

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta stavební



155ADKG Algoritmy v digitální kartografii

## Digitální model terénu a jeho analýzy

Bc. Lukáš Kettner Bc. Martin Hulín  
3.12.2019

# Obsah

<b>1</b>	<b>Zadanie</b>	<b>3</b>
1.1	Bonusové úlohy . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Popis a rozbor problému</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Popis použitých algoritmov</b>	<b>5</b>
3.1	Delaunay triangulácia . . . . .	5
3.1.1	Vlastnosti Delaunay triangulácie . . . . .	5
3.1.2	Implementácia metódy . . . . .	5
3.1.3	Problematické situácie . . . . .	6
3.2	Vrstevnice . . . . .	6
3.2.1	Implementácia metódy . . . . .	6
3.3	Sklon terénu . . . . .	7
3.3.1	Implementácia metódy . . . . .	7
3.4	Expozícia . . . . .	7
3.4.1	Implementácia metódy . . . . .	7
<b>4</b>	<b>Bonusové úlohy</b>	<b>8</b>
4.1	Triangulace nekonvexní oblasti zadané polygonem . . . . .	8
4.2	Výber farebných stupníc pre vizualizáciu sklonu a expozície . .	8
4.3	Automatický popis vrstevnic . . . . .	8
4.4	Automatické generovanie terénnych tvarov . . . . .	9
<b>5</b>	<b>Vstupné data</b>	<b>10</b>
<b>6</b>	<b>Výstup aplikácie</b>	<b>11</b>
<b>7</b>	<b>Dokumentácia</b>	<b>11</b>
7.1	Trieda Algorithms . . . . .	11
7.1.1	Metódy . . . . .	11
7.2	Trieda Draw . . . . .	13
7.2.1	Členské premenné . . . . .	13
7.2.2	Metódy . . . . .	14
7.3	Trieda Edge . . . . .	16
7.3.1	Členské premenné . . . . .	16
7.3.2	Metódy . . . . .	16
7.4	Trieda QPoint3D . . . . .	16

7.4.1	Členské premenné . . . . .	16
7.4.2	Metódy . . . . .	17
7.5	Trieda Triangle . . . . .	17
7.5.1	Členské premenné . . . . .	17
7.5.2	Metódy . . . . .	17
7.6	Trieda SortByX . . . . .	18
7.7	Trieda Widget . . . . .	18
7.7.1	Členské premenné . . . . .	18
7.7.2	Metódy . . . . .	18
<b>8</b>	<b>Záver</b>	<b>20</b>

# 1 Zadanie

Vytvorte aplikáciu s grafickým rozhraním, ktorá vygeneruje digitálny model terénu. Vstup do aplikácie : množina bodov  $P = \{p_1, \dots, p_n\}$ ,  $p_i = \{x_i, y_i, z_i\}$  .

Výstup aplikácie : polzedrický DMT nad množinou  $P$  reprezentovaný vrstevnicami, ktorý je doplnený vizualizáciou sklonu trojuholníkov a ich expozíciou  $H(P)$ .

Metódou inkrementálnej konštrukcie vytvorte nad množinou  $P$  vstupných bodov 2D Delaunay trianguláciu. Ako vstupné dáta použite existujúce geodetické dáta (minimálne 300 bodov) alebo navrhните algoritmus pre generovanie syntetických vstupných dát, ktoré budú predstavovať významné terénne tvary (kopa, odpočinok, chrbát, údolie, atď. ).

Nad vzniknutou trianguláciou vygenerujte DMT a prevedte analýzy :

- Vizualizáciu s rozlíšením zvýraznených vrstevníc
- Analyzujte sklon DMT, jednotlivé trojuholníky vizualizujte v závislosti na sklone
- Analyzujte expozíciu DMT, jednotlivé trojuholníky vizualizujte v závislosti na ich expozícii ku svetovej strane

Zhodnoťte výsledný DMT z kartografického hľadiska. Uvážte prípady, kedy 2D Delaunay triangulácia nebude dávať vhodné výsledky.

