

Univerzita Karlova v Praze
Matematicko-fyzikální fakulta

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



Jonáš Klimeš

Konverze vrstevnic na výškovou mapu

Kabinet software a výuky informatiky

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Josef Pelikán

Studijní program: Informatika

Studijní obor: Obecná informatika

Praha 2012

Název práce: Konverze vrstevnic na výškovou mapu

Autor: Jonáš Klimeš

Katedra: Kabinet software a výuky informatiky

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Josef Pelikán, Kabinet software a výuky informatiky

Abstrakt:

Předmětem této práce je navržení a otestování algoritmů na poloautomatickou konverzi vrstevnicové mapy na výškovou mapu. Práce řeší tyto problémy: automatické napojení přerušovaných linií vrstevnic, vyhledání sousedních vrstevnic, poloautomatické uspořádání správných výšek vrstevnic s asistencí uživatele, interpolace výškové mapy terénu užitím Catmull-Rom spline a aproximace výškové mapy radiální funkcí (radial basis function).

Součástí práce je experimentální aplikace, která navržené algoritmy implementuje a průběh práce s vrstevnicemi zobrazuje. Vstupem programu jsou vrstevnice ve vektorovém formátu SVG, výstupem je trojúhelníková síť ve formátu Wavefront OBJ.

Klíčová slova: vrstevnice, mapa, výškové pole, terén

Title: Contour lines to heightfield conversion

Author: Jonáš Klimeš

Department: Department of Software and Computer Science Education

Supervisor: RNDr. Josef Pelikán, Department of Software and Computer Science Education

Abstract:

The task of this project is to design and test algorithms for semiautomatic contour lines conversion to height field. This work tries to solve following problems: automatic connection of disconnected contour lines, adjacent paths finding, semiautomatic ordering of contour lines with user assistance, creating of terrain height field using Catmull-Rom splines or radial basis functions.

A part of this thesis is an experimental application, which implements these algorithms and displays the process of conversion. Program input are in form of contour lines in SVG vector format. Output 3D meshes are in Wavefront OBJ format.

Keywords: contour lines, height field, terrain

Děkuji panu RNDr. Josefu Pelikánovi za odborné vedení mé práce, za rady a za čas, který mi během vypracování této práce věnoval.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova v Praze má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

V Praze dne 2. srpna 2012

Jonáš Klimeš

Obsah

1 Úvod	1
1.1 Mapy a vrstevnice	2
1.2 Zdroje dat a formát	3
1.2.1 Chyby v datech	4
1.3 Existující práce	5
2 Algoritmy	6
2.1 Reprezentace vstupních dat	6
2.2 Napojování vrstevnic	6
2.2.1 Napojení přerušovaných vrstevnic	6
2.2.2 Spojení překrývajících se cest	9
2.2.3 Nalezení krajních bodů mapy	10
2.2.4 Odstranění pomocných vrstevnic	11
2.2.5 Pořadí kroků	12
2.3 Výšky vrstevnic	12
2.3.1 Základní analýza problému	12
2.3.2 Vyslání paprsků a analýza průsečíků	13
2.3.3 Reprezentace vrstevnic grafem	14
2.3.4 Srovnání grafů	15
2.3.5 Analýza grafu susednosti	16
2.3.6 Hledání chyb v grafu susednosti	16
2.3.7 Nalezení nepřímě susedních vrstevnic	18
2.3.8 Vytvoření stromu vrstevnic z částí grafu susednosti	18
2.3.9 Výšky vrstevnic	19
2.3.10 Využití zdůrazněných vrstevnic	19
2.3.11 Hledání susedů	20
2.3.12 Algoritmus na přiřazení výšek	20

2.3.13	Přiřazení výšek zbylým základním vrstevnicím.....	22
2.4	Výšková mapa.....	22
2.4.1	Metoda užívající Catmull-Rom spline	23
2.4.2	Metoda s radiální aproximací	25
3	Uživatelská dokumentace.....	28
3.1	Specifikace vstupních dat	29
3.2	Načítání a ukládání souborů	29
3.3	Napojování vrstevnic.....	31
3.4	Přiřazování výšek	32
3.4.1	Inicializace.....	32
3.4.2	Zadávání výšek	32
3.4.3	Oznámení chyby	34
3.4.4	Dokončení běhu	34
3.4.5	Dokončení poloautomatického přiřazování výšek	34
3.4.6	Další nastavení	34
3.4.7	Kontrola výšek	35
3.4.8	Hromadné ruční přiřazení výšek	35
3.5	Vytvoření výškové mapy.....	35
3.5.1	Catmull-Rom spline interpolace	35
3.5.2	Aproximace radiální funkcí	36
3.5.3	Vytvoření a uložení výškové map.....	36
3.5.4	Zobrazení výškové mapy v aplikaci.....	36
3.6	Úprava mapy.....	37
3.6.1	Výběr vrstevnice	37
3.6.2	Vlastnosti vrstevnice	37
3.6.3	Spojení vrstevnic.....	37
3.6.4	Rozpojení dříve spojených vrstevnic	37

3.6.5 Úprava sousedních vrstevnic	38
3.6.6 Vyhledání vrstevnice.....	38
3.6.7 Smazání vrstevnice.....	38
3.7 Nastavení barev a zobrazení	39
3.7.1 Nastavení zobrazování	39
3.7.2 Nastavení barev.....	39
3.7.3 Nastavení mřížky	40
3.8 Nastavení aplikace	40
4 Diskuze.....	41
4.1 Napojování vrstevnic.....	41
4.1.1 Hodnocení použitých algoritmů.....	41
4.1.2 Možnosti zlepšení	42
4.2 Výšky vrstevnic.....	42
4.2.1 Nalezení sousedů.....	42
4.2.2 Přiřazení výšek.....	43
4.3 Vytvoření výškové mapy.....	44
4.3.1 Catmull-Rom spline	44
4.3.2 Radiální aproximace.....	44
5 Závěr	48
Seznam použité literatury	49
Přílohy	50
Obsah CD	50
Programátorská dokumentace.....	50
Uživatelské rozhraní	54

1 Úvod

Vrstevnice dnes představují nejdůležitější a nejpoužívanější metodu kartografického znázornění výškopisu. Člověk z nich snadno může vyčíst, jak nadmořská výška v mapě stoupá a klesá. Problém nastává, když chceme, aby vrstevnicovou mapu zpracoval počítač a vytvořil model terénu.

Na komplexní analýzu geografických dat se používají Geografické informační systémy (GIS) [11]. Pro pouhé zpracování vrstevnic to jsou zbytečně složité nástroje pracující s jinými typy dat, než jsou vrstevnice. Více o GIS je v kapitole 1.3.

Naším cílem proto bylo navrhnout a otestovat algoritmy pro převod vrstevnic na výškovou mapu terénu. Chtěli jsme vytvořit program, který by uměl vrstevnicím přiřadit výšky a nějakou interpolační nebo aproximační metodou z nich vymodelovat terén. Takto převedené mapy by se daly použít například jako terén reálných lokací v počítačových hrách.

Podařilo se nám získat vrstevnice ve vektorovém formátu z map pro orientační běh. A tady jsme objevili další zajímavý problém. Vrstevnice jsou v některých místech přerušené, a aby se s nimi dobře pracovalo, je nutné je správně napojit. Přirozeně nám vznikly tři oddělitelné fáze:

1. Napojení přerušovaných linií vrstevnic
2. Přiřazení výšek vrstevnicím
3. Vytvoření výškové mapy

Při napojování vrstevnic i přiřazování výšek se počítá s tím, že data mohou obsahovat chyby. Chybám ve vstupních datech se podrobněji věnujeme v kapitole 1.2.1.

Cílem první fáze bylo prozkoumat možnosti automatického napojení přerušovaných vrstevnic. Navrhli jsme kombinaci algoritmů, o kterých si můžete přečíst v kapitole 2.2. Diskuzi o nich naleznete v kapitole 4.1.

Určit směr stoupání vrstevnic bez znalosti dalších údajů, jako jsou například potoky a řeky, je v některých případech obtížné i pro člověka. Navíc nelze ověřit, zda je nalezené řešení ze všech potenciálně možných to správné. Již od začátku jsme proto u tohoto kroku počítali s asistencí uživatele. Algoritmus popisujeme v kapitole 2.3 a hodnotíme v kapitole 4.2.

Pro vytvoření výškové mapy jsme vyzkoušeli dvě metody. Jednou je interpolace využívající Catmull-Rom spline [4] (2.4.1) a druhou je aproximace radiálních funkcí

(radial basis function) [5] (2.4.2). Klady a zápory obou metod zkoumáme v kapitole 4.3.

Součástí práce je i experimentální aplikace, ve které jsou zmíněné algoritmy implementovány. Uživatel v aplikaci celý převod ovládá. Může si prohlížet vrstevnicovou mapu a opravovat některé chyby. Během poloautomatického uspořádávání vrstevnic uživatel zadává potřebné výšky. Uživatelský manuál je v kapitole 3.

1.1 Mapy a vrstevnice

Vrstevnice [1] v mapě znázorňují výšky, stoupání a klesání terénu. Vrstevnice je čára spojující všechny body reliéfu se stejnou nadmořskou výškou. Každá vrstevnice tvoří spojitou uzavřenou prostorovou křivku, kterou si lze představit jako průsečnici reliéfu a plochy rovnoběžné s mořskou hladinou. V topografických mapách se používají vrstevnice s pravidelným výškovým rozdílem – vrstevnicovým intervalem (ekvidistancí).

Existuje několik druhů vrstevnic. Základní vrstevnice jsou kresleny tenkou spojitou hnědou čarou. Výšky základních vrstevnic jsou dělitelné základním vrstevnicovým intervalem. Pro lepší orientaci se používají zdůrazněné vrstevnice. Jsou kresleny



Obrázek 1: Topografická mapa

tlustou čarou a zpravidla to bývají vrstevnice, jejichž výška je násobkem vrstevnicového intervalu. Obvykle se používá pětinasobek, zdůrazněná je tedy každá pátá vrstevnice. Interval zdůrazněných vrstevnic je součin intervalu základních vrstevnic a frekvence zdůrazněných vrstevnic. Zdůrazněné vrstevnice bývají v mapách okótovány svou nadmořskou výškou. Doplňkové a pomocné vrstevnice se kreslí přerušovanou čarou a používají se tam, kde terén není jasný ze základních vrstevnic.

Vrstevnice musí splňovat několik pravidel. Jsou nepřerušované a uzavřené. Nemohou se protínat. V přechodu mezi klesáním a stoupáním jsou za sebou dvě

vrstevnice stejné výšky. Sousední vrstevnice mohou mít stejnou výšku nebo se mohou lišit o jednu ekvidistanci.

V místech, kde je obtížné zjistit směr stoupání, se kreslí spádovky. Spádovka je krátká čára, kolmá na vrstevnici. V jejím směru od vrstevnice terén klesá.

1.2 Zdroje dat a formát

Pracujeme s mapami pro orientační běh. Jsou kreslené v programu OCAD [7], který je určen pro práci s mapami. K našim účelům používáme pouze mapovou vrstvu vrstevnic. Vrstevnice jsou tvořeny posloupností kubických Béziových křivek a jednoduchých úseček.

Mapy jsou uloženy ve vektorovém formátu SVG [8]. SVG – Scalable Vector Graphics je značkovací jazyk a formát souboru, popisující dvourozměrnou vektorovou grafiku. Je založen na formátu XML [9].

V kořenovém elementu *svg* jsou atributy *width* a *height* – šířka a výška mapy v centimetrech. Z elementu *viewBox* vyčteme šířku a výšku v interních jednotkách SVG, používaných v celém souboru.

```
<svg id="mainMap" width="45.9860cm" height="30.1020cm" viewBox="0 0
459.8600 301.0200" style="fill:none;stroke-width:0;fill-rule:evenodd"
xmlns:xlink="http://www.w3.org/1999/xlink" xmlns="http://www.w3.org/2000/svg" >
```

Reprezentace vrstevnic vypadá takto:

```
<g stroke-width="0.36"style="&stR;">
  <path
    d="M585.32,248.37
    C585.10,248.79 585.42,249.33 585.96,249.59
    L587.36,249.37
    C587.54,249.01 587.22,248.47 586.66,248.17
    C586.12,247.91 585.48,248.01 585.32,248.37
    " />
</g>
<g stroke-width="0.36" style="&stR;">
  <path
    d="M571.06,238.91
    C571.28,240.19 571.58,240.79 571.64,242.03
    " />
</g>
```

Element *g* je z anglického *group* tedy skupina. Umožňuje nastavit všem elementům uzavřeným mezi `<g>` a `</g>` nějaký atribut. Zde je použit poněkud nestandardně a neúsporně, protože obaluje každý element *path*.

Element *path* reprezentuje křivku. Posloupnost kroků pro její nakreslení nalezneme v atributu *d* (*path data*). V našich datech se vyskytují tři příkazy značeny různými písmeny: *move to* (M), *line to* (L) a *curve to* (C). Velká písmena značí absolutní souřadnice. Norma SVG umožňuje používat i relativní souřadnice, které se zapisují malými písmeny. Za písmeny následuje jedna nebo více souřadnic bodů. Souřadnice *x* a *y* jsou odděleny čárkou, jednotlivé body oddělují mezery. První pokyn, M585.32,248.37, říká: přesuňte pero na souřadnice $(x, y) = (585.32, 248.37)$. L587.36,249.37 znamená: nakreslete úsečku z aktuální pozice do bodu $(x, y) = (587.36, 249.37)$. *Curve to* se třemi souřadnicemi je kubická Bézierova křivka, první kontrolní bod je aktuální pozice, tedy poslední souřadnice z minulého příkazu.

