkou vertikální členitostí

Druhá zájmová oblast (obr. 12) se nachází v nejvyšších částech Krkonoš a je charakterizována velkým počtem hřbetů, vrcholů a údolí. Podle vygenerovaných vrstevnic v oknech (b), (d) a (f) je však patrné, že tato oblast nebyla z hlediska výškopisu popsána správně. I když hustota vrstevnic potvrzuje prudkou změnu výškových poměrů, vzhledem k malému počtu bodů vrstevnice nenásledují průběh

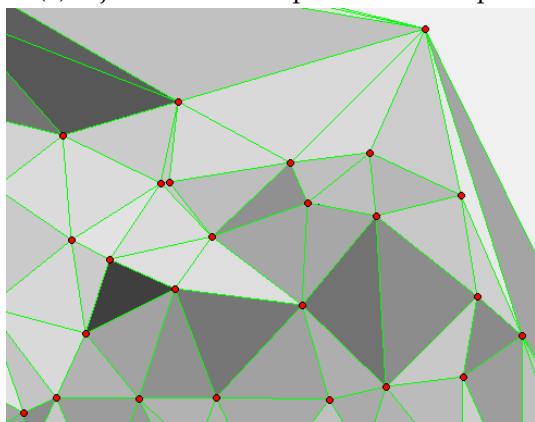
hřbetů a zcela ignorují většinu údolí. Přičinou je také rozmístění bodů, které v údolích a nižších částech území úplně chybějí a tyto reliéfní tvary tak nemohou být znstruovány. Rozmístění bodů také ovlivňuje velikost trojúhelníků, přičemž opět platí, že velké trojúhelníky nemusí dostatečně charakterizovat tvar terénu. Protože je tato oblast opět na okraji datasetu, došlo k nesprávné interpolaci okraje oblasti stejně jako v případě 1.