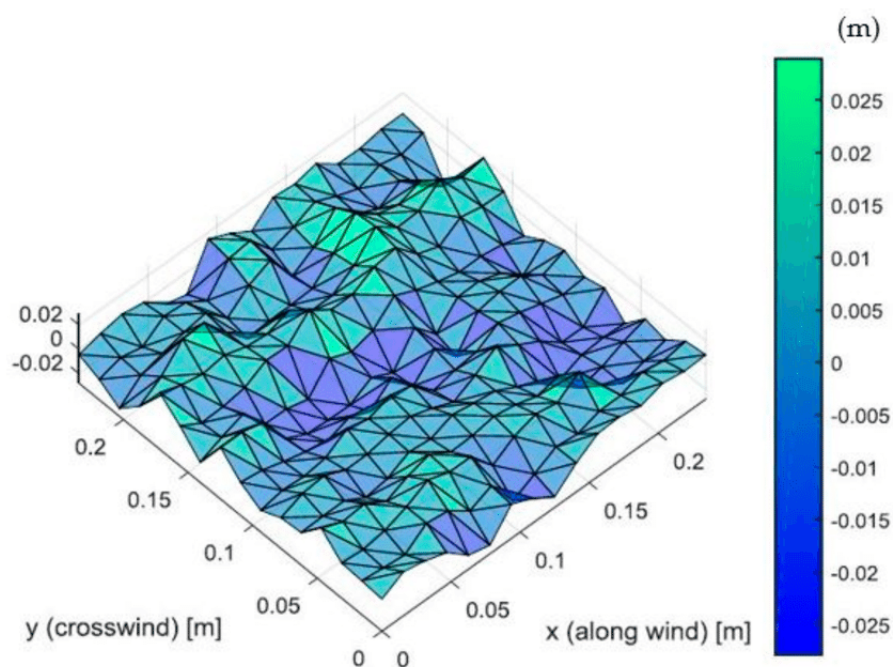
## 1.1 Bonusové úlohy

V rámci úlohy sú vypracované tieto bonusové úlohy

- Triangulace nekonvexní oblasti zadané polygonem
- Výber farebných stupníc pre vizualizáciu sklonu a expozície
- Automatický popis vrstevníc
- Algoritmus pre automatické generovanie terénnych tvarov

## 2 Popis a rozbor problému

Problematika úlohy sa týka tvorby digitálneho modelu terénu. Pri vstupe máme zadanú množinu bodov  $P = \{p_1, \dots, p_n\}$ ,  $p_i = \{x_i, y_i, z_i\}$ . Nad touto množinou je potrebné vytvoriť trojuholníkovú sieť. Túto sieť je potrebné vytvárať pomocou Delaunay triangulácie. Po korektnom vyvorení triangulačnej siete je potrebné vygenerovať vrstevnice, určiť sklon digitálneho modelu terénu a expozíciu jednotlivých trojuholníkov triangulácie.



Obr. 1: 3D model vodného povrchu vytvorený pomocou Delaunay triangulácie

## 3 Popis použitých algoritmov

### 3.1 Delaunay triangulácia

Tento algoritmus predstavuje jeden z najpoužívanějších postupov pre tvorbu digitálneho modelu terénu. Triangulácia je realizovaná metódou inkrementálnej konštrukcie. V algoritme sa zavádza kritérium postupného hľadania bodu, ktorý k bodom hrany vytvorí minimálnu opísanú kružnicu. Takýto bod sa vždy hľadá v ľavej polorovine orientovaných hran.

#### 3.1.1 Vlastnosti Delaunay triangulácie

1. Vnútri písanej kružnice každého trojuholníku sa nenachádza žiadny iný bod
2. Maximalizuje minimálny uhol v trojuholníku
3. Je lokálne aj globálne optimálna voči kritériu minimálneho uhlu
4. Je jednoznačná, pokiaľ na kružnici ležia 3 body