1.2.1 Chyby v datech

Mapy, které používáme, byly kresleny pouze pro tisk, pro naše využití obsahují několik typických chyb. Jedna vrstevnice je často složena z více elementů, které se někdy ani nedotýkají (obr. 2) a někdy se překrývají (obr. 3). Na obrázku je pro názornost výjimečný případ, kde jedna vrstevnice z překryvu vybočuje. Většinou jsou však překryvy okem nerozeznatelné.

Dále zde jsou pomocné vrstevnice, které však nejsou stylem nijak odlišené od základních vrstevnic. Spádovky jsou kresleny jako samostatné elementy a nejsou přidruženy žádné vrstevnici.

Mapy byly v programu kresleny ručně a kromě těchto pravidelných chyb se zřídka vyskytují i opravdové chyby vzniklé při kreslení. Například konec jedné části vrstevnice zatáčí jiným směrem, než by měla vrstevnice pokračovat, anebo se části



Obrázek 2: Přerušené linie vrstevnic



Obrázek 3: Překrývající se části vrstevnice

vrstevnic protínají. Kvůli všem těmto chybám je proces regularizace vstupního formátu vrstevnic obtížný. Jak se s chybami vypořádají námi navržené algoritmy bude uvedeno v kapitole 2.2.

1.3 Existující práce

Pro práci s geografickými daty se používají geografické informační systémy (GIS) [11]. GIS umožňují sběr, správu, analýzu a prezentaci všech typů geografických dat. K tomu využívají geografii, statistickou analýzu a databázové technologie.

V knize Geospatial analysis [2], která se GIS věnuje, autoři rozebírají možnosti interpolace výškové mapy. Zdrojovými daty jsou okótované body rovnoměrně rozptýlené v mapě. Z výškové mapy lineární interpolací generují vrstevnice. Vrstevnicové mapy zobrazují pro srovnání. Nejlépe vypadá metoda využívající radiální funkce (Radial basis function) [5]. Její zjednodušenou variantu jsme vybrali jako jednu z možností vytváření výškové mapy (kapitola 2.4.2).

2 Algoritmy

2.1 Reprezentace vstupních dat

Mapa je reprezentována jako seznam souvislých úseků vrstevnic. Úsek odpovídá jednomu elementu *Path* ve zdrojovém SVG souboru. V textu jsou tyto úseky označovány jako cesty. Cesta je stejně jako v SVG tvořena posloupností úseček a kubických Béziových křivek. Každá cesta má u sebe příznaky, zda je součástí zdůrazněné vrstevnice a jestli je uzavřená. Cesta je uzavřená, pokud reprezentuje celou souvislou vrstevnici, která je uzavřená v používaném výřezu mapy. Konce neuzavřených cest jsou uloženy ve zvláštním seznamu, využívaném při napojování. Pro urychlení výpočtu průsečíků je každá cesta redundantně reprezentována jako lomená čára, složená z krátkých úseček. Úsečky jsou v textu označovány jako segmenty. Nad nimi je pro rychlé vyhledávání postaven KD-strom [6]. KD-strom je binární strom umožňující nalezení nejbližšího bodu v logaritmickeém čase.

2.2 Napojování vrstevnic

Vrstevnice ve vstupních datech bývají přerušené, složené z několika cest. Program provádí dva druhy napojení. Spojení cest, které se na koncích částečně překrývají, a napojení cest, které patřily jedné vrstevnici, ale byly přerušené. Aby se omezil vznik chyb, jsou z mapy odstraněny cesty pomocných vrstevnic a čar, které nenáleží žádným vrstevnicím.

Vrstevnice končící na okraji by měly pokračovat mimo mapu. Důležitým krokem je proto vyhledání a označení jejich koncových bodů, aby nebyly napojovány na jiné konce cest v mapě. Před každým napojením dvojice konců se navíc zkontroluje, jestli jejich spojnice neprotíná nějakou jinou vrstevnici. K tomu se využívá KD-strom segmentů.

2.2.1 Napojení přerušených vrstevnic

Napojení přerušených vrstevnic porovnává dvojice koncových bodů cest metrikou složenou ze tří složek. Dvojice s nejmenší hodnotou se napojí.

Složky metriky (v závorce je označení v následujícím textu):

- Euklidovská vzdálenost konců cest (vzdálenost)
- Úhel svírající směrové vektory konců cest (směřování)

- Odchytky směrových vektorů konců cest od spojnice koncových bodů (vychýlení)

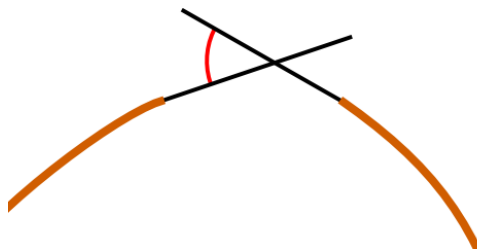
Volbou parametrů jednotlivých složek se řeší několik různých případů přerušení.

Směrové vektory konců cest

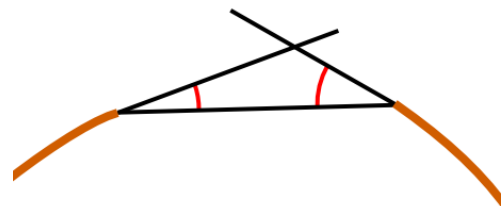
Směrový vektor konce cesty se počítá různě podle typu koncové části cesty. Pokud je koncová část cesty úsečka, jako směrový vektor se použije její směr. U Bézierovy křivky se spočítají souřadnice bodu ve vzdálenosti 5% délky tohoto úseku od konce cesty. Směrový vektor je dán tímto bodem a koncovým bodem cesty.

Směrování

Výsledná odchytká použitá v metrice se spočte odečtením úhlu svíraného směrovými vektory od 180° . Opačné směrové vektory konců na sebe přímo míří a měly by být spojeny. Jejich odchytká pro metriku je 0° .



Obrázek 4: Směrování



Obrázek 5: Vychýlení

Vychýlení

Výsledné *vychýlení* je aritmetický průměr odchylek obou směrových vektorů konců od jejich spojnice.

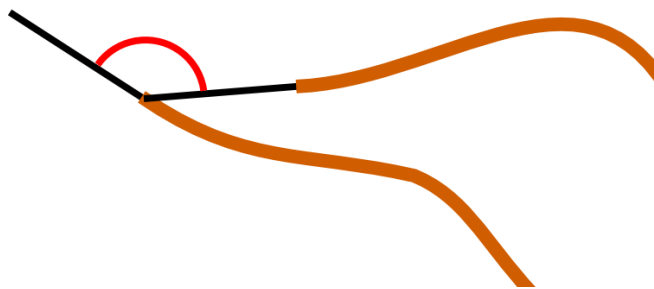
Volba kritérií

Hodnoty *směrování* i *vychýlení* jsou v mnoha případech stejné. *Vychýlení* navíc řeší případy, kdy se nemůže jednat o přerušenu vrstevnici, protože konec jedné cesty je ve svém směru až za úroveň druhého konce (Obrázek 6). Hodnota *směrování* se v tomto případě blíží 0° a pokud by to záviselo pouze na *směrování*, cesty by byly chybně napojeny.



Obrázek 6: Malé směrování, velké vychýlení

ale v některých případech mělo zase ono příliš nízkou hodnotu v místech, kde se vrstevnice napojovat neměly (Obrázek 7). Jedná se o případy, kdy směrové vektory konců svírají ostrý úhel a jeden konec míří přímo na druhý (směr jednoho konce je rovnoběžný se spojnicí konců).



Obrázek 7: Malé vychýlení, velké směřování

Výsledná metrika

Z těchto měření jsme chtěli vytvořit jednu metriku a významnost jednotlivých složek regulovat nějakými parametry. Avšak zatímco vzdálenost konců může nabývat hodnot od 0 do nekonečna. Odchyšky jsou uzavřeny v intervalu $[0, \pi]$. Abychom je mohli lépe porovnávat, transformujeme odchyšky funkcí tangens a místo násobení délky koeficientem ji na její koeficient umocňujeme. Funkce tangens na intervalu $[0, \pi/2)$ roste do nekonečna. S vyšší hodnotou úhlu navíc roste rychleji, což se nám také hodí. Výsledná transformace:

$$f: [0, \pi) \rightarrow [0, +\infty)$$

$$f(x) = \tan \frac{x}{2}$$

(Pokud při výpočtu nepracujeme s nekonečnem, je nutné hodnotu π zvlášť ošetřit)

Aby se dal příspěvek délky ve výsledné metrice lépe regulovat, není délka svým koeficientem násobena jako *směřování* a *vychýlení*, ale je umocněna na svůj koeficient.

Parametry

Hodnoty parametrů byly získány empiricky. Nejsou výsledkem žádného výpočtu. Soubor těchto parametrů je v textu značen uspořádanou čtveřicí (vzdálenost, přímá odchyška, odchyška od spojnice, limit). Volbou různých parametrů se řeší různé situace napojování. Určení pořadí různých typů napojování je v kapitole 2.2.5.

Základní napojení

Základní napojení používá parametry (2,5; 100; 230; 100). Limit je omezený na 100. Při něm se napojí konce, které se téměř dotýkají nebo si jsou blízko a mají stejný směr.

Napojení vrstevnic přerušených v ostrém záhybu

Napojení vrstevnic přerušených v ostrém záhybu řeší případy, kdy byla vrstevnice přerušena v ostrém záhybu. Cesty mají téměř opačný směr, ale jsou si velice blízko. Parametry (4; 100; 230; 500) způsobí, že vzdálenost se umocní na 4. Limitem proto projdou jen velmi blízké body. Tento typ napojování má ještě extra případ s parametry (15; 100; 230; 1000), při nichž dojde k napojení těch nejostřejších přerušení.

Napojení vzdálenějších konců

Naopak pro napojení vzdálenějších bodů musí nejrychleji růst odchylky, parametry proto jsou (1,5; 100; 230; 200).

Vlastní napojování

Při samotném napojování se vyberou všechny dvojice, které se vejdou do zvoleného limitu, a poté se podle výsledků měření začnou napojovat. Nejprve jsou napojeny konce s nejmenší hodnotou, tedy ty, které se k sobě hodí nejvíce. Každý konec je tak spojen s koncem, který je pro něj ze všech konců volných v době napojování nejvhodnější.

2.2.2 Spojení překrývajících se cest

Vrstevnice se překrývají většinou jednou nebo dvěma Bézierovými křivkami, které však nemusí mít stejné řídicí body. Proto je potřeba všechna možná místa překryvů podrobněji analyzovat.

Nevyhovující zkoušené metody

Nejprve jsme zkoušeli použít algoritmus pro napojování přerušených vrstevnic (viz 2.2.1) s tím rozdílem, že se směry konců vezmou opačné. Některé cesty se ale překrývají v zatáčce a směry jejich konců jsou zcela odlišné. Navíc vzdálenost konců příliš nevyovídá o tom, zda mají být cesty spojeny, a může docházet k napojení s jinou rovnoběžnou cestou, jejíž směr je stejný a konec je blíž.

Použitá metoda

Po neúspěchu s předchozí metodou jsme dospěli k závěru, že jediným kritériem by mělo být to, jestli se překrývajících se vrstevnice skutečně dotýkají.

Pro určení dotýkajících se cest se vyhledají všechny dvojice segmentů, jejichž vzdálenost od sebe je menší polovina než tloušťky základních vrstevnic. Vrstevnice se tedy v místech vybraných segmentů opticky překrývají. K efektivnímu nalezení dvojic se použije KD-strom.

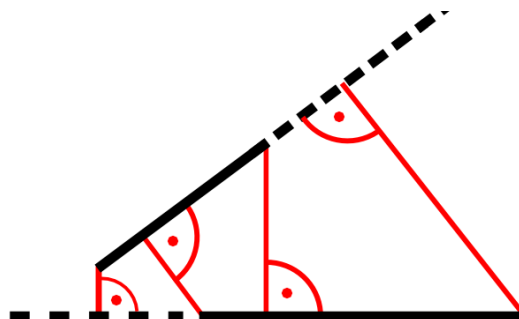
Vzdálenost dvou segmentů, tedy úseček AB a CD , se počítá jako minimum ze vzdáleností krajních bodů jedné úsečky od nejbližšího bodu druhé úsečky. Z bodu C se spustí kolmice k AB . Pokud kolmice protne úsečku AB v bodě P , vzdálenost úsečky od C je délka CP . Jinak se vezme minimum $|CA|$ a $|CB|$ (Obrázek 8). Obdobně se spočítají vzdálenosti zbylých bodů a úseček.

Všechny vybrané dvojice segmentů se postupně prochází od těch s nejmenší vzdáleností a zkoumá se, zda by se jejich cesty měly spojit.

Případy, ve kterých se cesty nespojují:

- Jedna cesta je základní a druhá zdůrazněná
- Jedna z cest je uzavřená
- Segmenty jsou příliš vzdálené od krajních bodů cest

Poslední podmínka ošetřuje případy, kdy se dva segmenty sousedních vrstevnic dotýkají, protože oblast kolem nich je hustě pokrytá vrstevnicemi. Jeden segment z napojované dvojice musí být první nebo poslední v seznamu segmentů a pořadí druhého segmentu od kraje cesty nesmí překročit 10 segmentů.



Obrázek 8: Měření vzdálenosti segmentů

Když dvojice splní všechny podmínky pro napojení, z jedné cesty se odmaže překrývající se část a druhá cesta se za ni připojí.

2.2.3 Nalezení krajních bodů mapy

Konce vrstevnic na okraji mapy si jsou blízko a mají tendenci se podle pravidel napojování spojovat. Většinou se však jedná o 2 různé vrstevnice s různou výškou. Proto je nutné tyto okrajové body najít a vyloučit je z napojování. Problémem je, že okraj mapy nemusí být konvexní.

Premýšleli jsme o modifikaci algoritmu na hledání konvexního obalu tak, aby se mohl lokálně zanořovat dovnitř. Ale zdálo se nám to složité. Nakonec jsme objevili

mnohem jednodušší způsob. Každý koncový bod cesty jednotlivě otestujeme, zda-li by nemohl být na nějakém okraji.

