|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  FAKULTA STAVEBNÍ, OBOR GEODÉZIE A KARTOGRAFIE  KATEDRA GEOMATIKY | | | | | |
| název předmětu  Algoritmy digitální kartografie a GIS | | | | | |
| název úlohy  Digitální model terénu | | | | | |
| školní rok  2021/22 | studijní skup.  60 | číslo zadání  - | zpracoval, email  Jakub Šimek, Jan Kučera | datum  7.12.21 | klasifikace |

Obsah

[1. Zadání 3](#_Toc90041773)

[2. Bonusové úlohy 3](#_Toc90041774)

[3. Popis a rozbor problému 3](#_Toc90041775)

[3.1. Delaunayho triangulace 3](#_Toc90041776)

[3.2. Lineární interpolace vrstevnic 4](#_Toc90041777)

[3.3. Expozice 4](#_Toc90041778)

[3.4. Sklon 4](#_Toc90041779)

[4. Popis algoritmů 4](#_Toc90041780)

[4.1. Delaunayova triangulace 4](#_Toc90041781)

[4.2 Generování terénních tvarů 5](#_Toc90041782)

[4.3 Generování vrstevnic a jejich popisů 6](#_Toc90041783)

[5. Vstupní data 8](#_Toc90041784)

[5.1 Klikání myši 8](#_Toc90041785)

[5.2 Generování terénních tvarů 8](#_Toc90041786)

[5.3 Načtení ze souboru CSV 8](#_Toc90041787)

[6. Výstupní data 10](#_Toc90041788)

[6.1 Ukázky výstupů 10](#_Toc90041789)

[7. Vzhled aplikace 11](#_Toc90041790)

[8. Dokumentace 12](#_Toc90041791)

[*8.1* Třída *Algorithms* 12](#_Toc90041792)

[*8.2* Třída *CSV* 13](#_Toc90041793)

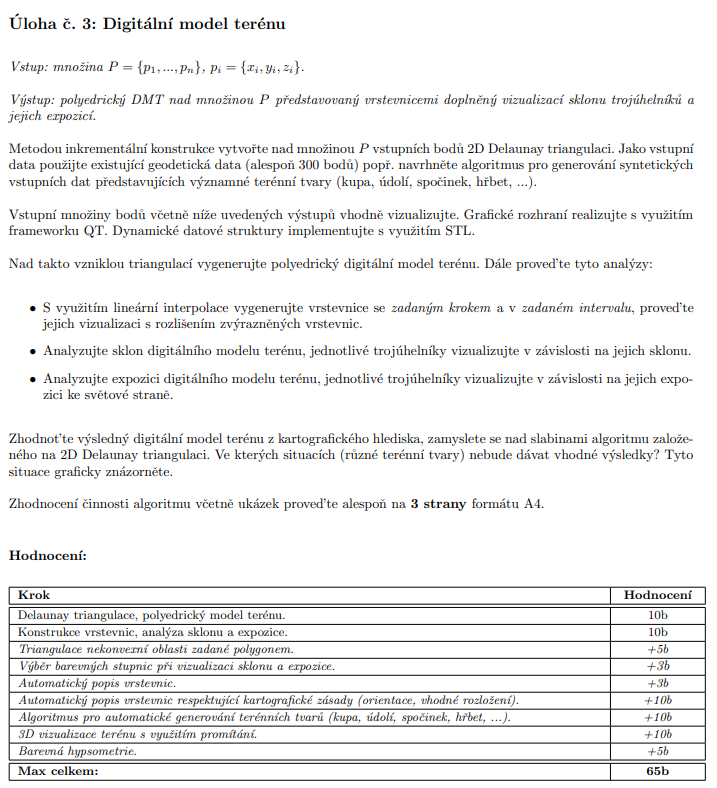
[*8.3* Třída *Draw* 13](#_Toc90041794)

[*8.4* Třída *Widget* 13](#_Toc90041795)

[9. Závěr 14](#_Toc90041796)

[10. Zdroje 14](#_Toc90041797)

## Zadání



## Bonusové úlohy

Ke standartnímu zadání byly zpracovány tyto bonusové úlohy:

1. Výběr barevných stupnic při vizualizaci sklonu a expozice.
2. Automatický popis vrstevnic.
3. Automatický popis vrstevnic respektující kartografické zásady.
4. Algoritmus pro automatické generování terénních tvarů.