#### 3.1.2 Implementácia metódy

1. Zorad' vstupnú množinu bodov podľa súradnice X
2. Nájdi bod  $p_1$  s minimálnou súradnicou X
3. Nájdi najbližší bod  $||p_1 - q|| = \min$
4. Vytvor hranu  $e = (p_1, p_2)$
5. Nájdi Delaunay bod :  $p_{\min} = \operatorname{argmin}_{p_i \in \sigma_L(e)} r'(k_i), k_i = (a, b, p_i), e = (a, b)$
6. Pokiaľ taký bod nie je nájdený, zmeň orientáciu a opakuj hľadanie
7. Vytvor zvyšné hrany trojuholníku  $e_2 = (p_1, p_{\min}), e_3 = (p_{\min}, p_1)$
8. Pridanie hrán do AEL  $AEL \leftarrow e, AEL \leftarrow e_2, AEL \leftarrow e_3$
9. Pridanie hrán do DT  $DT \leftarrow e, DT \leftarrow e_2, DT \leftarrow e_3$

10. Pokiaľ AEL nie je prázdny :
11. Vezmi prvú hranu z AEL  $AEL \longrightarrow e, e = (p_1, p_2)$
12. Prehod' orientáciu tejto hrany  $e = (p_2, p_1)$
13.  $p_{min} = argmin_{p_i \in \sigma_L(e)} r'(k_i), k_i = (a, b, p_i), e = (a, b)$
14. Ak existuje takýto bod if  $\exists p_{min}$  :
15. Vytvor zvyšné hrany trojuholníku  $e_2 = (p_1, p_{min}), e_3 = (p_{min}, p_1)$
16. Pridaj hranu do DT, no nie do AEL  $DT \longleftarrow e$
17.  $add(e_2, AEL, DT), add(e_3, AEL, DT)$

### 3.1.3 Problematické situácie

Problematickou situáciou sú .....

## 3.2 Vrstevnice

Algoritmus pre generovanie vrstevníc využíva lineárnu interpoláciu. Pri lineárnej interpolácii sa predpokladá konštantný spád medzi podrobnými bodmi  $p_i$ .

### 3.2.1 Implementácia metódy

1. Pre všetky hrany trojuholníku platí:
2. Hrana patrí rovine vrstevnice  $(z - z_i) * (z - z_{i+1}) < 0 \longrightarrow e_i \cap \rho$
3. Hrana nepatrí rovine vrstevnice  $(z - z_i) * (z - z_{i+1}) > 0 \longrightarrow e_i \notin \rho$
4. Hrana je prienikom roviny vrstevnice  $(z - z_i) * (z - z_{i+1}) = 0 \longrightarrow e_i \in \rho$
5. Výpočet súradníc priesečníku

6.

$$x = \frac{(x_2 - x_1)}{(z_2 - z_1)}(z - z_1) + x_1,$$

7.

$$y = \frac{(y_2 - y_1)}{(z_2 - z_1)}(z - z_1) + y_1.$$

8. Vytvor hranu, ktorá tvorí vrstevnicu

### 3.3 Sklon terénu

Analýza sklonu terénu je jednou z najčastejších úloh vykonávaných nad DMT. Využíva sa v rozličných oblastiach pre analýzu odtoku sedimentov, zosuvu pôdy, či projektovania líniových stavieb. Sklon je definovaný ako uhol medzi normálovým vektorom a normálovým vektorom trojuholníka. Pre jeho výpočet je potrebné spočítať smerové vektory v trojuholníkoch. Normálový vektor  $(0, 0, 1)$  má normu o veľkosti 1. Tým pádom vo funkcii arccos zostáva len z-ová časť normálového vektoru. Sklon sme vizualizovali v odtieňoch šedi a odtieňoch základných farieb RGB.

#### 3.3.1 Implementácia metódy

$$n = (0, 0, 1)$$

$$n_t = \vec{u} \times \vec{v}$$

$$\varphi = \arccos\left(\frac{n_t \cdot n}{|n_t||n|}\right)$$

### 3.4 Expozícia

Expozícia je definovaná ako orientácia jednotlivých trojuholníkov k svetovým stranám.

#### 3.4.1 Implementácia metódy

1. Pre všetky trojuholníka triangulácie vypočítaj :
2. X a Y zložku normálového vektora  $n_x = (u_y * v_z - u_z * v_y), n_y = -(u_x * v_z - u_z * v_x)$
3. Výpočet expozície

$$A = \arctan 2\left(\frac{n_x}{n_y}\right);$$



## 4 Bonusové úlohy

Následující odstavce upřesňují způsob řešení jednotlivých bonusových úloh.