V každém bodě P se pro levý, pravý, horní i dolní okraj vezme úsečka, která vychází z bodu P a je kolmá k okraji. Necht' O je její krajní bod na okraji. Dále se spočítají dvě kratší úsečky odchýlené od PO na obě strany o 45° (Obrázek 9). Pokud úsečky neprotnou žádný segment jiné cesty, bod je krajní. Dvě úsečky jsou kratší, protože okraj mapy nemusí být konvexní, a pokud by vedly až k okraji, mohly by protnout cesty, které je ve skutečnosti od okraje neoddělují. Centrální dlouhá úsečka zase zajistí, aby nebyl za okraj označen vnitřní bod, kolem kterého jsou však cesty rozmístěny jen řídko. Body, do kterých vedou kratší úsečky, jsou při výchozích parametrech od P vzdálené o 30 ve směru obou os x a



Obrázek 9: Hledání konců na okraji mapy

y. Výsledná vzdálenost od P je tedy cca 42. Přesná volba těchto parametrů není příliš důležitá. Podobné výsledky dávají i hodnoty 20, 40 nebo 50. K úspěšnému zamezení napojování také nemusí být označeny všechny krajní body. Stačí, když je označen jeden ze dvou bodů, kterým by hrozilo špatné napojení.

2.2.4 Odstranění pomocných vrstevnic

Ve vstupních datech mohou být také různé pomocné vrstevnice, spádnice, které nejsou připojené k vrstevnicím, nebo jiné krátké čáry neznámého původu. Ty se potom nesprávně napojují na cesty vrstevnic. Tyto krátké cesty jsou proto z mapy odstraněny. Cesta je odstraněna, pokud nesplňuje ani jednu z následujících podmínek:

- Vzdálenost mezi začátkem a koncem cesty dosahuje stanoveného minima
- Počet křivek a úseček, ze kterých je cesta složena, dosahuje stanoveného minimálního počtu
- Cesta je uzavřená

Minimální hodnoty jsou parametrem filtru. Základní minimální vzdálenost je 4 a počet částí 4. Hodnoty byly zvoleny experimentálně. Na testovaných datech při nich

došlo k odstranění největšího počtu nepotřebných cest a minimálního počtu částí základních vrstevnic. Uživatel může tyto základní parametry v programu regulovat. Použití vzdálenosti mezi začátkem a koncem místo skutečné délky je zvoleno schválně. Nejčastější pomocné vrstevnice mají uprostřed záhyb, jejich vzdálenost mezi začátkem a koncem je proto menší a filtr nemusí být tak přísný. Algoritmus projde všechny cesty a ty, které nesplňují žádnou podmínku, smaže.

2.2.5 Pořadí kroků

Pro správné napojení je daná posloupnost kroků. Nicméně uživatel může experimentovat s jinou posloupností a regulovat při tom parametry.

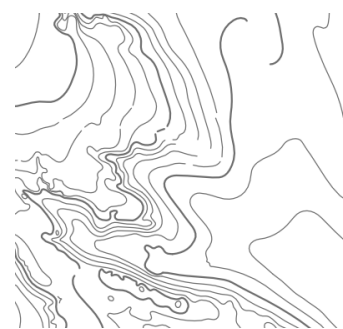
1. Základní napojení – zde je nejmenší riziko, že spojí něco špatně, proto je první.
2. Smazání krátkých cest – krátké cesty, které mohou způsobovat chyby v napojení, je nejlepší odstranit co nejdříve. Některé části přerušovaných linií jsou ale také velmi krátké, proto se promazává až po základním napojení.
3. Spojování překrývajících se cest
4. Označení konců u okrajů mapy – konce musí být označeny před napojením ostrých zatáček, ty se totiž u okraje vyskytují hojně.
5. Napojení vrstevnic přerušovaných v ostrých záhybech
6. Napojení vzdálených konců
7. Napojení vrstevnic přerušovaných ve velmi ostrých záhybech – má nejvolnější parametry, proto by mělo být až na konci, kdy už nehrozí tolik špatných napojení

2.3 Výšky vrstevnic

Tato partie se ukázala jako nejzajímavější a algoritmicky nejobtížnější z celého projektu. Kvůli značné časové náročnosti jsme provedli jenom analýzu problému a vytvořili první verzi uživatelem řízeného algoritmu.

2.3.1 Základní analýza problému

Sousední cesty lze nalézt vysíláním paprsků a analýzou jejich průsečíků s cestami.

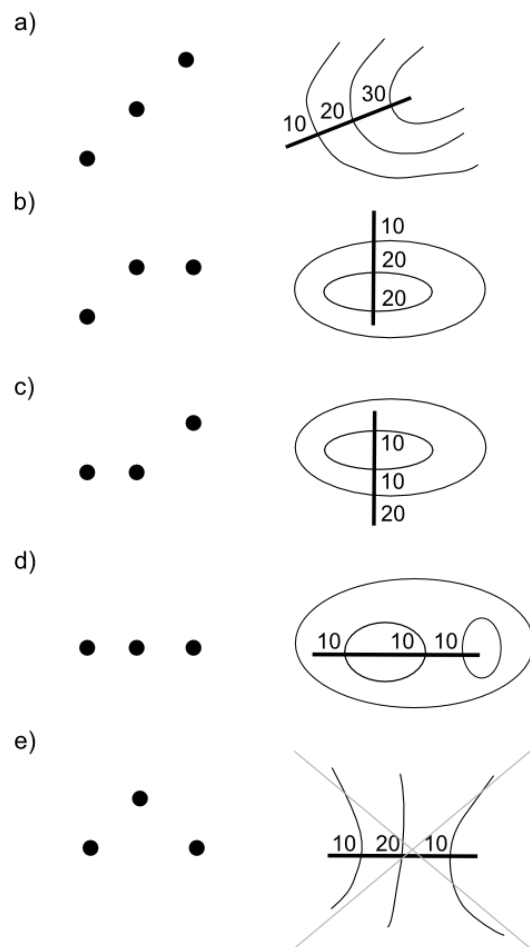


Obrázek 10: Příklad, kde není jasné, kterým směrem terén stoupá

Poznat, kde mapa stoupá a klesá, je však bez znalosti dalších prvků, jako jsou třeba potoky, v některých případech obtížné i pro člověka (Obrázek 10). Aby mohl program postupovat podobně, potřeboval by k tomu komplexnější analýzu vrstevnicové mapy. Nestačilo by pouze znát sousední vrstevnice, ale bylo by potřeba vědět, i kde přesně se sousední vrstevnice nachází, na které je straně a jak daleko od daného bodu. Zpracovat všechny tyto údaje by bylo velmi náročné.

2.3.2 Vyslání paprsků a analýza průsečíků

Prvním nápadem, jak seřadit vrstevnice, byla analýza možných výškových posloupností u n po sobě jdoucích cest, které protnul jeden paprsek při hledání sousedů. Každé dvě sousední mohou mít stejnou výšku (v) nebo se lišit o jednu ekvidistanci ($v + 1, v - 1$). To plyne přímo ze základních pravidel pro vrstevnice. Analýza posloupnosti délky 2 může odhalit chyby, ale o správném uspořádání nic nenapoví. Na obrázku Obrázek 11 jsou až na symetrie všechny možné posloupnosti délky 3. Posloupnost $(v, v + 1, v)$ a její symetrická varianta $(v, v - 1, v)$ jsou špatně a v mapě se nemohou vyskytovat (možnost e na obrázku 11). V přechodu mezi klesáním a stoupáním za sebou totiž musí být dvě vrstevnice stejné výšky (viz kapitola 1.1). Zbylé posloupnosti (a, b, c, d) v mapě být můžou. Nepřípustná je tedy jen jedna posloupnost a to je velmi slabé omezení na to, aby se podle toho daly určovat výšky.



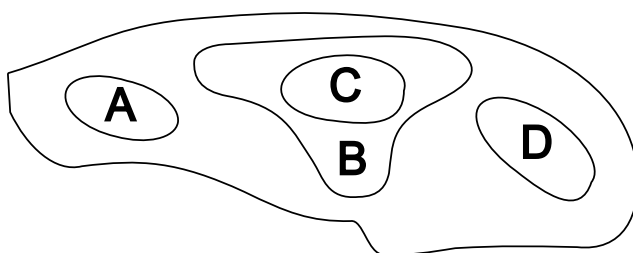
Obrázek 11: Možné posloupnosti výšek vrstevnic (možnost e je v mapě nepřípustná)

2.3.3 Reprezentace vrstevnic grafem

Analýza průsečíků nevedla k žádnému výsledku. Vyzkoušeli jsme řešit přiřazení výšek jako grafový problém. Navrhli jsme tři možné grafové reprezentace, použitelné pro přiřazení výšek.

Definice

- Vrstevnice nebo jejich souvislé části jsou označovány souhrnně jako **cesty**.
- Dvě vrstevnice jsou **sousední**, pokud je lze spojit lomenou čarou, která neprotíná žádnou vrstevnici.
- Dvě vrstevnice spolu **nepřímo sousedí**, pokud jsou sousední a zároveň neexistuje úsečka, která obě vrstevnice spojuje a žádnou vrstevnici neprotíná (Obrázek 12).
- **Uzavřená vrstevnice** je nepřerušená vrstevnice, jejíž začátek a konec jsou v jednom bodě.
- Uzavřená vrstevnice rozděluje prostor mapy na dvě oblasti. Vnější oblast je ta, které náleží okraj mapy. Druhá oblast je vnitřní. Necht' A a B jsou uzavřené vrstevnice. Vrstevnice B **leží uvnitř** vrstevnice A, pokud na mapě leží ve vnitřní oblasti vrstevnice A (Obrázek 12). (Lze napsat také vrstevnice B leží v A.)
- Vrstevnice je **okrajová**, pokud sousedí s okrajem mapy. (Kdyby okraj mapy tvořil uzavřenou vrstevnici, byly by tyto vrstevnice sousední)

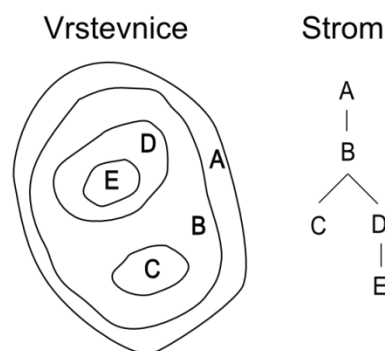


Obrázek 12: Vrstevnice A a D spolu sousedí nepřímo, D leží uvnitř B.

Strom vrstevnic

Strom vrstevnic je definován pouze pro soustavu uzavřených vrstevnic ležících uvnitř nějaké uzavřené vrstevnice. Tyto uzavřené vrstevnice jsou vrcholy grafu. Graf je

zakořeněný strom. Vrstevnice, ve které leží všechny ostatní vrstevnice, je kořenem stromu. Přími potomci vrstevnice jsou všechny sousední vrstevnice ležící v ní.



Obrázek 13: Strom vrstevnic

Graf susednosti

Vrcholy *Grafu susednosti* jsou cesty. Hrana leží mezi dvěma vrcholy, právě když jsou odpovídající vrstevnice nebo jejich části sousední.

Graf protnutí

Graf protnutí je multigraf se smyčkami. Je definován na vrstevnicové mapě a síti paprsků, které vrstevnice protínají. Pro stejnou mapu a odlišné sítě vrstevnic se graf může lišit (a zpravidla se liší). Vrcholy grafu jsou cesty. Pro každé dva sousední průsečíky na libovolném paprsku vzniká hrana mezi danými cestami. Pokud průsečíky náleží stejné cestě, vzniká smyčka.

Multigraf lze nahradit grafem s váhami na hranách tak, že se pro každou dvojici vrcholů nahradí všechny multihrany mezi nimi jednou hranou s váhou rovnou počtu těchto multihran.

2.3.4 Srovnání grafů

Graf protnutí

Graf protnutí lze z vrstevnicové mapy vytvořit nejjednodušeji. Stačí najít průsečíky se sítí paprsků. Vytvoření grafu nebrání ani chyby jako jsou přerušené či špatně napojené vrstevnice. K přiřazení výšek je však nutné graf dále zpracovat. Je nutné odhalit falešné hrany – hrany, které vznikly následkem chyb ve vrstevnicích. A dále je zapotřebí najít a označit dvojice nepřímě sousedních vrstevnic.

Strom vrstevnic

Strom vrstevnic lze použít pouze pro vrstevnicovou mapu bez chyb a zpravidla pouze na její část, neboť výřezem mapy mohou být nějaké vrstevnice přerušeny.

Z hlediska přiřazování výšek se je tato grafová reprezentace ze zmíněných nejlepší. *Strom vrstevnic* kromě toho, které vrstevnice jsou sousední, zachycuje i to, zda jsou sousední vrstevnice ve vnitřní nebo vnější oblasti, což přiřazování výšek

usnadňuje. Vytvoření *Stromu vrstevnic* z vrstevnicové mapy je však nejobtížnější a možnost jeho vytvoření bývá omezená.

Nemožnost vytvořit *Strom vrstevnic* z libovolné vrstevnicové mapy bez chyb je omezující. Snahy o začlenění neuzavřených vrstevnic ztroskotaly, neboť u nich nelze určit, které zbylé vrstevnice jsou uvnitř a které venku a několik neuzavřených vrstevnic končících u okraje mapy může ve skutečnosti tvořit jednu vrstevnici.

Graf susednosti

Graf susednosti sám o sobě neříká nic o poloze vrstevnic. Ale jeho sestavení není omezené na uzavřené vrstevnice. Oproti *Grafu protnutí* již jasně definuje, které vrstevnice jsou susední a které nejsou. Na rozdíl od *Stromu vrstevnic* stále může obsahovat chyby. Jeho analýzou je možné některé chyby najít a opravit. Z některých jeho částí lze sestavit *Strom vrstevnic* a pomocí něho přiřadit výšky.