## Popis a rozbor problému

Na vstupu máme množinu bodů , kde každý bod je trojice souřadnic . Úkolem je najít Delaunayho triangulaci (DT) tvořenou trojúhelníky . Tyto trojúhelníky poté slouží k dalším analýzám terénu.

### Delaunayho triangulace

Výsledkem tohoto algoritmu jsou trojúhelníky, které se nejvíce přibližují rovnostranným trojúhelníkům.

Výsledná triangulace má čtyři vlastnosti, a to:

1. v kružnici opsané trojúhelníku neleží žádný bod ,
2. DT maximalizuje minimální úhel , avšak neminimalizuje maximální úhel v ,
3. DT je lokálně i globálně optimální vůči kritériu minimálního úhlu,
4. DT je jednoznačná, pokud nenastane případ 4 bodů na jedné kružnici.

### Lineární interpolace vrstevnic

Trojúhelník je tvořen hranami a . Pro vztah hrany trojúhelníku a vodorovné roviny s výškou vznikají tři případy:

1. protíná vodorovnou rovinu,
2. neprotíná vodorovnou rovinu,
3. leží ve vodorovné rovině.

Jestliže pro hranu platí bod 1), pak spočteme souřadnice průsečíků vodorovné roviny s hranou , podle rovnic:

,

.

### Expozice

Orientace trojúhelníku je dána azimutem průmětu gradientu do roviny . Azimut je určen podle vzorce:

,

kde jsou vektorové součiny vektorů , tvořící rovinu trojúhelníku.

Hodnota azimutu byla převedena na interval . Hodnota azimutu byla následně transformována na interval barvy vztahem:

.

Tento vztah byl použit za účelem plynulého navázání azimutů blízkých nule a azimutů blízkých 360°. Použitím tohoto vztahu získáme osvícení terénu směrem od severu.

Hodnota je pak využita k vizualizaci expozice. Vizualizaci je možné provézt v červené/modré/zelené/šedé.

### Sklon

Sklon je úhel, který svírá svislice s normálou trojúhelníku. Sklon je určen vztahem:

,

kde , .

Ze všech trojúhelníku byly vybrány maximální a minimální hodnoty sklonu. Hodnota pak byla určena vztahem:

.

Hodnota je pak využita k vizualizaci sklonu. Vizualizaci je možné provézt v červené/modré/zelené/šedé. Barva trojúhelníku byla určena jako:

1. Červená –
2. Modrá –
3. Zelená –
4. Šedá –

## Popis algoritmů

### Delaunayova triangulace

Pro tvorbu DT byla zvolena inkrementální konstrukce. To znamená, že vybraný Delaunayho bod musí ležet v levé polorovině orientované úsečky. Poloměr opsané kružnice trojúhelníku musí být minimální a střed této kružnice musí ležet v pravé polorovině. Jestliže takový bod neexistuje, pak je otočena orientace úsečky.

#### Implementace DT

1. , náhodný a nejbližší bod
2. Vytvoř hranu
3. Pokud , prohoď orientaci , jdi na 3)
4. , zbývající hrany trojúhelníku
5. , přidání 3 hran do AEL
6. , přidání 3 hran do DT
7. while AEL not empty:
8. , vezmi první hranu z AEL
9. , prohoď její orientaci

12. , zbývající hrany trojúhelníku
13. , přidej hranu do DT ale ne do AEL
14. , přidej do DT i do AEL

#### Implementace

1. Vytvoř hranu
2. , odstraň z AEL
3. , přidej do AEL
4. , přidej do DT

### Generování terénních tvarů

V aplikaci jsou implementovány tři druhy terénních tvarů, a to: kupa (Pile), hřbet (Ridge) a sedlo (Saddle).

#### Kupa

Pro výpočet kupy byl využit tvar rotačního paraboloidu, který je daný hodnotou:

,

kde hodnoty s indexem značí souřadnice těžiště všech bodů. Hodnotám souřadnic byl přiřazen náhodný šum.

#### Hřbet

Tvar hřbetu byl vygenerován následující rovnicí:

.

Hodnotě byl následně přiřazen náhodný šum.

#### Sedlo

Tvar sedla byl vygenerován rovnicí:

.

Hodnotě byl následně přiřazen náhodný šum.

### Generování vrstevnic a jejich popisů

Poté, co byla vytvořena Delaunayova triangulace nad zadanými daty, je možné dál pokračovat v procesech jako je třeba generování vrstevnic. Toto téma se dá rozdělit na dvě části. Na generování vrstevnic, ať už hlavních či vedlejších, a na generování jejich popisů. Takto bude rozdělena i tato kapitola.