### 4.1 Triangulace nekonvexní oblasti zadané polygonem

Po označení checkboxu s popisem *only inside polygon* dojde k přepnutí kreslicího módu z bodů na polygon. Postupným klikáním je možné vybrat zájmovou oblast pro provedení triangulace. Po stisknutí tlačítka *Create DT* dojde k výběru bodů pomocí Winding Number algoritmu a výsledná triangulace je provedena jen s body, které leží uvnitř polygonu nebo na jeho hraně.

### 4.2 Výber farebných stupníc pre vizualizáciu sklonu a expozície

V rámci bonusových úloh bola riešená možnosť výberu farebných stupníc pre analýzu sklonu a expozície. Užívateľ má pre analýzu sklonu na výber zo základných farieb RGB (červená, zelená, modrá) alebo základnú šedú farbu. Sklon je následne vizualizovaný v odtieňoch vybranej farby.

Pre analýzu expozície má užívateľ k dispozícii 5 farebných stupníc. Defaultna farebná stupnica je vytvorená podľa stupnice programu Argis Pro. Ďalšie tri stupnice sú v sýtych farbách, odstupňované podľa rozsahu veľkosti sklonu na danom území. Poslednou stupnicou je takzvaná Sun color stupnica, ktorá zobrazuje orientáciu k svetovým stranám na základe „intuitívnej“ farby slnka ( sever - biela, východ - žltá, juh - červená, západ - oranžová).

### 4.3 Automatický popis vrstevnic

Do pôvodného algoritmu pre výpočet vrstevníc sme zakomponovali vektor metadat, do ktorého sa ukladala výška vrstevnice. Následne z tohto vektoru boli pre hlavné vrstevnice pridané výškové informácie. Tento spôsob nie je v súhlade s katografickými zásadami (orientácia, vhodné rozmiestnenie a umiestnenie výškových kót).

Pri určitých typoch terénu sa popis vrstevnice zobrazí mnohonásobne a tým znemožní správnu vizualizáciu hlavnej vrstevnice. Riešením by bola úprava algoritmu tak aby rešpektoval kartografické zásady. Mohlo by to byť dosiahnute implementáciou bufferu, prepojením algoritmu pre výpočet sklonu s algoritmom výpočtu a vykreslenia vrstevníc, či obmedzením na

počet vykreslovania popisu vrstevníc. Vzhľadom na časové možnosti autorov aplikácie nebol tento problém riešený.

#### 4.4 Automatické generovanie terénnych tvarov

Pro správné fungování aplikace je nezbytné zvětšení okna aplikace na celou obrazovku. Tento problém se nám nepodařilo odstranit. V aplikaci je možné vygenerovat čtyři terénní tvary:

- kupu
- údolí
- hřbet
- spočinek/plošinku

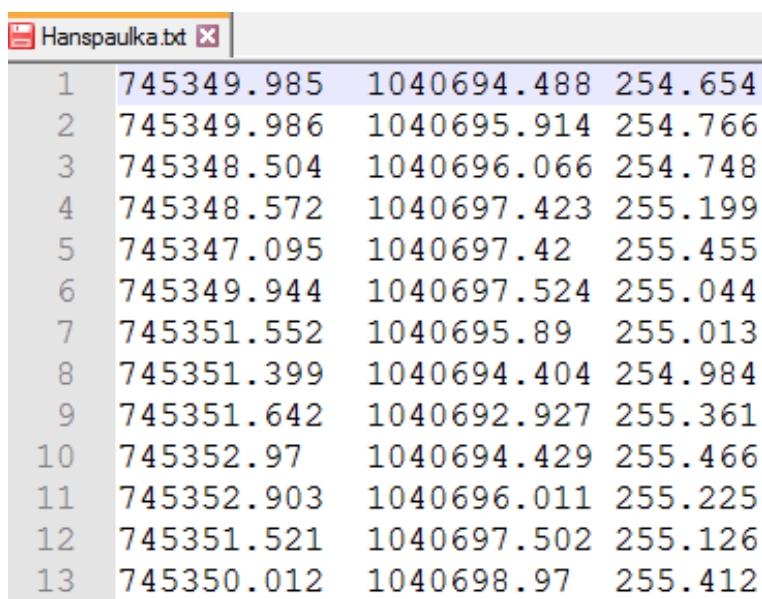
Generování kupy je založené na postupném generování elips se zmenšující se hlavní a vedlejší poloosou v intervalu celého kruhu. Všechny body jedné elipsy mají vždy stejnou souřadnici  $z$ , která pravidelně narůstá o hodnotu 50.