2.3.5 Analýza grafu susednosti

Definování pojmů

V grafech, jejichž vrcholy jsou vrstevnice, mohou být pojmy vrcholy a vrstevnice ztotožňovány a značeny stejně.

Vrstevnice uzavřená okrajem je vrstevnice, jejíž začátek i konec leží na okraji mapy a vrstevnice není nikde přerušena.

Vrstevnice uzavřená okrajem rozděluje mapu na dvě oblasti.

Nechť je vrstevnice A uzavřená nebo uzavřená okrajem. Vrstevnice A **odděluje** vrstevnice B a C , pokud B leží v jedné oblasti A a C leží ve druhé.

Artikulace v grafu $G = (V, E)$ je takový vrchol $v \in V$, že po vyjmutí v a hran s ním incidentních z G se zvětší počet komponent grafu.

Pozorování:

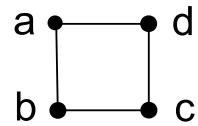
Vrstevnice v odděluje u a $w \Leftrightarrow$ Vrchol v je artikulace v grafu G a zároveň vrcholy u a w leží v grafu $G - \{v\}$ v odlišných komponentách souvislosti.

2.3.6 Hledání chyb v grafu susednosti

Analýzou grafu susednosti se dají odhalit některé chyby ve vrstevnicové mapě nebo chyby vzniklé při vytváření grafu.

Cyklus délky 4

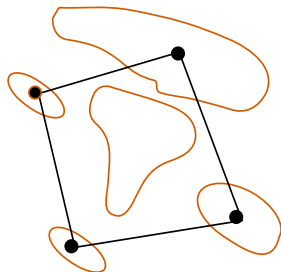
V mapě nebo grafu je chyba, pokud graf obsahuje jako podgraf cyklus délky 4 (C_4) a zároveň neobsahuje jako podgraf úplný graf na stejných vrcholech.



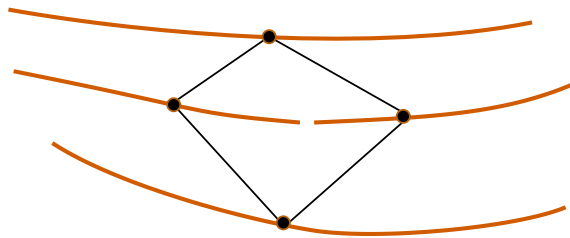
Vrcholy a a c nejsou spojeny hranou, v grafu tedy nejsou sousední. Pokud vrcholy a , c nejsou sousední, musí existovat vrchol, který je odděluje. Vrcholy a a c jsou však spojeny dvěma disjunktními cestami $\{\{a,b\},\{b,c\}\}$ a $\{\{a,d\},\{d,c\}\}$, a proto je nemůže oddělovat jediný vrchol. V grafu tedy musí být chyba.

Obrázek 14:
Cyklus délky 4

Příkladem chyb je například neoznačení nepřímo sousedních vrstevnic za sousední (Obrázek 15), nebo přerušená vrstevnice (Obrázek 16).



Obrázek 15: Neoznačené sousední vrstevnice

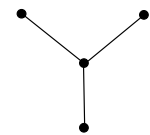


Obrázek 16: Vrstevnice rozdělená na více částí

Protože dvě různé chyby vypadají v grafu stejně, ale jejich oprava musí být odlišná, bylo by dobré se jednomu typu chyby vyhnout.

„Trojnožka“

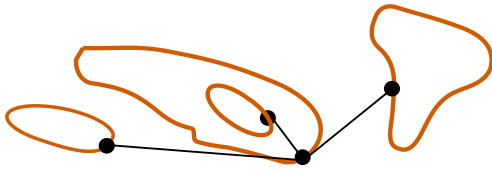
V mapě nebo grafu je chyba, pokud graf obsahuje indukovaný podgraf „trojnožku“ – (V, E) , kde $V=\{a,b,c,d\}$ a $E=\{\{a,b\},\{a,c\},\{a,d\}\}$.



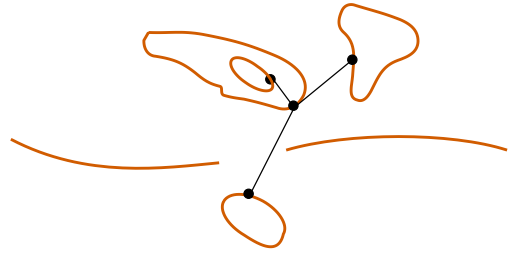
Obrázek 17:
Graf "trojnožka"

Pokud je centrální vrchol uzavřený nebo uzavřený okrajem, rozdělují mapu na 2 oblasti. Dva ze 3 vrcholů proto musejí být ve stejné oblasti a měly by být označeny jako sousední. Pokud vrstevnice centrálního vrcholu není uzavřená, měly by být všechny zbylé vrcholy sousední.

Příkladem je opět případ neobjevené nepřímo sousední vrstevnice (Obrázek 15).



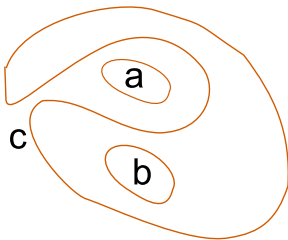
Obrázek 19: Neoznačené sousední vrstevnice



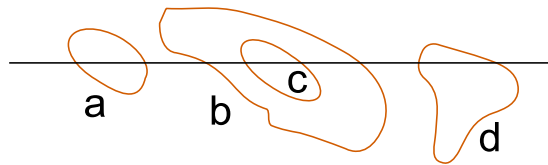
Obrázek 18: Chyba v grafu vzniklá přerušáním vrstevnice

2.3.7 Nalezení nepřímo sousedních vrstevnic

Nepřímo sousední vrstevnice (Obrázek 15) lze odhalit při hledání průsečíků s paprsky a vytváření grafu. Podrobnější analýzou průsečíků lze zjistit, které dvojice průsečíků ostatní vrstevnice ve skutečnosti neoddělují (**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**). Paprsek vstupuje do vnitřních oblastí b a c a předtím, než protne vrstevnici d , je zase opouští. Vrstevnice a a d jsou vzhledem k b a c ve stejné oblasti a nepřímo spolu sousedí. Příklad, kdy je tato analýza důležitá, je na Obrázek 21. Z již vytvořeného grafu by nebylo možné poznat, že vrstevnice a je ve vnější části.



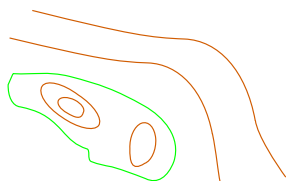
Obrázek 21: Může se zdát, že vrstevnice a leží ve vnitřní oblasti c , ale leží ve vnější



Obrázek 20: Nalezení nepřímo sousedících vrstevnic

2.3.8 Vytvoření stromu vrstevnic z částí grafu sousednosti

Pokud nějaká uzavřená vrstevnice obsahuje uvnitř pouze uzavřené vrstevnice (Obrázek 22), lze z této části sestavit *Strom vrstevnic*.



Obrázek 22: Soubor uzavřených vrstevnic, ze kterého je možné sestavit *Strom vrstevnic*

2.3.9 Výšky vrstevnic

Pro všechny výše zmíněné grafy je definována výšková funkce h :

$$h(v) = \frac{\text{nadmořská výška cesty}}{\text{vrstevnicový interval}}$$

Platí pro ni následující pravidla:

- 1) $\forall \{u, v\} \in E: |h(u) - h(v)| \leq 1$
- 2) $\forall \{u, v\}, \{v, w\} \in E:$
 $h(u) = h(v) - 1 \Rightarrow h(w) = h(v) \vee h(w) = h(v) + 1$
 $h(u) = h(v) + 1 \Rightarrow h(w) = h(v) \vee h(w) = h(v) - 1$

Ve *Stromech vrstevnic* vytvořených z částí mapy mohou být výšky seřazeny relativně. Absolutní výšky se spočítají, až se *Strom vrstevnic* připojí ke zbytku grafu. Při napojování musí být splněna výše zmíněná pravidla.

2.3.10 Využití zdůrazněných vrstevnic

Přiřazení výšek pomocí grafů bylo příliš složité, a proto jsme si problém nejprve zjednodušili. V mapách jsou většinou výšky pouze u zdůrazněných vrstevnic. Uživatel by mohl zadat všechny výšky zdůrazněných vrstevnic a podle nich by se spočetly ostatní.

Dvě zdůrazněné vrstevnice, mezi kterými není žádná další zdůrazněná, mohou mít buď stejnou výšku, anebo se jejich výšky mohou lišit o jeden interval zdůrazněných vrstevnic. Pokud se liší, jejich vzdálenost je rovna minimálně frekvenci zdůrazněných vrstevnic. Necht' je frekvence zdůrazněných vrstevnic n . Platí dvě pravidla:

- Pokud mají dvě zdůrazněné vrstevnice různé výšky a je mezi nimi právě $(n - 1)$ základních vrstevnic, výšky základních vrstevnic monotónně stoupají od nižší zdůrazněné vrstevnice k vyšší.
- Dvě zdůrazněné vrstevnice, které odděluje méně než $(n - 1)$ základních vrstevnic, mají stejnou výšku

Algoritmus může procházet grafem vrstevnic a přiřazovat výšky podle těchto pravidel. Není nutné znát všechny výšky zdůrazněných vrstevnic od začátku. Uživatel je může zadávat postupně, podle potřeby.

2.3.11 Hledání sousedů

Základem hledání sousedních vrstevnic je vytvoření *Grafu protnutí*.

Z nějakého bodu se vyše paprsek a spočítají se jeho průsečíky se segmenty cest. K tomu je pro urychlení použit KD strom. Průsečíky se projdou podle pořadí protnutí a každým dvěma po sobě protnutým cestám se nastaví sousednost. Počet případů,

	p0 (60774)	p1 (76752)	p2 (179)	p3 (111)	p4 (205)	p5 (1506)	p6 (22517)
p0 (60774)	89900						
p1 (76752)	70676	57699					
p2 (179)	0	0	179				
p3 (111)	0	0	16	111			
p4 (205)	0	0	0	0	205		
p5 (1506)	0	0	0	0	0	1458	
p6 (22517)	7326	0	0	0	199	0	21416
p7 (47651)	39462	50	0	0	0	0	34712
p8 (16497)	23112	0	0	0	0	0	17213
p9 (612)	0	0	0	0	0	0	0
p10 (16464)	364	0	200	134	0	0	0
p11 (8363)	0	0	26	23	0	0	0
p12 (6027)	0	0	0	0	0	0	0
p13 (275)	0	0	0	0	0	0	0
p14 (239)	313	0	0	0	0	0	0
p15 (183)	202	0	0	0	0	0	0
p16 (291)	251	0	0	0	0	0	0
p17 (136)	90	0	0	0	0	0	0
p18 (1940)	0	0	0	0	0	0	0

Obrázek 23: Tabulka průsečíků s vrstevnicemi

kdy jsou dvě cesty sousední, se ukládá do čtvercové matice sousednosti (Obrázek 23). U každé cesty je také počítán celkový počet jejich průsečíků (na obrázku Obrázek 23 je to číslo v závorce za názvem cesty).

Paprsky se vysílají z náhodných bodů na mapě vždy pod stanoveným počtem úhlů rovnoměrně do všech stran. Počet případů, kdy spolu cesty sousedí, se vydělí minimem z celkového počtu průsečíků obou cest. A pokud počet případů překročí určitou minimální hranici, jsou vrstevnice označeny za sousední.

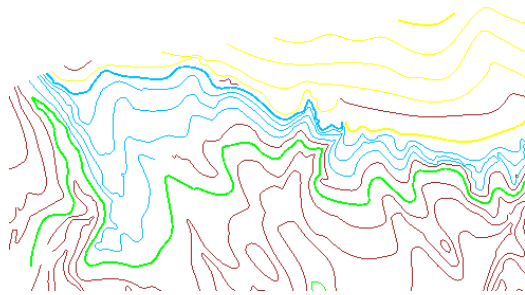
Dvě vrstevnice, chybně označené jako sousední, komplikují poloautomatické přiřazování výšek. Naopak chybějící označení sousednosti není tak velkým problémem. Výška se může přiřadit přes jiné sousedy.

Po zkoumání výsledných dat jsme stanovili minimální hranici na 5%.

2.3.12 Algoritmus na přiřazení výšek

Idea algoritmu

Nechť je frekvence zdůrazněných vrstevnic n . Vybere se počáteční zdůrazněná cesta se známou výškou. Od té program najde průchodem do šířky všechny zdůrazněné cesty do vzdálenosti n (Obrázek 24). Pokud je vzdálenost nalezené cesty ostře menší než n , má cesta stejnou výšku jako počátek. Cesty ve vzdálenosti n mohou mít vzdálenost stejnou nebo o jeden interval zdůrazněných cest nižší nebo vyšší. Uživatel následně vybere jednu z těchto možností. Když je cesta výš nebo níž, automaticky se doplní výšky základních vrstevnic mezi nalezenou cestou a počátkem.



Obrázek 24: Ilustrace algoritmu – žluté jsou již navštívené vrstevnice, azurová je právě nalezená posloupnost vrstevnic končící zelenou vrstevnicí. Výšku zelené vrstevnice musí uživatel zadat.

Algoritmus

Uživatel vybere počáteční zdůrazněnou cestu a přiřadí jí výšku. Od té se prohledává graf do šířky do vzdálenosti n . Hledají se posloupnosti cest, které začínají počáteční zdůrazněnou vrstevnicí a obsahují právě jednu další zdůrazněnou vrstevnici na konci. Jejich délka smí být maximálně $n + 1$. Tyto posloupnosti jsou v textu označeny jako dotazy. Dotaz je zodpovězen, pokud má přiřazeny všechny výšky nebo pokud jsou výšky obou zdůrazněných cest stejné. Pokud se dotaz nepodaří zodpovědět automaticky, program se zeptá uživatele.