#### Generování vrstevnic

Předpokladem je již vytvořená trojúhelníková síť. Všechny vrstevnice jsou generovány funkcí *getContourLines*. Hlavní vrstevnice, které je potřeba oddělit, protože se symbolizují výraznější linií než vedlejší vrstevnice, jsou pak generovány funkcí *getMainContourLines*. Interpolace bodů pro vrstevnice je realizovaná funkcí *getContourPoint*.

#### Implementace *getContourLines*

Vstup: DT = {e­1, e2, …}, kde ei = {si, ei}, si = {xis, yis, zis}, ei = {xie, yie, zie}; z – výška vrstevnice

1. Pro tj ϵ DT, kde tj = (ej∙i, e(j∙i)+1, e(j∙i)+2)
2. dzj1 = zj1 – z, dzj2 = zj2 – z, dzj3 = zj3 – z, výškové rozdíly
3. dzj12 = dzj1 ∙ dzj2, dzj23 = dzj2 ∙ dzj3, dzj31 = dzj3 ∙ dzj1, součiny výškových rozdílů
4. If (dzi1 = 0) && (dzi2 = 0) && (dzi3 = 0), komplanarita rovin
5. Continue
6. Else if (dzj1 == 0) && (dzj2 == 0)
7. *Contours* ej∙i, přidej do vrstevnic
8. Else if (dzj2 == 0) && (dzj3 == 0)
9. *Contours* e(j∙i)+1, přidej do vrstevnic
10. Else if (dzj3 == 0) && (dzj1 == 0)
11. *Contours* e(j∙i)+2, přidej do vrstevnic
12. Else if ((dzj12 <= 0) && (dzj23 < 0)) || ((dzj12 < 0) && (dzj23 <= 0))
13. A = *getContourPoint(p*j1, *pj2, z)*
14. B = *getContourPoint(p*j2, *pj3, z)*
15. *Contours* e(A, B), přidej do vrstevnic
16. Else if ((dzj23 <= 0) && (dzj31 < 0)) || ((dzj23 < 0) && (dzj31 <= 0))
17. A = *getContourPoint(p*j2, *pj3, z)*
18. B = *getContourPoint(p*j3, *pj1, z)*
19. *Contours* e(A, B), přidej do vrstevnic
20. Else if ((dzj31 <= 0) && (dzj12 < 0)) || ((dzj31 < 0) && (dzj12 <= 0))
21. A = *getContourPoint(p*j3, *pj1, z)*
22. B = *getContourPoint(p*j1, *pj2, z)*
23. *Contours* e(A, B), přidej do vrstevnic

#### Implementace *getContourPoints*

Vstup: *p1 = {x1, y1}, p2 = {x2, y2}, z*

#### Implementace *getMainContourLines*

Vstup: *Contours = {e­1, e2, …}*, *k* – každá *k*-tá vrstevnice je hlavni, *dz* výškový interval vstevnic

1. *dh = dz* ∙ *k*
2. *For* *e* ϵ *Contours*
3. *z = getZ(e)*, získej výšku hrany
4. *If (z%dh == 0), zbytek po dělení*
5. *ContoursMain pair<z, e>*, přidej hranu s výškou jako pár do struktury *map*

#### Generování popisů

Generování popisů, aby splňovali kartografické zásady je potřeba rozdělit na několik částí. První částí je, že struktura, ve které máme uložené hlavní vrstevnice, vlastně obsahuje multipolygony (neuzavřené samozřejmě). Tedy jinak řečeno se zde může nacházet více různých souvislých vrstevnic se stejnou výškou. Ty je potřeba oddělit, aby následující funkce *getDistancedEdges* mohla správně vzdálenostně odfiltrovat hrany vrstevnice, na kterých se popisek vypíše. Jinak by docházelo ke kolizím s ostatním souvislými vrstevnicemi stejné výšky a popisek by se vypsal jen zřídkakdy. U vlnitých terénů by to byl veliký problém. Toto rozdělení na souvislé vrstevnice se děje pomocí funkce *chainEdges*, která na principu postupného zřetězování hran, vrátí souvislé vrstevnice. Druhou částí prosté odfiltrování hran pro zadaný vzdálenostní práh, aby popisky nebyly všude (na každé hraně). Třetí částí uvážení vlivu sklonu a následné zorientování popisku směrem vzrůstající výšky. To už není provedeno funkcí, ale při vykreslování popisků. Byl tu totiž problém, že C++ ignoroval změnu orientace hrany a ukládal hranu v nějakém výchozím režimu, který tuto změnu při vykreslování ignoroval.