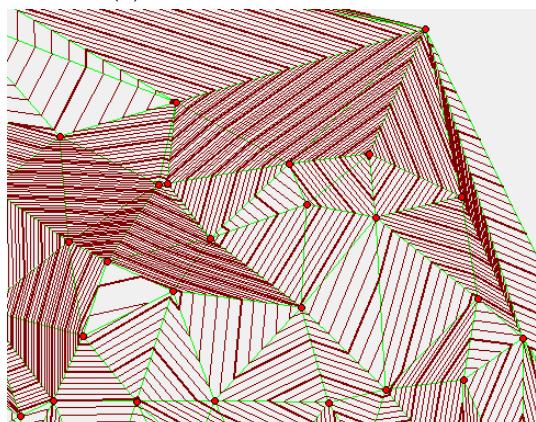
(a) zájmová oblast na podkladové mapě



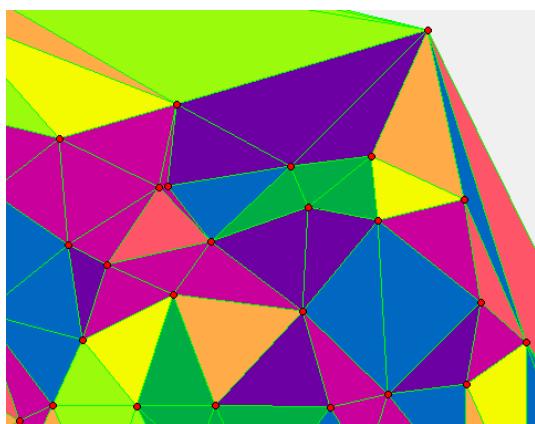
(b) vrstevnice s krokem 5 m



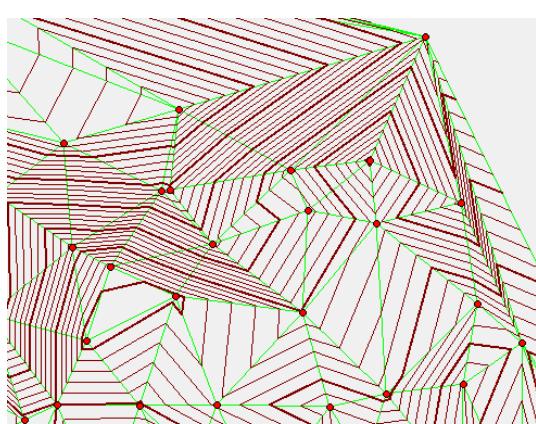
(c) sklon terénu



(d) vrstevnice s krokem 10 m



(e) orientace terénu



(f) vrstevnice s krokem 20 m

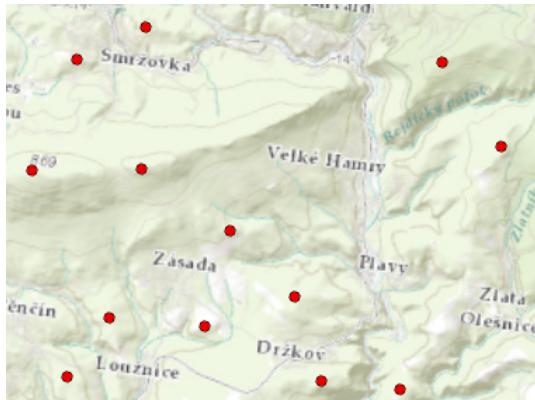
Obrázek 12: Zájmová oblast 2

Další zajímavou chybu v modelu odhaluje okno (c) se sklonem terénu, kde je možné pozorovat tmavý trojúhelník v západní části oblasti uprostřed prudkých svahů, což naznačuje rovinatou oblast. Není tomu tak, v skutečnosti vrcholy tohoto trojúhelníku tvoří vrcholy s podobnými nadmořskými výškami a zcela opomíjejí údolí, nad kterým se vypínají. Světlost většiny trojúhelníků však potvrzuje, že se jedná o horskou oblast. Orientaci terénu v okně (e) ovlivňuje nadmořská výška nejvyššího z

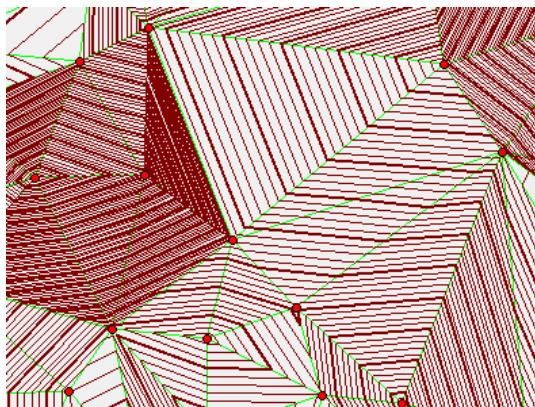
vrcholů trojúhelníku, a tedy na některých místech, kde dochází k opomenutí reliefních tvarů, je orientace terénu vůči světovým stranám určena nesprávně.

Případ 3: oblast s hřebenem a údolími

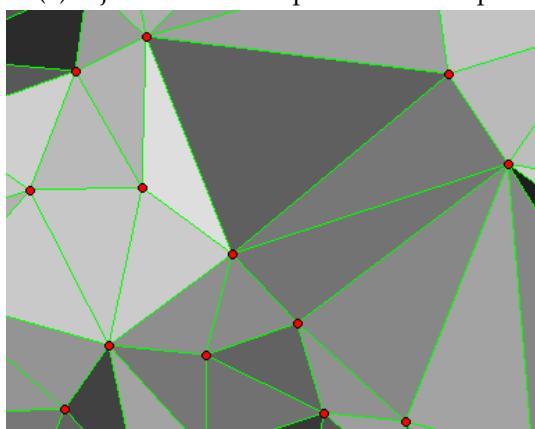
Poslední ukázka se věnuje oblasti v severozápadní části analyzovaných dat. Detail oblasti i s grafickými výsledky jsou k dispozici na Obrázku 13.