V datech mohou být chyby, nejčastěji se spojí dvě sousední vrstevnice do jedné. Vzdálenost vypočtena přes takto spojené vrstevnice je potom o 1 menší než skutečná. V takovém případě by se podle 2. pravidla automaticky přiřadila stejná výška, což by mohlo být špatně. Aby se tomu zabránilo, musí uživatel potvrdit každé přiřazení stejné výšky ve vzdálenosti větší než je $n / 2$.

Před každým přiřazením výšky se zkontroluje, zda už vrstevnice neměla přiřazenou jinou výšku. Zdůrazněné cesty mohou mít jen výšky dělitelné intervalem zdůrazněných vrstevnic a naopak základní cesty nesmějí mít výšku příslušnou zdůrazněným cestám.

Každá zdůrazněná cesta s nově přiřazenou výškou, ať už automaticky nebo s uživatelskou pomocí, se přidá do *seznamu nově okótovaných vrstevnic*. Po prohledání všech cest do vzdálenosti n od počátku se z této fronty vybere nový počátek a začne se hledat dál.

Hledání je přerušeno a uživatel informován v těchto případech:

- 1) Vybrání výšky ze tří možností
- 2) Potvrzení stejné výšky
- 3) Chyba – snaha o přiřazení výšky vrstevnici, která už má jinou výšku
- 4) Byly prohledány všechny dostupné zdůrazněné cesty

V prvních dvou případech se dotazy na uživatele řadí do fronty a uživatel je tázán, až když algoritmus projde všechny dostupné zdůrazněné cesty. Každý dotaz ve

frontě se pokusí znovu si automaticky přiřadit výšky, neboť některé dříve neznámé výšky již mohly být doplněny. Zodpovězené dotazy se z fronty vyjmou. Fronta se prochází opakovaně, dokud se její velikost zmenšuje. Teprve pak je osloven uživatel.

Naopak při výskytu chyby se prohledávání přeručí a uživatel je informován ihned. Může chybu v datech ručně opravit nebo přeskočit. Při ručním rozpojování vrstevnic se musí aktualizovat i seznam sousedních vrstevnic. Pokud algoritmus skončí a stále existují zdůrazněné vrstevnice bez výšek, uživatel opět vybere počáteční vrstevnici, od které se rozběhne hledání. Aby nedocházelo k častému a pro uživatele nepříjemnému přeskokování z jednoho konce mapy na druhý, jako nová počáteční vrstevnice se ze *seznamu nově okótovaných vrstevnic* vybere ta nejbližší ke stávajícímu počátku. Obdobně se vybírají i dotazy na uživatele. Jako poloha vrstevnice je brán řídicí bod v polovině posloupnosti úseček a Bézierových křivek.

2.3.13 Přiřazení výšek zbylým základním vrstevnicím

Po přiřazení výšek všem zdůrazněným cestám může zůstat stále mnoho nepřijezzených základních cest. Pro každou cestu bez výšky se vezme množina výšek sousedních cest. Pokud jsou v množině dvě výšky lišící se o dvojnásobek ekvidistance, výška vybrané vrstevnice je hodnota mezi těmito dvěma výškami.

Uzavřená základní vrstevnice vedle zdůrazněné vrstevnice má výšku jako její nezdůrazněné sousedky. Zbytek výšek musí přiřadit uživatel ručně.

Nakonec se provede kontrola, zda se některé sousední vrstevnice neliší o více než jednu ekvidistanci. Pokud se takový případ najde, nemusí to znamenat jen špatně přiřazenou výšku. Může to být způsobeno také dvěma cestami, chybně označenými za sousední.

2.4 Výšková mapa

Aplikace umí vytvořit výškovou mapu z vrstevnic dvěma způsoby. První metoda protne vrstevnice přímkou a v průsečíku získá výšky. Zbytek terénu nad průsečíkem interpoluje pomocí Catmull-Rom spline [4]. Druhá metoda vezme z vrstevnic vzorky bodů. Výšky potom aproximuje s využitím radiální funkce (Radial basis function) [5]. Výřez vrstevnicové mapy nemusí mít vždy obdélníkový tvar. Výšky jsou spočítané pouze v oblasti pokryté vrstevnicemi. Výsledek je možné zobrazit jako barevnou bitmapu, kde výšku reprezentuje barevný odstín. Z aplikace lze exportovat float mapu nebo trojúhelníkovou síť vymodelovaného terénu.

2.4.1 Metoda užívající Catmull-Rom spline

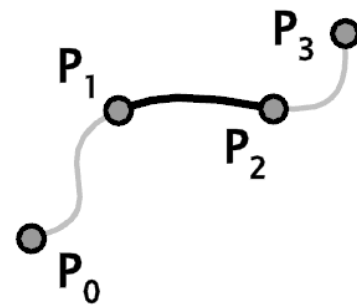
Catmull-Rom spline je kubická křivka, která je vhodná pro interpolaci, protože prochází všemi řídicími body. Hodnota Catmull-Rom spline mezi řídicími body P_i a P_{i+1} závisí pouze na okolních bodech P_{i-1} , P_i , P_{i+1} , P_{i+2} .

Vrstevnicová mapa se protne pravidelnou sítí paprsků vysílaných z okraje mapy (Obrázek 26). Počet paprsků z jednoho bodu si může uživatel zvolit. Nad úsečkou určenou prvním a posledním

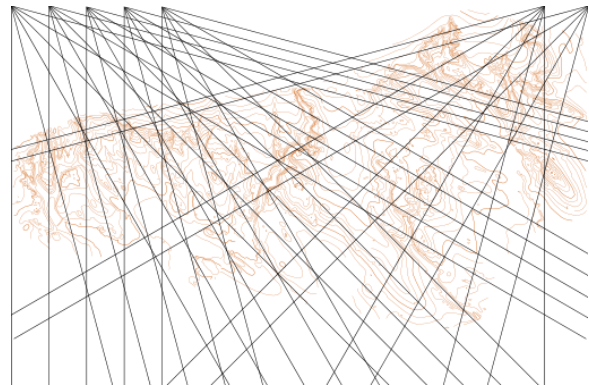
průsečíkem paprsku s nějakou vrstevnicí se spočítá Catmull-Rom spline. Před prvním a za posledním průsečíkem nejsou hodnoty výškové mapy definovány. Na výsledné výškové mapě tím vznikne okraj, za kterým mapa není definována a který přibližně odpovídá okraji vrstevnicové mapy. Pro krajní úseky Catmull-Rom spline se první a poslední řídicí bod zdvojí.

Pro výpočet výšek se používají 2 pole, *VYSKY* a *CITAC_PAPRSKU*. V každém bodě výškové mapy, který protne paprsek, se do výškové mapy *VYSKY* přičte výška spočítaná nad paprskem. V poli *CITAC_PAPRSKU*, o stejných rozměrech, jako je výšková mapa, se počítá počet paprsků procházejících daným bodem. Na závěr se všechny hodnoty výškové mapy *VYSKY* vydělí příslušnou hodnotou pole *CITAC_PAPRSKU*.

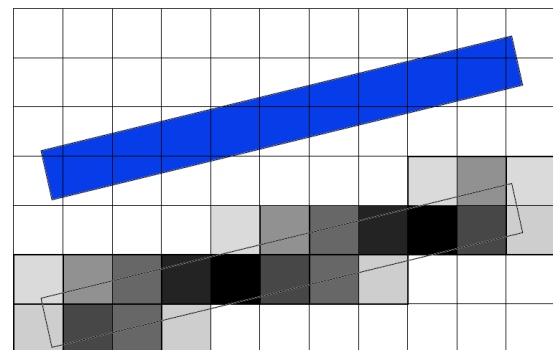
Vysílané paprsky mohou zasahovat do více pixelů. V takovém případě se hodnota výšky rozdělí mezi ně. Používá se stejný princip jako při



Obrázek 26: Řídící body spline křivky (zdroj - [3])



Obrázek 25: Síť paprsků



Obrázek 27: Kreslení úsečky s vyhlazováním (zdroj [7])

kreslení úsečky do rastru s vyhlazováním [3] (Obrázek 27).

Zde je algoritmus pro paprsky, jejichž směr se od směru kladné osy x vychyluje maximálně o 45° . Pro paprsky ve směru osy y je algoritmus obdobný.

```
ZapisVyskyPaprsku(int POCATEK_X, real POCATEK_Y,
  real SMER_X, real SMER_Y)
{
  int X = POCATEK_X;
  real Y = POCATEK_Y;
  real DY = SMER_Y / SMER_X;
  float COSINV = 1 / tan(smerY / smerX);
  while(X < sirkaMapy AND Y < vyskaMapy)
  {
    int V = VyskaNadPaprskem(X);
    PridejVysku(X, DolniCelaCast(Y), V,
    DesetinnaCast(X));
    PridejVysku(X, HorniCelaCast(Y), V,
    1 - DesetinnaCast(X));
    X = X + 1;
    Y = Y + DY;
  }
}

PridejVysku(int X, int Y, int VYSKA,
  real KOEFICIENT)
{
  VYSKY[X, Y] += KOEFICIENT * VYSKA;
  CITAC_PAPRSKU[X, Y] += KOEFICIENT;
}
```

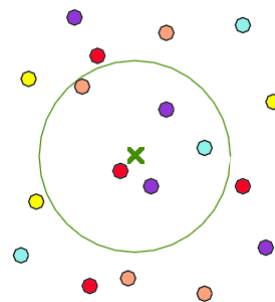
Výšková mapa vznikne pouze v místech dráhy paprsků mezi vrstevnicemi. Vytvoří se tak ohraničení mapy (Obrázek 28).



Obrázek 28: Okraj mapy

2.4.2 Metoda s radiální aproximací

Aproximaci radiální funkcí (Radial basis function) [5] jsme jako jedno z řešení zvolili na základě knihy Geospatial analysis [2]. Vytvoření výškové mapy pomocí radiální funkce vypadá v této publikaci z vyzkoušených metod nejlépe. Metoda s radiální aproximací určuje výšku bodu ze vzorků ležících v okruhu s daným poloměrem (Obrázek 29). Váha každého vzorku je spočtena radiální funkcí. Aby byl výsledek spojitý, měla by být hodnota funkce ve vzdálenosti poloměru nulová. Protože vzorky vytvořené z vrstevnic nejsou rovnoměrně rozdělené a jsou koncentrovány na vrstevnicích, jsou vrstevnice ve výsledku výrazně vidět. To je nežádoucí, a proto se z každé vrstevnice započítává pouze nejbližší vzorek.



Obrázek 29: Ilustrace radiální aproximace (zdroj [3])

Vytvoření vzorků.

Z každé cesty se vezme sada vzorků. K tomu se použije pomocná struktura segmentů, protože výpočet pozice na lomené čáře je jednodušší a rychlejší než na kubických Bézierových křivkách. Jako vzorky se vezmou body lomené čáry, jejichž vzdálenost od začátku (po lomené čáře) je dělitelná vzorkovací frekvencí. Prostor vzorků se rozdělí čtvercovou mřížkou a vzorky se uloží do přihrádek, kam patří podle svých souřadnic.

Poloměr radiální funkce

Důležitou roli ve vytváření výškové mapy pomocí radiální funkce hraje její poloměr. Bude-li příliš malý, většina výšek se bude určovat pouze podle jednoho nejbližšího bodu a v mapě vzniknou výrazné schody a ostré zlomy. Když bude poloměr příliš velký, výsledná výšková mapa bude velmi nepřesná. Vrstevnice jsou v mapě rozmístěny nerovnoměrně, a proto je ideální poloměr v každém místě jiný.

V každé přihrádce se proto spočítá vhodný poloměr jako vzdálenost druhé nejbližší vrstevnice od středu přihrádky. Hodnota poloměrů musí být po celé mapě spojitá, aby nebyly vidět přechody mezi různými poloměry. Poloměr se proto v každém bodě spočítá z poloměrů nejbližších přihrádek radiálních funkcí s pevným poloměrem.

Radiální funkce

Nejprve jsme zkoušeli radiální funkci *cosinus* (Obrázek 31), transformovanou tak, aby ve vzdálenosti poloměru r měla nulovou hodnotu:

$$f(x) = \cos x$$

$$f(x) = \cos \frac{\pi x}{2r}$$

Ve výsledku se původní výšky v místech vrstevnic lišily od hodnot výškové mapy (Obrázek 30) – při správné interpolaci by měla barva vrstevnic splývat s pozadím, čím větší je

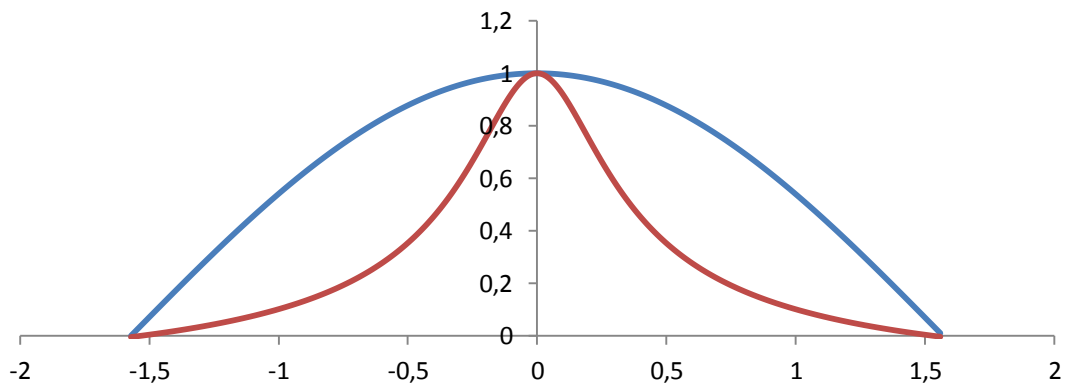


Obrázek 30: Nepřesnost výškové mapy

kontrast mezi vrstevnicemi a jejich okolí, tím méně přesná je aproximace). Jak hodně přispívají vzdálenější body k výsledné výšce, závisí na radiální funkci. Zvolili jsme proto inverzní multikvadrickou funkci (Obrázek 31), jejíž hodnoty se vzdáleností od středu klesají rychleji než u *cosinusu*. Funkci je nutné posunutou tak, aby ve vzdálenosti poloměru, měla hodnotu 0:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{1+x^2}}$$

$$d) \quad g(x) = \frac{1,2}{\sqrt{1 + \frac{35x^2}{r^2}}} - 0,2$$



Obrázek 31: Radiální funkce cosinus (modrá) a inverzní multikvadrická (červená)

Výpočet výškové mapy

Každému bodu výškové mapy se z nejbližších vzorků bazickou radiální funkcí spočte výška. Pokud v dosahu poloměru není žádný vzorek, použije se výška nejbližší vrstevnice.