#### Implementace *getLabelContours*

1. *ContoursMain = getContoursMain(Contours),* vytvoř hlavní vrstevnice ze všech vrstevnic
2. *For c: ContoursMain*
3. *ContinuousContours = chainEdges(ContoursMain),* vrať souvislé vrstevnice
4. *DistancedEdges = getDistancedEdges(ContinuousContours),* vrať vzdálenostně odfiltrované hrany
5. *Labels* *DistancedEdges,* přidej hrany do seznamu hran s popisky

#### Implementace *chainEdges*

Vstup: *Edges =* {e1, e2, …}

1. *For e: Edges*
2. *If* EdgesChained is empty
3. EdgesChained {e} přidej nový vektor s hranou e
4. *Else*
5. *For vektor:* EdgesChained
6. *For e\_ch: vektor*
7. *If (e ~ e\_ch),* pokud se hrany dotýkají
8. *Vektor\_ids id,* přidejid vektoru, kde existuje styk
9. *If (Vektor\_ids is empty)*
10. EdgesChained {e} přidej nový vektor s hranou e
11. *Else if (Vektor\_ids.size == 1)*
12. EdgesChained[*id*] {e} přidej hranu e
13. *Else*
14. *Id0* = *Vektor\_ids*[*0*]
15. EdgesChained[*id0*] {e} přidej hranu e
16. *Vektor\_ids – id,* odeber první index
17. While *Vektor\_ids* not empty
18. *Id* = *Vektor\_ids*[*0*]
19. EdgesChained[*Id0*] EdgesChained[*Id*], přidej vektor hran, který kde je styk hran
20. EdgesChained[*Id*], odeber připojený vector hran
21. *Vektor\_ids – id,* odeber index *id*

#### Implementace *getDistancedEdges*

1. *DistancedEdges random e,* přidej libovolnou hranu
2. *For e:Edges*
3. *If (dist(e,* ∀e ϵ *DistancedEdges) > t),* pokud je hrana dostatečně daleko od všech ve vektoru distancovaných hran
4. *DistancedEdges e,* přidej hranu

#### Implementace *orientování popisku do kopce*

1. *For edge:Edges,* kde *edge* = {*s*, *e*}, *z* – výška této hrany (vrstevnice)
2. *i\_left = getDelaunayPoint(s, e, points)*, získej nejbližší bod nalevo od hrany
3. *i\_right = getDelaunayPoint(e, s, points)*, získej nejbližší bod nalevo od hrany
4. *If* (*i*\_*left != -1 && i\_right != -1*), pokud aspoň jeden nejbližší bod existuje
5. *z\_left = points[i*\_*left].z*, získej výšku bodu nalevo
6. *z\_right = points[i\_right].z*, získej výšku bodu napravo
7. *s =* směrník *e (*funkcí *atan2)*, směrník hrany tedy natočení popisku
8. *If (((z\_left - z) > 0) || ((z\_right - z) < 0)*, pokud hrana směřuje z kopce
9. *s+= 200gon*

## Vstupní data

Vstupními daty pro tuto úlohu je množina bodů. Existují celkem 3 způsoby, jak tyto body vykreslit na obrazovku (Canvas):

1. Klikáním myši
2. Generováním terénních tvarů
3. Načtením ze souboru CSV

### Klikání myši

Prvním způsobem, jakým dostat do aplikace data je klikáním do . Po kliknutí do se uloží souřadnice *x, y*. Souřadnice *z* je vygenerována generátorem náhodných čísel v rozmezí .

### Generování terénních tvarů

Druhou možností vstupních dat je generátor terénních tvarů (princip vysvětlen v předchozí kapitole). Ve widgetu lze zvolit jeden ze tří terénních tvarů a po kliknutí na tlačítko se body objeví ve . Vygenerované body už mají spočtenou souřadnici odpovídajícího tvaru terénu.

### Načtení ze souboru CSV

Poslední možností vstupních dat jsou data externí. Pro tento vstup se nachází v aplikaci tlačítko . Po kliknutí na toto tlačítko se otevře průzkumník souborů, ve kterém uživatel zvolí cestu k vstupnímu soboru.