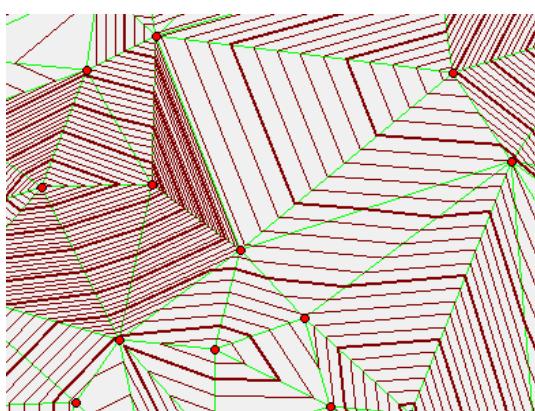
(a) zájmová oblast na podkladové mapě



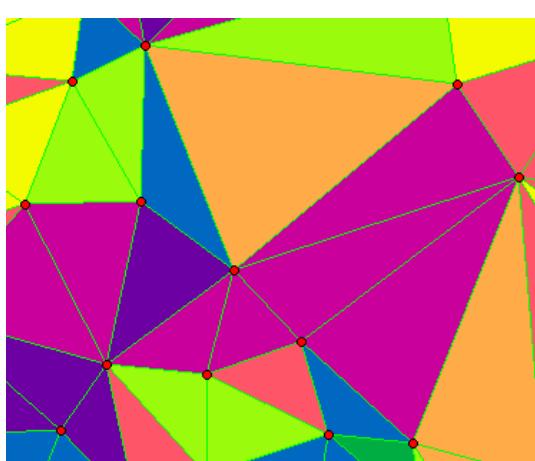
(b) vrstevnice s krokem 5 m



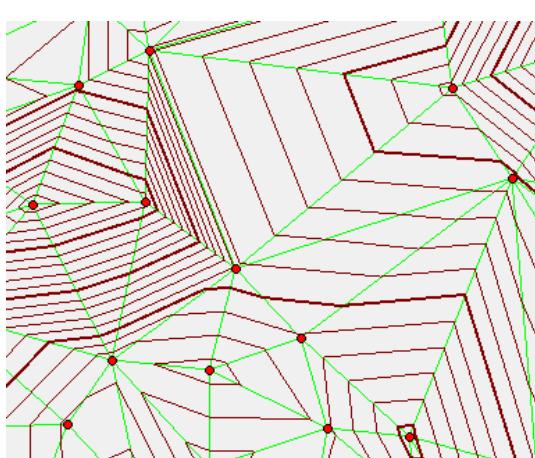
(c) sklon terénu



(d) vrstevnice s krokem 10 m



(e) orientace terénu



(f) vrstevnice s krokem 20 m

Obrázek 13: Zájmová oblast 3

Tato oblast může při grafickém znázornění vrstevnic na první pohled rychle zaujmout: určité trojúhelníky hustěji vyplňeny vrstevnicemi díky rychlému nárůstu výšky. Pokud výsledek srovnáme s

realitou, tak je patrné, že vzniklá triangulace v okolí dvou bodů na hřebenu (na obrázku (a) se nacházejí na v západní části) proběhla až na malé odlišnosti dobře. Ovšem tento hřeben pokračuje směrem na východ (severovýchod), což výsledek vizualizovaných vrstevnic nerespektuje. Tato skutečnost, jak již bylo zmíněno, vyplývá z faktu, že algoritmus, který je použitý pro výpočet triangulace, nerespektuje žádné překážky jako vodní toky nebo silnice. Hřeben by měl pokračovat dál na východ, který se mírně svažuje a následně je přerušen údolím. Na druhý pohled je však z výsledků vygenerovaných vrstevnic vidět jakýsi náznak údolí, které ovšem prochází středem sledované zájmové oblasti. Lze tedy říci, že pokud bychom měli k dispozici více bodů z terénu, nebo by bylo do výpočtu zahrnuto respektování bariér (řeky,...) výsledek triangulace by více odpovídal skutečnosti. Pokud se budeme soustředit na expozici svahu v okolí těchto bodů (e) zjistíme, že výsledek odpovídá skutečnosti a lze tedy potvrdit, že implementovaný algoritmus pro analýzu orientace svahu pracuje správně.