Okraj mapy

Tato metoda vyplní výšky v celém obdeníku výškové mapy. Je proto nutné spočítat okraj mapy a výškovou mapu oříznout. Okraj je nalezen podobně jako při použití Catmull-Rom spline (Obrázek 28), kde vznikl přirozeně. Vrstevnicová mapa se protne sítí paprsků ve vodorovném a svislém směru a pod úhly 45° a u každého paprsku se označí body mezi prvním a posledním průsečíkem s vrstevnicemi. Vznikne tak maska, které přibližně odpovídá ohrazení původní vrstevnicové mapy. Maska se aplikuje na spočtenou výškovou mapu a výšky za okrajem se nastaví jako nedefinované.

3 Uživatelská dokumentace

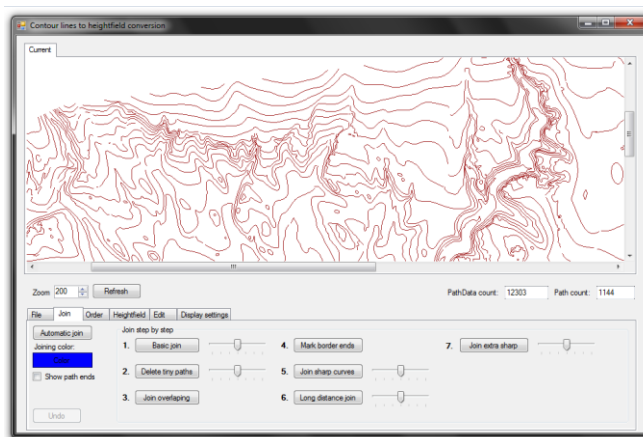
Aplikace *Převod vrstevnic na výškovou mapu* pracuje s vrstevnicemi ve formátu SVG a umožňuje z vrstevnic vytvořit výškovou mapu.

Převod má 3 části:

1. Napojení přerušovaných linií vrstevnic
2. Nalezení sousedních vrstevnic a poloautomatické přiřazení výšek některým vrstevnicím
3. Interpolace výškové mapy

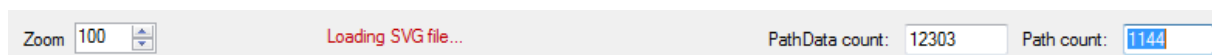
V horní části aplikace se zobrazuje vrstevnicová mapa a v dolní části je ovládání.

Mapu můžete posouvat posuvníky po stranách anebo myší. Pro posuv myší najedte nad mapu a stiskněte levé tlačítko. Kurzor se změní na ruku a pohybem myši za stálého držení levého tlačítka posouváte mapu. Po uvolnění se kurzor změní zpět na šipku a mapa se přestane posouvat.



Obrázek 32: Okno aplikace

Pod mapou vlevo můžete nastavit přiblížení v procentech. Po nastavení procent je třeba mapu překreslit tlačítkem Refresh. Na pravé straně jsou zobrazeny statistiky – počet cest v mapě (*Path count*) a celkový počet úseček a Béziových křivek (*PathData count*). Uprostřed aplikace vypisuje, co právě dělá.



Obrázek 33: Prostřední panel

Ovládání programu je rozděleno do několika záložek:

- File – načítání vstupních souborů a ukládání výsledků
- Join – napojování přerušovaných linií vrstevnic
- Order start – poloautomatické přiřazení výšek vrstevnicím
- Order finish – přiřazení zbylých výšek a kontrola

- Height field – vytvoření výškové mapy
- Edit – editace jednotlivých vrstevnic
- Display settings – Nastavení zobrazení a barev

3.1 Specifikace vstupních dat

Aplikace dokáže načíst SVG 1.1 soubory. Soubor musí mít v kořenovém elementu *svg* nastavenou šířku a výšku mapy. Rozměry mohou být v atributech *width* a *height* v interních jednotkách SVG. Druhou možností jsou rozměry v atributech *width* a *height* v podporovaných jednotkách SVG a současně rozměry v interních jednotkách SVG v atributu *viewBox*. Všechny elementy mapy se musí nacházet v obdélníku mapy daným počátkem souřadnic a výškou a šířkou.

Úseky vrstevnic jsou reprezentované elementy *path* složených z úseček a kubických Béziových křivek. V atributu *d* mohou být příkazy M, L, C a Z. Je možné použít i relativní souřadnice (malá písmena). Každý element *path* musí mít nastavenou tloušťku čáry – *stroke-width*. Podle této tloušťky čáry se rozlišují základní a zdůrazněné vrstevnice. Hranici mezi základní a zdůrazněnou vrstevnicí nastavíte v aplikaci před načtením souboru (kapitola 3.2). Dále mohou mít nastavenou barvu obrysu – *stroke*. Pokud má *path* své *id*, bude se pod ním zobrazovat i v aplikaci.

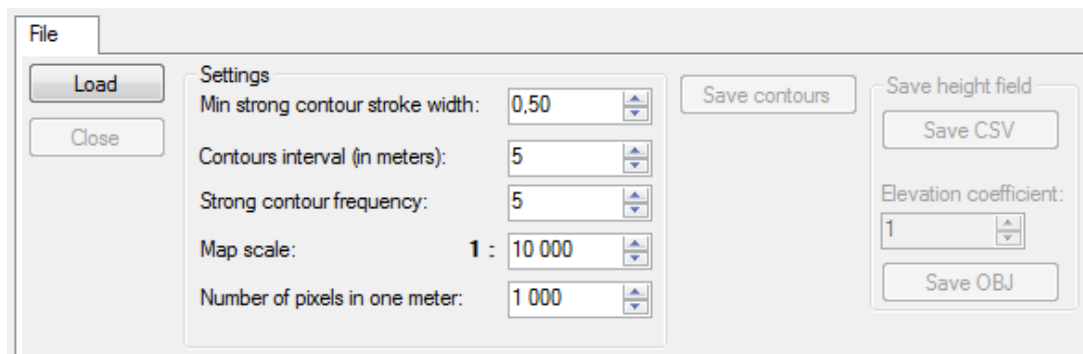
Elementy *path* mohou být v elementech *g* a budou na ně aplikovány jejich atributy. Kromě atributů *stroke* a *stroke-width* na ně bude aplikován i atribut *transform* s jedním z příkazů z: *matrix(<a><c><d><e><f>)*, *translate(<tx> [<ty>])*, *scale(<sx> [<sy>])*. Aplikace nepodporuje řetězení transformací v jednom atributu *transform*. Ostatní atributy *path* a *g* jsou ignorovány.

Elementy *path* mohou obsahovat element *desc* a v něm celočíselnou výšku.

```
<g stroke-width="0.36">
  <path d="M 592.86,322.37 L 592.32,322.75 L 592.1,323.11 L 592.2,324.23
  L 592.7,324.67" id="path92">
    <desc>540</desc>
  </path>
</g>
```

3.2 Načítání a ukládání souborů

Po spuštění aplikace se zobrazí pouze záložka File.



Obrázek 34: Záložka File

Zde můžete nastavit parametry mapy a tlačítkem *Load* nahrát SVG soubor.

Min strong contour stroke width určuje, které vrstevnice budou označeny za zdůrazněné. Výchozí hodnota je 0,50 a znamená, že vrstevnice s menší tloušťkou čáry (atribut *stroke-width*) jsou základní a vrstevnice s větší tloušťkou jsou zdůrazněné.

Contours interval (in meters) je základní interval vrstevnic (ekvidistance). Je udáván v metrech.

Strong contour frequency je frekvence zdůrazněných vrstevnic. Výchozí hodnota 5 znamená, že každá pátá vrstevnic je zdůrazněná.

Map scale je měřítko mapy.

Number of pixels in one meter udává počet kolik pixelů má jeden metr v měřítku mapy.

Tyto parametry nejdou měnit v průběhu práce s mapou. Po nahrání souboru se znepřístupní, a pokud chcete nahrát soubor s jinými parametry, musíte ten stávající nejprve zavřít tlačítkem *Close*.

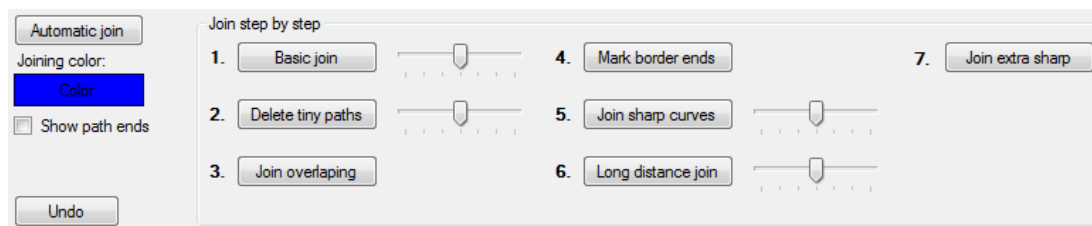
Po načtení mapy se mapa zobrazí v horní části aplikace a zpřístupní se ostatní záložky ovládání. Zpřístupní se také výše zmíněné tlačítko *Close* na zavření souboru a tlačítko *Save contours*.

Save contours uloží Vaši stávající práci s vrstevnicemi do SVG souboru, včetně výšek vrstevnic, pokud jsou přiřazeny.

V sekci **Save height field** můžete uložit výškovou mapu do souboru. Buď jako CSV soubor tlačítkem **Save CSV** nebo jako trojúhelníkovou síť v textovém formátu Wavefront OBJ tlačítkem **Save OBJ**. Pro zvýraznění členitosti terénu můžete nastavit **Elevation coefficient**, kterým se vynásobí všechny výšky v ukládaném souboru. Sekce je zpřístupněna po vygenerování výškové mapy viz kapitola 3.5.

3.3 Napojování vrstevnic

Napojování vrstevnic se ovládá na záložce *Join*.



Obrázek 35: Záložka Join

Napojování má sedm kroků. Kroky jsou seřazené a očíslované a doporučuje se je provádět v tomto pořadí. Napravo od tlačítek některých kroků je posuvník, kterým můžete regulovat kritéria pro napojení. Posuvník má sedm poloh. Prostřední poloha ponechává výchozí nastavení kritérií. Směrem doleva snižujete počet napojených cest nebo množství odstraněných cest v případě *Delete tiny paths*. Směrem doprava množství zvyšujete.

Basic join je základní napojení, které spojí pouze ty nejjasnější případy.

Delete tiny paths odstraní krátké cesty, které jsou složeny z malého počtu křivek.

Join overlapping spojí cesty, které se částečně překrývají a vypadají nepřerušené.

Mark border ends označí koncové body vrstevnic u okrajů mapy. Označené body se již nebudou účastnit napojování a v mapě se zvýrazní.

Join sharp curves napojí cesty, které byly přerušeny v ostrém záhybu a jejichž konce jsou blízko sebe.

Long distance join napojí konce cest, které jsou daleko od sebe a směřují na sebe.

Join extra sharp curves napojí cesty, které byly přerušeny ve velmi ostrém záhybu, jejich směr je téměř opačný a jsou v těsné blízkosti.

Před napojením se současná mapa zálohuje. Po napojení můžete přepínat mezi právě napojenou mapou a předchozí verzí. Tlačítkem *Undo* se můžete vrátit k předchozí verzi. Vždy je uložena jen jedna předcházející verze. Můžete tedy udělat jen jeden krok zpět. Při stisku libovolného kroku se předcházející verze přepíše Vaší současnou. Pokud se při napojování vytváří spojnice koncových bodů, použije se na ní vybraná barva – *joining color*. Po kliknutí na barevný obdélníček se vám otevře dialogové okno na výběr barvy a můžete barvu změnit. Každé spojnici zůstává barva, které byla vybrána během jejího vytváření. Můžete proto na každý krok použít jinou barvu a tím je od sebe odlišit.

Tlačítkem *Automatic join* provedete všechny kroky automaticky v daném pořadí s výchozími parametry.

Pro zobrazení všech volných konců cest můžete zaškrtnout *Show path end*. Konce budou zvýrazněny barvenými tečkami. Barvu můžete změnit na záložce *Display settings* viz kapitola 3.7.

Tlačítkem *Show advanced settings* zobrazíte a skryjete záložku *Advanced*, na které můžete měnit parametry napojování. Změna těchto parametrů může způsobit nefunkčnost napojování vrstevnic. Běžnému uživateli se nedoporučuje tyto parametry měnit.

3.4 Přiřazování výšek

Záložka *Order start* umožňuje poloautomatické přiřazení výšek zdůrazněným vrstevnicím. *Order finish* poskytuje další nástroje pro automatické přiřazení některých výšek, kontrolu přiřazených výšek a manuální přiřazování.