Vstupní soubor musí být v textovém souboru ve formátu . Požadavkem je, aby na prvním řádku byla hlavička souboru:

*.*

V tomto pořadí jsou následně řazeny hodnoty bodů terénu. Oddělovačem jednotlivých hodnot na řádku musí být čárka.

Ukázková vstupní data jsou v repositáři ve složce . Složka obsahuje čtyři soubory: potok\_klukovice, potok\_radic, test a vyskopis\_10. První dva soubory jsou z geodetického měření, třetí soubor na testování čtení souboru a posledním souborem jsou výškopisná data poskytována službou .

Proces načítání můžeme rozdělit na dvě hlavní části, a to načtení souřadnic z CSV souboru a následná transformace na Canvas.

#### Načtení ze souboru

Princip této části je vysvětlen v úvodu této podkapitoly, kde je stěžejním prvkem, aby data byla v pravoúhlém systému XYZ, a pořadí dat ve vstupním CSV, jinak následná transformace neproběhne správně a data se zobrazí zdeformovaně.

#### Transformace dat

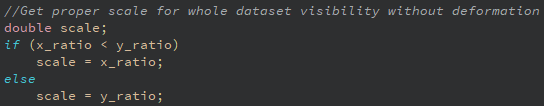
Jelikož data mohou být v různých souřadnicových systémech, je nutné je transformovat, pokud jsou v pravoúhlém systému. Transformační klíč obsahuje pouze dva parametry. Je to posun a měřítko.

#### Měřítko

Měřítko je spočteno poměrem šířky (resp. dély) zobrazovacího okna (Canvasu) a šířky (resp. dély) datasetu (minmax boxu).



Aby nedošlo k deformaci poměru stran, je z uvedených poměrů *x* a *y* rozměrů vzat do transformace menší z nich.



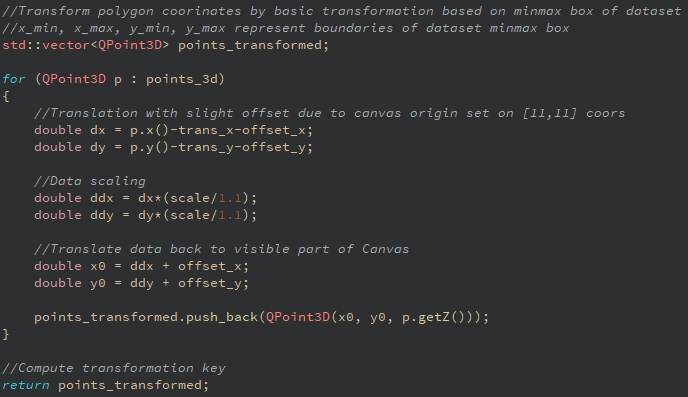
#### Posun

Posun je spočten posunem počátku datasetu vůči zobrazovacímu oknu. Počátky jsou v obou případech definovány levým minimálními souřadnicemi, tedy vzhledem k orientaci souřadných systémů se jedná o horní levé rohy.



#### Výsledná transformace a vliv posunutého počátku Canvasu

Transformace je realizována funkcí *transformPoints* z třídy *Algorithms*. Zde je potřeba zmínit zvláštní pozici počátku Canvasu, který je lokalizován na souřadnicích [x,y] = [11,11]. Tento posun je počátku je v transformaci potřeba uvážit.



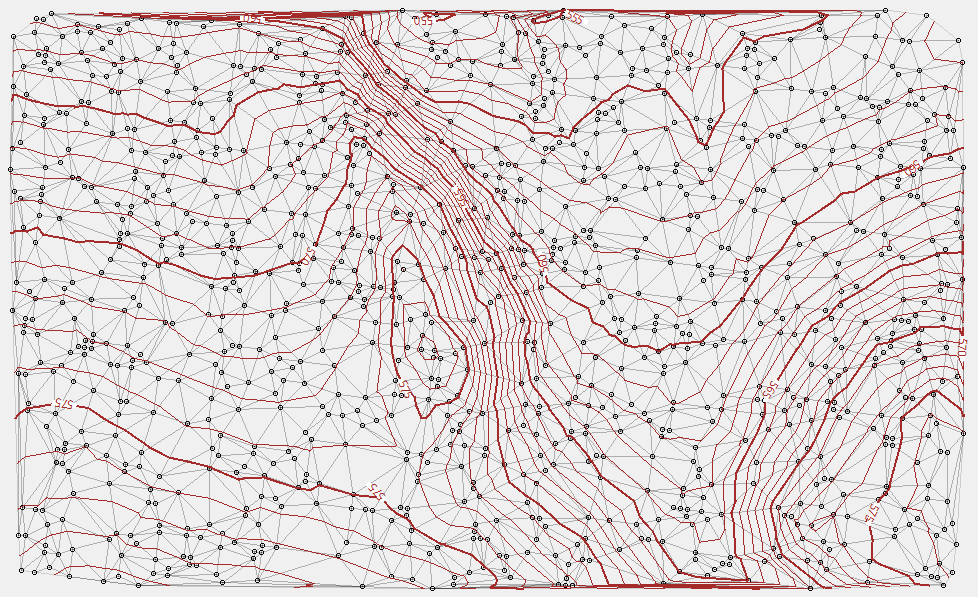
Jak je na obrázku vidět, data jsou nejdříve posunuta (parametr *trans*) s uvážením posunu počátku (parametr *offset*). Poté jsou délkově redukována měřítkem (parametr *scale*) a nakonec pro viditelnost dat znovu posunuta o ofset počátku.