Tvar údolí a hřbetu je velmi podobný. Proto i generování se liší jen v detailu. Každá vrstevnice je rozdělena na tři části – rovný začátek, tvar údolí nebo hřbetu a rovný konec. Jednotlivé části na sebe plynule navazují. Body jsou generované v pravidelném rastru a stěžejní je hodnota souřadnice  $z$ . V případě údolí je hodnota počítána pomocí goniometrické funkce sinus. Pro terénní tvar hřbetu byla využita naopak funkce cosinus.

Posledním možným tvarem je spočinek. Tam je generování opět rozděleno na dílčí části. Konkrétně na elipsu, kružnici a rovné úseky. Generování elips a kružnic probíhá pouze v intervalu  $\frac{\pi}{2}$  až  $\frac{3\pi}{2}$ . Na půlkruhy a půlelipsy opět navazují rovné čáry. Souřadnice  $z$  se zvětšuje o hodnotu 5 každým krokem směrem "vzhůru".

## 5 Vstupné data

Vstupnými dátami pre tvorbu DMT sú body so súradnicami Y, X, Z. Tieto body je možné v aplikácii ručne naklikáť, automaticky vygenerovať alebo nahrať vo formáte \*.txt . Súbor, ktorý užívateľ chce importovať do aplikácie musí byť vo formáte Y, X, Z bez čísla bodu.



1	745349.985	1040694.488	254.654
2	745349.986	1040695.914	254.766
3	745348.504	1040696.066	254.748
4	745348.572	1040697.423	255.199
5	745347.095	1040697.42	255.455
6	745349.944	1040697.524	255.044
7	745351.552	1040695.89	255.013
8	745351.399	1040694.404	254.984
9	745351.642	1040692.927	255.361
10	745352.97	1040694.429	255.466
11	745352.903	1040696.011	255.225
12	745351.521	1040697.502	255.126
13	745350.012	1040698.97	255.412

Obr. 2: Ukážka vstupného formátu súradníc

## 6 Výstup aplikácie

## 7 Dokumentácia

### 7.1 Trieda Algorithms

Triedu Algorithms sme použili pre deklarovanie funkcií pre výpočtové algoritmy tvorby DMT.

#### 7.1.1 Metódy

##### getPointLinePosition

- je pomocnou metódou pre metódu positionPointPolygonWinding. Slúži na určenie polohy bodu voči priamke. Jej návratovou hodnotou je integer.
- na vstupe má : súradnice určovaného bodu  $q$  , súradnice bodov priamky  $p_1 p_2$
- na výstupe hodnoty :
  - 1 – bod sa nachádza na priamke
  - 0 – bod sa nachádza vpravo od priamky
  - 1 – bod sa nachádza vľavo od priamky

##### getCircleRadius

- Slúži na výpočet polomeru kružnice tvorenej troma vstupnými bodmi. Návratová hodnota je double.
- na vstupe má : súradnice troch bodov  $p_1, p_2, p_3$
- na výstupe hodnotu polomeru kružnice.

##### getNearestPoint

- Slúži na nájdenie najbližšieho indexu k bodu  $p$ .
- na vstupe má : súradnice bodu  $p$  a vektor bodov.
- na výstupe má index najbližšieho bodu k bodu  $p$ .

##### getDistance

- Slúži na výpočet vzdialenosti medzi dvom bodmi. Návratová hodnota je double.
- na vstupe má : súradnice bodov medzi ktorými počítame vzdialenosť.
- na výstupe má vzdialenosť medzi bodmi.