Uprostřed jižní části výřezu se nachází bod, který dle výsledné triangulace a i vzhledem k realitě reprezentuje vrchol kopce. Ovšem ve skutečnosti se směrem na jih/jihovýchod nachází rovina, kterou algoritmus nemá šanci (vzhledem k datům) rozpoznat. Opět lze tedy konstatovat, že nad analyzovanými daty je zanedbaná důležitá informace o průběhu terénu. V této části zájmového území neodpovídá analýza sklonu ani orientace terénu skutečnosti. Pokud bychom ovšem nahlíželi na území jen z hlediska výšky, pak je výsledná analýza provedená správně.

Shrnutí

Implementované metody pro konstrukci a analýzu DMT byly otestovány na členitém reliéfu Krkonoš s nereprezentativním vzorkem dat. I přestože byly určité části území popsány z hlediska výškopisu, svažitosti a orientace svahů vůči světovým stranám správně, není možné ohodnotit celkový výsledek analýzy vytvořeného modelu kladně. Jako hlavní příčiny byly identifikovány následující skutečnosti:

- nedostatečný počet bodů v datasetu, a tedy menší počet trojúhelníků na místech, kde se tvar reliéfu mění intenzivněji,
- nevhodné rozmístění bodů, které se nacházejí téměř výhradně na vrcholech pohoří a na níže položených místech území zcela chybějí,
- využití lineární interpolace, která není pro náročnější terén vhodná a je vhodné ji doplnit jinými technikami/metodami.

Bylo by vhodné provést konstrukci a analýzu DMT nad jiným datasetem, který by zohledňoval výše popsané nedostatky.

Závěr

Cílem této úlohy bylo vytvoření aplikace pro vytvoření a analýzu digitálního modelu terénu (DMT) nad bodovým mračnem. Výsledné grafické výstupy byly slovně zhodnoceny a porovnány se skutečností. Bylo zhodnoceno, že použité algoritmy pracují správně, ovšem testovaná data nedostatečně vystihují průběh terénu v zájmovém území.

Dále je důležité poukázat na fakt, že výpočet vrstevnic byl proveden na základě lineární interpolace, což znamená, že hodnoty nadmořské výšky by se v celém území měnily lineárně, což není v přírodě typické. Tento výpočet je však nejjednodušší a jistou představu o daném území může poskytnout.

Vytvořená aplikace je volně dostupná přes GitHub na adrese https://github.com/koziskoa/APK_2023/tree/master/DEM.

Literatura

- [1] BAYER, T. (2008): Algoritmy v digitální kartografii. Nakladatelství Karolinum, Praha.
- [2] BAYER, T. (2023a): Rovinné triangulace a jejich využití. Přednáška pro předmět Algoritmy počítačové kartografie, Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie. Přírodovědecká fakulta UK, dostupné *zde* (cit. 17. 4. 2023).
- [3] BAYER, T. (2023): Úvod do výpočetní geometrie. Základní vztahy. Přednáška pro předmět Algoritmy počítačové kartografie, Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie. Přírodovědecká fakulta UK, dostupné *zde* (cit. 17. 4. 2023).
- [4] BUCKLEY, A. (2008): Esri Blog, Mapping, Aspect-slope map, dostupné *zde*
- [5] DE BERG, M., CHEONG, O., VAN KREVELD, M., OVERMARS, B. (2008): Computational Geometry. Algorithms and Applications, third edition. Springer, Berlin.
- [6] BRŮHA, L. (2016): DIGITÁLNÍ MODELY TERÉNU, výukový materiál, verze 1.0. PřF UK, Praha.
- [7] ROURKE, O. J. (2005): Computational Geometry in C. Cambridge University Press, Cambridge.
- [8] ŽÁRA, J., BEDŘICH, B., SOCHOR, J., FELKEL, P. (2004): Moderní počítačová grafika. Computer Press, Brno.