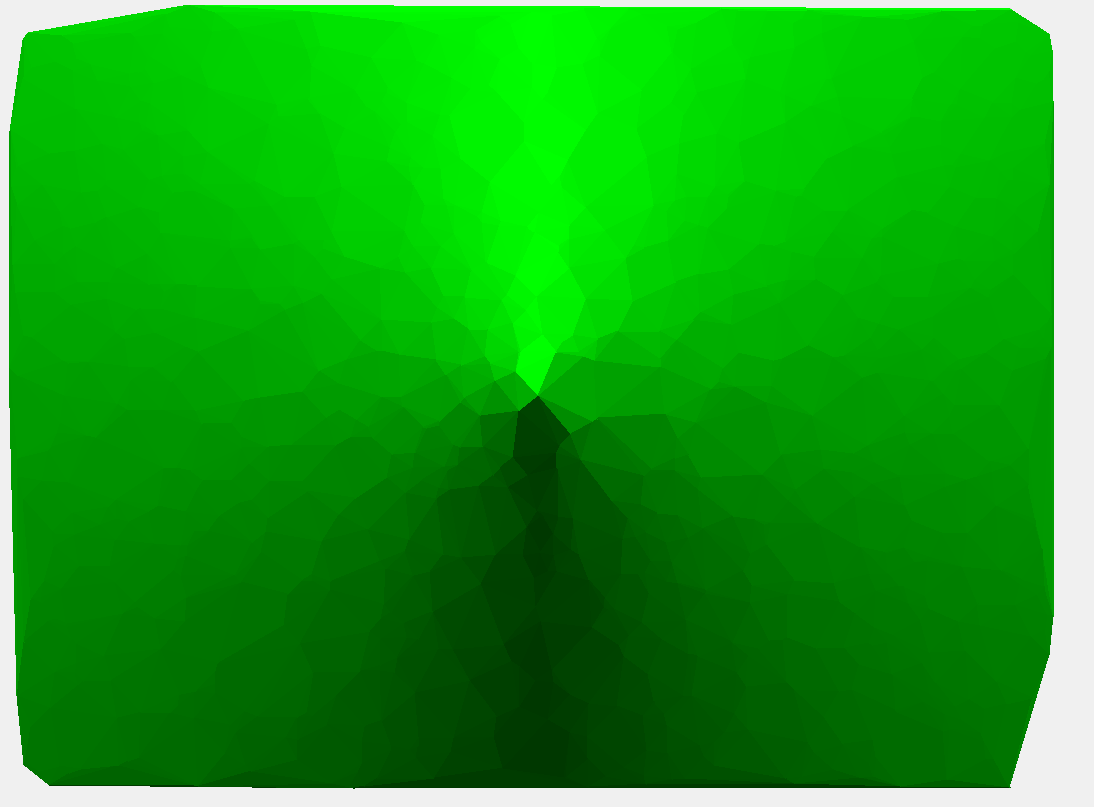
## Výstupní data

Aplikace slouží především k zobrazení výsledků analýzy terénu v .

Mohla by nastat situace, že by si uživatel mohl chtít výsledek uložit. Pro tento případ je zde tlačítko . Po kliknutí se otevře průzkumník souborů, v němž uživatel ukáže, kam by chtěl uložit výstup. Poté je soubor uložen ve formátu .