#### getDelaunayPoint

- Slúži na nájdenie indexu bodu, ktorý spĺňa podmienky Delaunay triangulácie.
- na vstupe má : súradnice bodov začiatku a koncu hrany, vektor bodov
- na výstupe index bodu, ktorý spĺňa podmienky Delaunay triangulácie.

#### std::vector<Edge>DT

- Metóda vytvára nad vektorom hran Delaunay trianguláciu.

#### QPoint3D getContourPoint

- Metóda slúžia k výpočtu priesečníku hrany a rovinou Z. Vstupným typom je QPoint3D.
- na vstupe sú súradnice bodov 3D hrany p1 a p2, rovina definovaná z súradnicou
- na výstupe sú súradnice priesečníka.

#### std::vector<Edge>createContours

- Metóda slúži k výpočtu vrstevníc.
- na vstupe sú vektor hran, rozsah vrstevníc (min/max) a ich krok, vektor metadát do ktorých sa ukladá informácia o výške vrstevnice
- na výstupe je vektor hran vrstevníc.

#### getSlope

- Slúži na výpočet sklonu trojuholníku, ktorý spĺňa podmienky Delaunay triangulácie. Návratovým typom je double.

- na vstupe má : súradnice bodov trojuholníku.
- na výstupe hodnotu sklonu.

getAspect

- Slúži na výpočet orientácie / expozície trojuholníku, ktorý spĺňa podmienky Delaunay triangulácie. Návrátovým typom je double.
- na vstupe má : súradnice bodov trojuholníku.
- na výstupe hodnotu expozície.

std::vector<Triangle>analyzeDMT

- Metóda slúži k výpočtu trojuholníkov Delaunay triangulácie, k výpočtu ich sklonu a expozície. Návrátovým typom je vektor trojuholníkov.
- na vstupe je vektor hran Delaunay triangulácie
- na výstupe je vektortrojuholníkov Delaunay triangulácie, sklon, expozícia.

std::vector<QPoint3D>importMeasurement

- Metóda slúži k importu \*.txt súboru obsahujúceho súradnice Y, X, Z

std::vector<QPoint3D>generateShapes

- Metóda slúži ku generovaniu prírodných tvarov.

## 7.2 Trieda Draw

Trieda Draw slúži ku grafickému vykresleniu všetkých premenných.

### 7.2.1 Členské premenné

std::vector<QPoint3D>points

- vektor bodov

std::vector<Edge>dt

- vektor hran Delaunay triangulácie

std::vector<Edge>contours

- vektor hran vrstevníc

std::vector<double>metadata

- vektor metadat vrstevníc - výšok vrstevníc

std::vector<Triangle>dmt

- vektor tvorený trojuholníkmi Delaunay triangulácie

int dz

- rozostup vrstevníc

int colorScale

- typ farebnej škály

bool aspect, slope

- vykreslenie sklonu a expozície

### 7.2.2 Metódy

paintEvent

- slúži k vykresleniu naklikaných, načítaných a vygenerovaných bodov, vykresleniu Delaunay triangulácie, sklonu, expozície a vrstevníc. Návrátovým typom je void.

void mousePressEvent

- slúži k vykresleniu bodu stlačením tlačidla myši, v okamihu stlačenia tlačidla na myši sa uložia súradnice bodu do vektoru points. Návrátovým typom je void.

void clearPoints

- slúži k vymazaniu množiny bodov. Návrátovým typom je void.

#### void clearDT

- slúži k vymazaniu Delaunay triangulácie. Návrátovým typom je void.

#### void clearContours

- slúži k vymazaniu vrstevníc. Návrátovým typom je void.

#### void clearSlope

- slúži k vymazaniu sklonu. Návrátovým typom je void.

#### void clearAspect

- slúži k vymazaniu expozície. Návrátovým typom je void.

#### void clearPolygon

- slúži k vymazaniu bodů polygonu. Návrátovým typom je void.