3.4.1 Inicializace

Nejprve musíte provést inicializaci poloautomatického přiřazování:

1. Klikněte na tlačítko *Find adjacent*. Ke každé cestě se uloží její sousední
2. Vyberte vrstevnici, od které chcete začít přiřazovat výšky. Musí to být zdůrazněná vrstevnice. Když v mapě najedete na vrstevnici, kurzor se změní v ruku a vybraná vrstevnice se zvýrazní. Stiskem levého tlačítka myši nad zvýrazněnou vrstevnicí ji vyberete. Její ID se zobrazí v textovém poli *Path ID*.
3. V sekci *Selected path* vyplňte výšku vybrané vrstevnice do pole *Elevation*.
4. Dokončete inicializaci stisknutím tlačítka *Start*

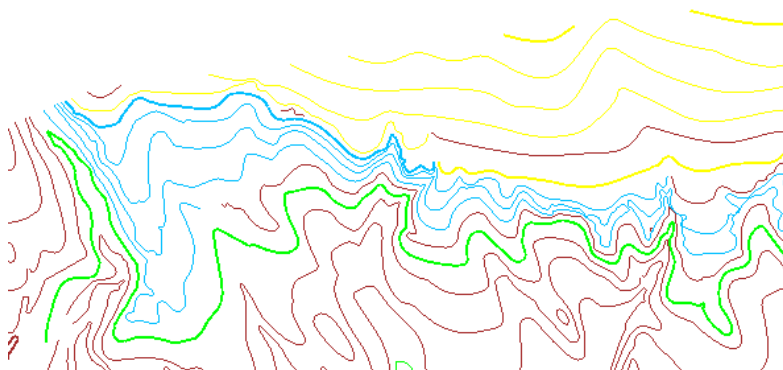
3.4.2 Zadávání výšek

Po stisku *Start* se rozběhne poloautomatické přiřazení výšek vrstevnicím v okolí. Hledají se posloupnosti vrstevnic, do vzdálenosti *frekvence zdůrazněných vrstevnic*. První člen posloupnosti je startovní vrstevnice, poslední člen je zdůrazněná vrstevnice. Kromě první a poslední vrstevnice jsou všechny členy posloupnosti základní vrstevnice. Program se pokusí přiřadit vrstevnice a poté se zastaví. Poté, co se program zastaví, vypíše příčinu zastavení v prvním řádku sekce *Query*. Vrstevnice

s doposud přiřazenými výškami se barevně označí a podle typu příčiny se postupuje dále. Mohou nastat tyto situace:

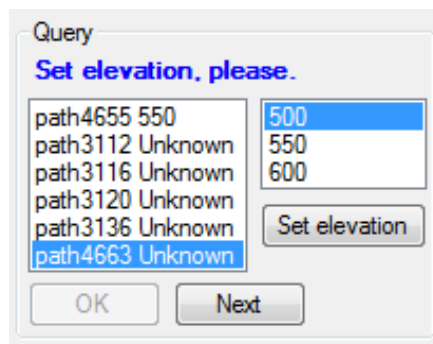
- Program narazil na zvýrazněnou vrstevnici a neumí jí sám přiřadit výšku.
- Program našel chybu v přiřazení
- Všechny vrstevnice dostupné ze startovní vrstevnice byly navštíveny

Vrstevnice se v různých případech označují různou barvou (viz Obrázek 36). Žlutě jsou sekvence vrstevnic, kterými se prošlo v předchozích krocích. Azurově je označena aktuální sekvence, zeleně vybraná vrstevnice. Základní nastavení barev můžete změnit v záložce *Display settings*, viz kapitola 3.7.



Obrázek 36: Barevné značení vrstevnic v průběhu přiřazování výšek

Při dotazu na výšku se v levém seznamu sekce *Query* zobrazí posloupnost vrstevnic od startovní po dotazovanou (Obrázek 37). Startovní i dotazovaná vždy patří mezi zdůrazněné. V seznamu je zobrazeno ID vrstevnice a její výška. V pravém seznamu jsou nabídky výšek pro dotazovanou vrstevnici. Když je dotazovaná vrstevnice ve vzdálenosti *frekvence zdůrazněných vrstevnic*, máte na výběr ze tří možností: stejná jako startovní, o jeden



interval zdůrazněných vrstevnic větší nebo menší.

Vyberte správnou výšku a stiskněte *Set elevation*.

Poslední vrstevnici v sekvenci se nastaví zvolená

výška, a pokud podle ní dokáže program určit i výšky zbývajících vrstevnic sekvence, nastaví se tyto výšky také. Tato poslední vrstevnice se stane novou startovní vrstevnicí a mapa se prochází dál.

Obrázek 37: Posloupnost vrstevnic a volba výšky

Vrstevnice, kterou označíte v seznamu, se automaticky vybere, takže se vám zvýrazní na mapě a můžete editovat její výšku v sekci *Selected path*. Nabídka výšek se zobrazí, pouze když je v seznamu vybraná dotazovaná vrstevnice (poslední vrstevnice sekvence). Dotaz můžete přeskočit tlačítkem *Next*. To udělejte v případě, kdy byla kvůli chybě v datech vybrána nepřípustná posloupnost vrstevnic.

3.4.3 Oznámení chyby

Když se program snaží přiřadit vrstevnici s nastavenou výškou nějakou jinou výšku, hledání se přeruší. Uživateli se objeví hláška o chybě a inkriminovaná sekvence se zobrazí v levém seznamu sekce *Query*. Špatně nastavenou výšku můžete v seznamu vybrat a poté v sekci *Selected path* opravit. Po opravení celé sekvence klikněte na tlačítko *OK* pod seznamem. Sekvence se znovu zkontroluje. Pokud byla chyba opravena, pokračuje se v přiřazování. Jinak program opět zahlásí chybu. Jestliže chybu opravovat nechcete, pokračujte v hledání tlačítkem *Next*.

3.4.4 Dokončení běhu

Když program projde všechny zdůrazněné vrstevnice dostupné ze startovní vrstevnice výše zmíněnými posloupnostmi, zastaví se. Pokud zbývají zdůrazněné vrstevnice bez výšek, můžete vybrat zdůrazněnou vrstevnici a přiřazování z ní spustit znovu.

3.4.5 Dokončení poloautomatického přiřazování výšek

Poté co přiřadíte výšky všem zdůrazněným vrstevnicím, stiskem tlačítka *Set the rest* spustíte automatické přiřazení výšek podle sousedů. Program se pokusí automaticky přiřadit výšky vrstevnicím, které sousedí s vyšší a s nižší vrstevnicí.

3.4.6 Další nastavení

Zaškrtnuté zaškrťovací políčko *Show paths with elevation* určuje, jestli se budou barevně zvýrazňovat vrstevnice s přiřazenou výškou.

Tlačítko *Clear colors* zruší barevné zvýraznění vrstevnic, které dostaly jinou barvu během poloautomatického přiřazování.

3.4.7 Kontrola výšek

V sekci *Check elevation with adjacent* můžete zkontrolovat, zda nemají některé sousední vrstevnice větší výškový rozdíl, než je základní interval vrstevnic. Kontrolu spustíte tlačítkem *Check*. Případné chyby se objeví v seznamu vedle. V seznamu je ID vrstevnice, počet jejích sousedů a písmeno S, pokud je vrstevnice zdůrazněná. Vrstevnici můžete v seznamu vybrat a na záložce *Edit* se můžete podívat na výšky jejích sousedů (viz kapitola 3.6). Když opravíte nějakou chybu, proveďte kontrolu znovu. Jedna špatně nastavená výška může způsobit chyby u více vrstevnic.

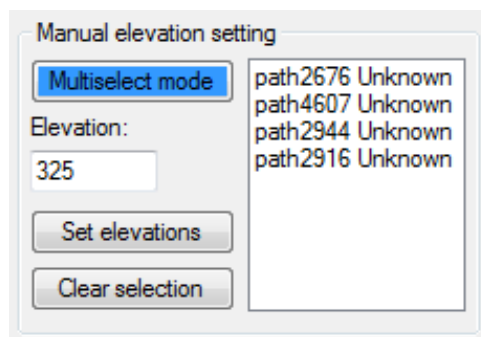
3.4.8 Hromadné ruční přiřazení výšek

Hromadné ruční přiřazování výšek se provádí v sekci *Manual elevation setting*.

Tlačítkem *Multiselect mode* zapnete hromadný výběr vrstevnic. Po jeho aktivaci najedte na mapě na vrstevnici a poté co se barevně označí, stiskněte levé tlačítko myši.

Vrstevnice se přidá do výběru. Opakovaným výběrem vrstevnici zase odeberete. Když máte vybrány požadované vrstevnice, napište do pole *Elevation* výšku, kterou jim chcete přiřadit a stiskněte *Set elevations*. Všem

vybraným vrstevnicím se přiřadí zvolená výška. Pokud necháte pole *Elevation* prázdné, vybraným vrstevnicím se výšky smažou. Tlačítkem *Clear selection* výběr vyprázdníte.



Obrázek 38: Hromadné manuální nastavování výšek

3.5 Vytvoření výškové mapy

Výšková mapa se vytváří na záložce *Height field*. Výškovou mapu můžete vytvořit interpolací pomocí Catmull-Rom spline nebo aproximací radiální funkcí.

3.5.1 Catmull-Rom spline interpolace

Výhodou Catmull-Rom spline interpolace je, že hodnoty výškové mapy na vrstevnicích jsou přesné. Její nevýhodou je to, že ve výsledku jsou výrazné stopy vrstevnic. Mapa se protne přímkami v pravidelné mřížce pod různými úhly a nad každou přímkou se hodnoty interpolují. Výsledky interpolace se v každém bodě

zprůměrují. Jediný parametr *Samples* určuje hustotu sítě. Udává počet úhlů, pod kterými se od okrajů vyšlou paprsky v rámci 90°.

3.5.2 Aproximace radiální funkcí

Už název aproximace radiální funkcí napovídá hlavní nevýhodu této metody. Hodnoty výškové mapy na vrstevnicích nemusí být přesné, protože se pouze aproximují. Na druhou stranu výsledná mapa vypadá přirozeněji.

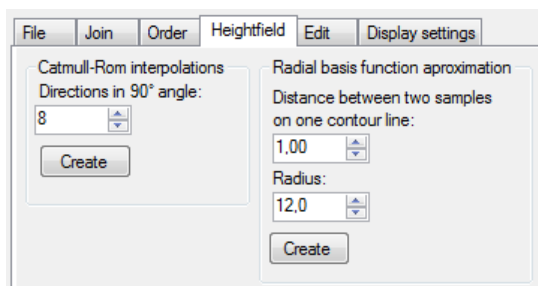
Aproximace nevyužívá celé vrstevnice, ale pouze některé jejich body. Každá vrstevnice se pravidelně navzorkuje. Parametr *Distance between two samples on the contour* udává vzdálenost mezi dvěma vzorky na jedné vrstevnici. *Radius coefficient* je koeficient poloměru radiální funkce, který se mění v závislosti na hustotě vrstevnic.

3.5.3 Vytvoření a uložení výškové mapy

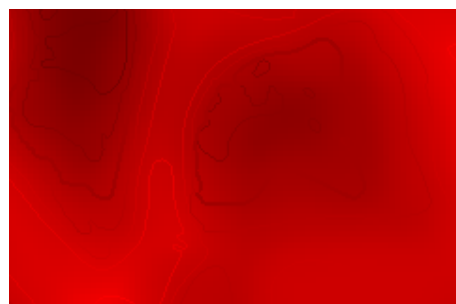
Výškovou mapu vytvoříte tlačítkem *Create* v sekci každé metody. V aplikaci je uložena vždy pouze poslední vytvořená mapa. Výškovou mapu můžete uložit jako trojúhelníkovou síť v textovém formátu Wavefront OBJ. Pro uložení stiskněte tlačítko *Save height field* na záložce *File*.

3.5.4 Zobrazení výškové mapy v aplikaci

Po vytvoření se vám zobrazí náhled, kde jsou výšky značeny odstínem barvy. Nejnížší místa jsou nejsvětlejší, nejvyšší místa jsou nejtmavší. Přes mapu jsou vykresleny vrstevnice barvou odpovídající jejich výšce. Podle toho poznáte, jak je výsledek přesný. Pokud se linie vrstevnic neliší od nejbližšího okolí, jejich hodnota ve výškové mapě je přesná. Barvy jsou voleny adaptabilně tak, aby nejlépe pokryly celý rozsah výšek.



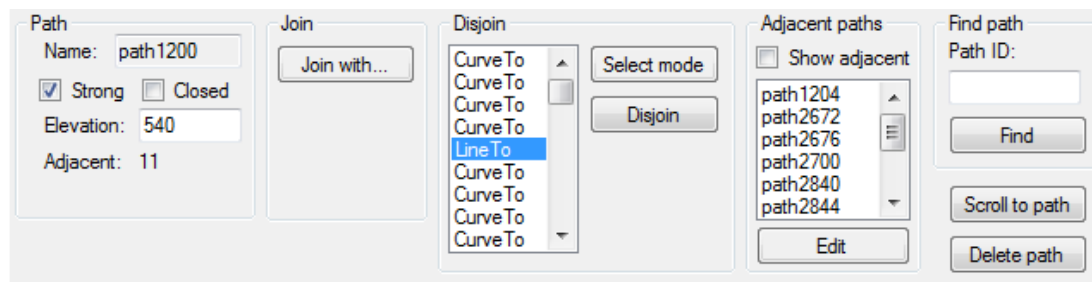
Obrázek 40: Ovládací panel výškové mapy



Obrázek 39: Barevné znázornění výškové mapy

3.6 Úprava mapy

Na záložce *Edit* najdete nástroje pro editaci vrstevnic.



Obrázek 41: Editační panel

3.6.1 Výběr vrstevnice

Nejprve je nutné vybrat vrstevnici, kterou chcete editovat. Po najetí myši na vrstevnici změní vrstevnice barvu na zelenou a kurzor se změní na ruku. Obarvenou vrstevnici vyberete stisknutím levého tlačítka myši.