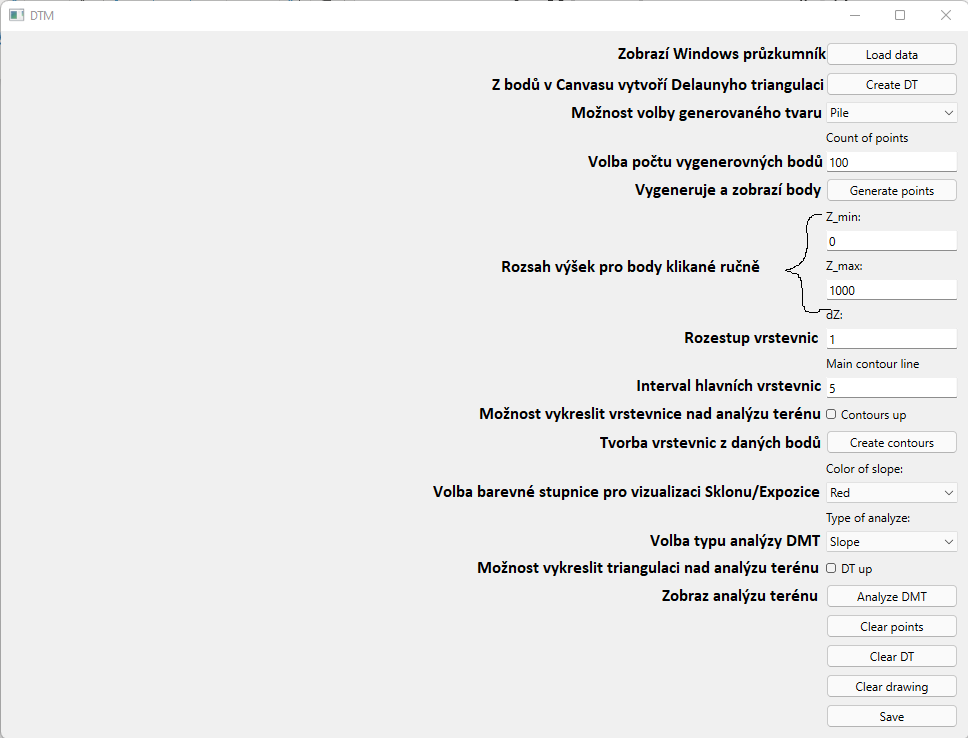
### Ukázky výstupů





## Vzhled aplikace

Po spuštění aplikace se objeví následující okno:



## Dokumentace

### Třída *Algorithms*

1. double pointDist(QPoint3D &p1, QPoint3D &p2);

* vrací vzdálenost dvou bodů

1. *int getPointLinePosition(QPoint &a,QPoint &p1,QPoint &p2)*

* analyzuje vzájemný vztah bodu a přímky

1. tuple<QPoint3D,double> getCircleCenterAndRadius(QPoint3D &p1,QPoint3D &p2,QPoint3D &p3);

* vrací střed kruhu a jeho poloměr

1. int getDelaunayPoint(QPoint3D &s,QPoint3D &e,std::vector<QPoint3D> &points);

* vrací index Delaunayho bodu v rámci vektoru bodů

1. int getNearestPoint(QPoint3D &p, std::vector<QPoint3D> &points);

* vrací index nejbližšího bodu k bodu p

1. vector<Edge> dT(std::vector<QPoint3D> &points);

* vytvoří DT ze vstupních bodů

1. void updateAEL(Edge &e, std::list<Edge> &ael);

* aktualizuje hranu v listu hran

1. double getSlope(QPoint3D &p1, QPoint3D &p2, QPoint3D &p3);

* vrací hodnotu sklonu trojúhelníku

1. double getExposition(QPoint3D &p1, QPoint3D &p2, QPoint3D &p3);

* vrátí hodnotu expozice trojúhelníku

1. std::vector<QPoint3D> generatePile(std::vector<QPoint3D> &points);

* vygeneruje z souřadnice pro kupu

1. int findMaxZ(std::vector<QPoint3D> &points);

* vrátí největší z souřadnici

1. int findMinZ(std::vector<QPoint3D> &points);

* vrátí nejmenší z souřadnici

1. std::vector<QPoint3D> generateRandomPoints(QSize &size\_canvas, int n);

* vrátí n náhodných bodů v canvasu

1. std::vector<QPoint3D> generateSaddle(std::vector<QPoint3D> &points);

* vygeneruje z souřadnice pro sedlo

1. std::vector<QPoint3D> generateRidge(std::vector<QPoint3D> &points);