#### getPoints

- slúži k vrátenie členskej premennej points

#### getDT

- slúži k vrátenie členskej premennej dt

#### getDTSize

- slúži k vrátenie veľkosti členskej premennej dt

#### setPoints

- slúži k priradeniu členskej premennej points

#### setDt

- slúži k priradeniu členskej premennej dt

#### setDMT

- slúži k priradeniu členskej premennej dmt



setContours

- slúži k priradeniu členských premenných contours, metadata,  $d_z$

setSlope , set Aspect

- slúžia k vykreslovaniu sklonu a expozície

setColorScale

- slúži k nastaveniu farebnej škály vykreslovania sklonu a expozície

## 7.3 Trieda Edge

Je to definície datového typu Edge. Reprezentuje usporiadanú dvojicu vrcholov, ktoré tvoria orientovanú hranu (vrcholy sú počiatkom a koncom hrany).

### 7.3.1 Členské premenné

QPoint 3D s,e

- začiatok hrany s , koniec hrany e

### 7.3.2 Metódy

getStart, getEnd

- slúži k vráteniu počiatočného ú koncového bodu hrany

change Orientation

- slúži k obráteniu orientácie hrany

## 7.4 Trieda QPoint3D

Je to odvodená trieda od triedy QPointF. Pridali sme k nej výškovú súradnicu z.

### 7.4.1 Členské premenné

double z

- výšková súradnica z

### 7.4.2 Metódy

setZ

- slúži k priradeniu hodnoty do členskej premennej z

getZ

- slúži k získaniu súradnice z

## 7.5 Trieda Triangle

Je to definícia novovytvoreného datového typu Triangle. V tejto triede sa ukladá trojica vrcholov tvoriacich trojuholník, sklon a expozícia.

### 7.5.1 Členské premenné

QPoint3D p1, p2, p3

- vrcholy trojuholníka

double slope, aspect

- sklon a expozícia trojuholníka

### 7.5.2 Metódy

Triangle

- slúži k uloženiu trojuholníka definovaného bodmi p1, p2, p3, sklonu a expozície

metódy get

- slúži k získaniu danej premennej

metódy set

- slúži k priradeniu hodnoty k danej premennej

## 7.6 Trieda SortByX

Je to trieda, ktorá obsahuje zorad'ovacie kritérium. Pomocou tejto funkcie zoradíme súbor bodov podľa X súradnice.

## 7.7 Trieda Widget

Trieda Widget obashuje metódy ktoré sú odkazom na sloty umožňujúce vykonávať príkazy z grafického rozhrania aplikácie. Nemajú žiadne vstupné hodnoty, návratovým typom je void.

### 7.7.1 Členské premenné

double Zmin, Zmax, dz

- minimálne a maximálne výsky vstupných bodov

### 7.7.2 Metódy

on\_pushButton\_createDT\_clicked

- tlačidlo **Create DT** po kliknutí naň sa vygeneruje Delauyenova trianguácia

on\_pushButton\_createContours\_clicked

- tlačidlo **Create contours** po kliknutí naň sa vygenerujú vrstevnice s popisom

on\_pushButton\_importMeasurement\_clicked

- tlačidlo **Import Measurement** po kliknutí naň môže užívateľ nahrať \*.txt súbor

on\_pushButton\_clearSelected\_clicked

- tlačidlo **Clear Selected** po kliknutí naň užívateľ vymaže zvolenú časť grafického výstupu

on\_pushButton\_clearAll\_clicked

- tlačidlo **Clear ALL** po kliknutí naň užívateľ vymaže celý Canvas

#### on\_pushButton\_analyze\_clicked

- tlačidlo **Analyze** po kliknutí naň sa vykoná analýza vstupnej množiny bodov pomocou Delaunay triangulácie

#### on\_pushButton\_comboBox\_analyze\_currentTextChanged

- po zvolení výpočtu orientácie sa zmení výber farebnej schémy pre orientáciu

#### on\_pushButton\_generateShape\_clicked

- tlačidlo **Generate Shape** po kliknutí naň môže užívateľ vygeneruje zvolený terénny tvar

## 8 Záver

Výsledkom úlohy je funkčná aplikácia pre tvorbu digitálneho modelu terénu.

## Zoznam obrázkov

1	3D model vodného povrchu vytvorený pomocou Delaunay triangulácie . . . . .	4
2	Ukážka vstupného formátu súradníc . . . . .	10