* vygeneruje z souřadnice pro hřbet

1. QPoint3D getContourPoint(QPoint3D &p1, QPoint3D &p2, double z);

* vrací interpolovaný bod

1. std::vector<Edge> getContourLines(std::vector<Edge> &dt, double zmin, double zmax, int dz);

* vrací hrany vrstevnic

1. std::map<double, std::vector<Edge>> getMainContourLines(std::vector<Edge> &contours, int contour\_interval, double dz);

* vrací hlavní vrstevnice rozdělené podle výšky

1. std::vector<QPoint3D> transformPoints(std::vector<QPoint3D> &points\_3d, double &trans\_x, double &trans\_y, double &scale, int &offset\_x, int &offset\_y);

* transformuje vektor bodů podle zadaných parametrů transformace

1. std::vector<Edge> getLabeledContours(std::vector<Edge> &contours, std::vector<Edge> &contours\_main, int contour\_interval, double dz, double &distance\_threshold, double &length\_threshold, double &offset);

* vrátí vektor hran, na kterých se vypíšou popisy vrstevnic

1. std::vector<Edge> getDistancedEdges(std::vector<Edge> &edges, double &threshold);

* vrátí vektor hran splňující vzdálenostní rozestup

1. std::vector<Edge> chainEdges(std::vector<Edge> &edges);

* vrátí souvislou vrstevnici (zřetězené hrany)

1. double getMinSlope(std::vector<Triangle> &triangles);

* vrací nejmenší hodnotu sklonu

1. double getMaxSlope(std::vector<Triangle> &triangles);

* Vrací maximální hodnotu sklonu

### Třída *CSV*

1. *vector<QPolygon> read\_csv(string &filename)*

* načte řádky vstupního *csv* souboru

1. std::vector<QPoint3D> getPoints3D(std::vector<std::vector<std::string>> &csv\_content, double &x\_min, double &x\_max, double &y\_min, double &y\_max);

* vrací vektor QPoint3D z načtených řádek CSV

### Třída *Draw*

1. void paintEvent(QPaintEvent \*event)

* vykreslí polygony na Canvas

1. void mousePressEvent(QMouseEvent \*event)

* vrátí souřadnice kurzoru po kliknutí na Canvas

1. void clearPoints()

* vyčistí vektor bodů

1. void clearDT()

* vyčistí vektor DT

1. void clearContours()

* vyčistí vektor souřadnic

1. void clearTriangles()

* vyčistí vektor trojúhelníků

1. void drawCSVPoints(std::vector<QPoint3D> &points\_3d);

* vykreslí načtené body

### Třída *Widget*

1. void on\_pushButton\_2\_clicked();
2. void on\_pushButton\_clicked();
3. void on\_pushButton\_cleardt\_clicked();
4. void on\_lineEdit\_editingFinished();
5. void on\_lineEdit\_2\_editingFinished();
6. void on\_lineEdit\_3\_editingFinished();
7. void on\_pushButton\_3\_clicked();
8. void on\_pushButton\_4\_clicked();
9. void on\_lineEdit\_4\_editingFinished();
10. void on\_pushButton\_5\_clicked();
11. void on\_pushButton\_7\_clicked();
12. void on\_lineEdit\_5\_editingFinished();
13. void on\_pushButton\_Load\_clicked();
14. void on\_pushButton\_6\_clicked();
15. void on\_checkBox\_clicked();
16. void on\_checkBox\_2\_clicked();
17. void on\_checkBox\_2\_stateChanged(int arg1);
18. void on\_save\_clicked();
19. void on\_save\_canvas\_clicked();
20. void on\_dmtUP\_clicked();

## Závěr

Výsledkem je aplikace s grafickým uživatelským rozhraním, která je uvolněna pod licencí GNU GPL. Aplikace je psána v jazyce C++. Pro grafické uživatelské rozhraní byl použit framework QT.

Aplikace umožňuje nahrát body z textového souboru, naklikat si vlastní nebo použít generátor terénních tvarů. Pro tvorbu triangulace byl zvolena metoda inkrementální konstrukce DT. Výsledek analýzy terénu lze ukládat ve formátu .

## Zdroje

*[1] Rovinné triangulace a jejich využití* [online]. [cit. 2021-12-08]. Dostupné z: https://web.natur.cuni.cz/~bayertom/images/courses/Adk/adk5.pdf

Jakub Šimek, Jan Kučera