3.6.2 Vlastnosti vrstevnice

V sekci *Path* se zobrazují informace o vybrané vrstevnici. Najdete tu její ID, zaškrtnutí políčka *Strong* a *Closed* indikují, zda-li je vrstevnice zdůrazněná resp. uzavřená. V poli *Elevation* můžete nastavovat a měnit výšku vrstevnice. Prázdné pole znamená, že výška dosud nebyla nastavena. Vymazáním pole nastavení výšky zrušíte. Za popiskem *Adjacent* je počet sousedních vrstevnic.

3.6.3 Spojení vrstevnic

V sekci *Join* můžete napojit vybrané vrstevnice. Stiskněte tlačítko *Join width* a v mapě vyberte vrstevnici, se kterou jí chcete spojit. Na obrazovce se nakreslí spojnice koncových bodů. Pokud to jsou body, které jste chtěli spojit, stiskněte tlačítko *Yes*. Koncové body se spojí. Stisknutím *No* Vám bude nabídnuta jiná spojnice a proces se opakuje. Pokud odmítnete všechny nabízené možnosti, proces napojování se zruší.

3.6.4 Rozpojení dříve spojených vrstevnic

V sekci *Disjoin* je seznam úseček a křivek ze kterých je vrstevnice složená. Smazáním křivky nebo úsečky rozdělíte jednu vrstevnici na dvě. Takto můžete opravit chybně napojené vrstevnice. *CurveTo* je Bézierova křivka, *LineTo* je úsečka a *JoinTo* je úsečka vzniklá při spojování vrstevnic. V seznamu můžete vybrat

požadovanou křivku nebo úsečku a tlačítkem *Disjoin* vrstevnici rozpojit. Vybraná úsečka nebo křivka se na mapě barevně znázorní.

Výběr můžete provést také přímo v mapě. Tlačítkem *Select mode* zapnete výběrový mód a pohybem myši nad vrstevnicí vybíráte. Když se vám zvýrazní úsek, který chcete vybrat, stiskněte levé tlačítko myši. Výběrový mód se po stisku tlačítka automaticky vypne.

3.6.5 Úprava sousedních vrstevnic

V sekci *Adjacent paths* můžete upravit seznam sousedních vrstevnic. Celá sekce se zpřístupní až po vyhledání sousedních vrstevnic na záložce *Order* (viz kapitola 3.4).

Po zaškrtnutí *Show adjacent paths* se okolo vybrané vrstevnice v mapě barevně zvýrazní její sousedé. Barvu zvýraznění můžete nastavit na záložce *Display settings* (kapitola 3.7). Po stisku tlačítka *Edit* můžete upravovat seznam sousedních vrstevnic. Kliknutím na vrstevnici, která není v seznamu, ji přidáte. Kliknutím na vrstevnici, která v seznamu je, vrstevnici odeberete. Úpravy ukončíte opětovným stiskem tlačítka *Edit*.

3.6.6 Vyhledání vrstevnice

Vrstevnici můžete také vyhledat podle jejího ID. Pokud nebyla vrstevnice spojena s jinou, má stejné ID, které měl její element *Path* ve vstupním souboru. Hledané ID zadejte do pole *Path ID* v sekci *Find path* a stiskněte tlačítko *Find*. Jestliže vrstevnice se zadaným ID existuje, bude vybrána. Pokud byla vrstevnice s vybraným ID spojena s jinou vrstevnicí, vybere se vrstevnice se kterou byla hledaná vrstevnice spojena.

Tlačítko *Scroll to path* přesune obrazovku do míst, kde je právě vybraná vrstevnice.

3.6.7 Smazání vrstevnice

Vrstevnici můžete smazat tlačítkem *Delete path*. Smazání vrstevnice budete muset ještě potvrdit.

3.7 Nastavení barev a zobrazení

Na záložce *Display settings* najdete nastavení barev a zobrazování. Záložka je rozdělená do 3 sekcí: základní nastavení, barvy a nastavení mřížky.



Obrázek 42: Nastavení barev a zobrazení

3.7.1 Nastavení zobrazování

Display path ends – zvýrazní konce neuzavřených cest barevným puntíkem

Display border – barevným puntíkem zvýrazní konce cest na okraji mapy

Display curve points – zobrazí koncové body úseček a Bézierových křivek, ze kterých jsou složeny vrstevnice

Display control points – zobrazí řídicí body Bézierových křivek

Display grid – zobrazí mřížku

3.7.2 Nastavení barev

Selected path – barva vybrané vrstevnice a barva, kterou se zvýrazní vrstevnice při najetí myší nad ní

Path ends – barva koncových bodů vrstevnic

Border ends – barva koncových bodů u okraje mapy

Curve points – barva koncových bodů úseček a Bézierových křivek

Control points – barva řídicích bodů Bézierových křivek

Adjacent paths – barva sousedních vrstevnic

Queried paths – barva sekvence vrstevnic, u které se program ptá uživatele na výšku.

Reported paths – barva sekvencí vrstevnic, které program již prošel.

Elevation error – barva sekvencí vrstevnic, u kterých se vyskytly chyby.

Path with elevation – barva, kterou se zvýrazňují vrstevnice s přiřazenou výškou (zapínání a vypínání zvýraznění je na záložce *Order*)

3.7.3 Nastavení mřížky

Spacing X – rozestupy čar mřížky ve směru osy X

Spacing Y – rozestupy čar mřížky ve směru osy Y

Major grid line every – frekvence hlavních čar mřížky

Grid line color – barva základních čar mřížky

Major grid line color – barva hlavních čar mřížky

3.8 Nastavení aplikace

Aplikace před ukončením ukládá všechna nastavení do souboru *parameters.xml*. Po spuštění se nastavení znovu načte. Pokud soubor *parameters.xml* chybí nebo se ho z nějakého důvodu nepodaří přečíst, použije se výchozí nastavení. Pokud se tedy chcete vrátit k výchozímu nastavení, smažte soubor *parameters.xml*. Soubor se znovu vytvoří při dalším ukončení aplikace.

4 Diskuze

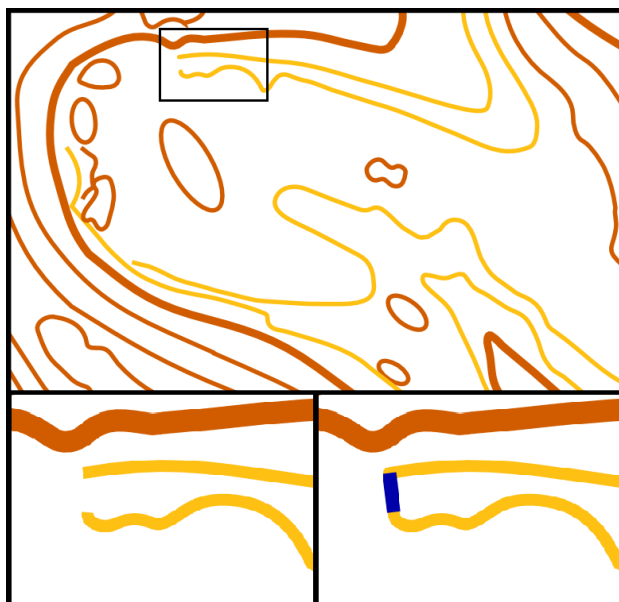
4.1 Napojování vrstevnic

4.1.1 Hodnocení použitých algoritmů

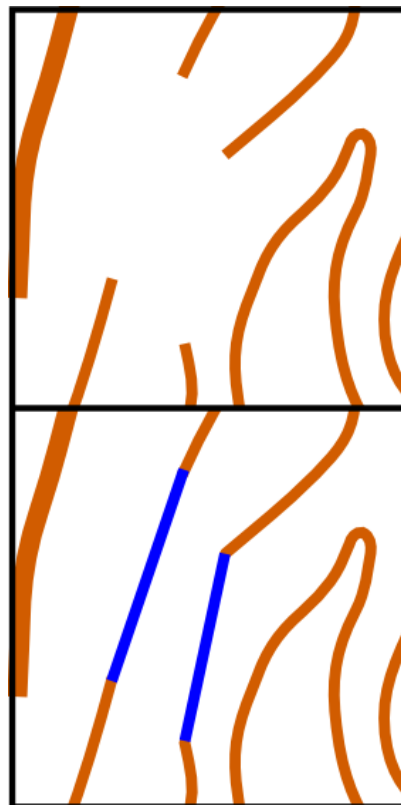
V testovaných datech se podařilo napojit většinu přerušovaných vrstevnic.

Algoritmus dokáže napojit i některá, byť pro člověka na první pohled jasná, ale z hlediska směrů konců cest nejednoznačná místa (Obrázek 43). Naopak si neporadí tam, kde směr konce cesty neodpovídá směru pokračující cesty (Obrázek 44).

V první verzi napojování jsme neměli pomocnou strukturu segmentů a proto



Obrázek 44: Špatné napojení – v tomto místě je hodně chyb a je téměř nemožné, aby se dvě sousední vrstevnice v rámečku správně napojily na dvě vrstevnice dole. Konec dolní vrstevnice v rámečku uhýbá nahoru, a proto se tyto sousední vrstevnice chybně spojí.



Obrázek 43: Správné napojení

ověřit, jestli spojnice koncových bodů neprotíná nějakou jinou cestu, bylo náročné. Po zavedení ověřování se předešlo mnoha chybným napojením a limity pro napojování nemusí být tak přísné.

Hledání okrajových bodů pomocí vysílání paprsků směrem k okrajům a testování průsečíků s jinými cestami funguje poměrně spolehlivě. V testovaných vstupech byly téměř všechny okrajové konce cest nalezeny a žádné cesty na okraji nebyly špatně spojeny.

Pomocné vrstevnice nejsou stylem nijak odlišené od základních vrstevnic. Jejich výskyt byl zdrojem mnoha chyb při napojování. Proto jsme se rozhodli je smazat. Místy je však těžké odlišit pomocnou vrstevnici od krátké části přerušené vrstevnice, a části základních vrstevnic jsou odstraněny také. Odstraněny jsou také spádnice, které by se místo toho daly přidružit ke svým vrstevnicím a použít při přiřazování výšek.

4.1.2 Možnosti zlepšení

U zdůrazněných cest špatné napojení většinou nehrozí, protože mezi dvěma zdůrazněnými cestami často bývají nějaké základní vrstevnice. Zdůrazněné vrstevnice by mohly být napojeny v jednom zvláštním kroku s mírnějšími kritérii napojování.

Napojení úsečkami není pěkné na pohled a většinou ani neodpovídá původní vrstevnici. Místo úseček by se dala použít nějaká metoda na napojování Bézierových křivek.

Pomocné vrstevnice jsou odstraňovány pouze podle vzdálenosti začátku a konce a počtu křivek. Odstraňování pomocných vrstevnic by se jistě dalo vylepšit analýzou jejich tvaru nebo zkoumáním nejbližších okolních cest. Stejně by se daly označit spádovky a zachovat je pro pozdější přiřazování výšek.

4.2 Výšky vrstevnic

4.2.1 Nalezení sousedů

Parametry jsme nastavili tak, aby se minimalizoval výskyt chyb i za cenu toho, že některé sousední vrstevnice nebudou jako sousední označeny. Dvě vrstevnice chybně označené za sousední totiž snižují účinnost algoritmu pro přiřazení výšek. Naopak výšku lze vrstevnici přiřadit i bez znalosti všech jejích sousedů. Tato metoda většinou neodhalí dvě sousední vrstevnice, které jsou krátké. Pro přiřazení výšek však většinou stačí, když mají v seznamu sousedů některou z dlouhých okolních cest.

Analýzou grafu vrstevnic by se daly tyto sousedské vztahy dohledat a nejspíš i najít a opravit chybná přiřazení. K této analýze jsme se nedostali, protože se nám nejevila jako nezbytná. Pro vyzkoušení navrhovaného algoritmu na přiřazování výšek stačí současné určování sousedních vrstevnic.

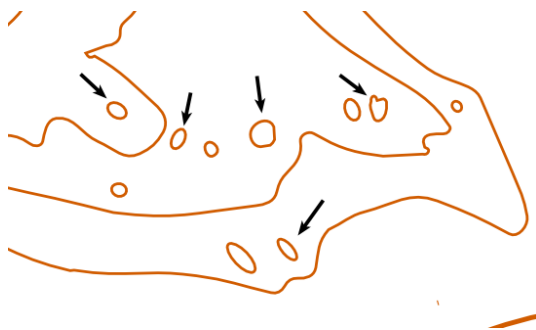
4.2.2 Přiřazení výšek

Program pomůže uživateli přiřadit výšky zdůrazněných vrstevnic a přitom se pokouší přiřadit výšky základním vrstevnicím mezi nimi. Obecně je obtížné určit výšky v rovinnatém terénu, kde má hodně vrstevnic stejnou výšku a nevyskytují se tu zdůrazněné vrstevnice s různou výškou.

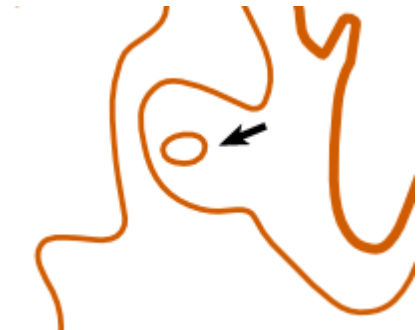
Někdy je uživatel dotázán na výšku na opačné straně mapy, což je nepříjemné a určení takové výšky může být i obtížné. Aby se přeskoky minimalizovaly, navštěvují se nejprve nejbližší vrstevnice. Některé vrstevnice ale procházejí celou mapou a v takových případech se lze přeskokům jen těžko vyhnout.

Přiřazování většinou neřeší výšky krátkých uzavřených vrstevnic, které uvnitř nemají další vrstevnice. Takovéto vrstevnice se většinou nacházejí mezi dvěma vrstevnicemi s různou výškou a mohou mít výšku libovolné z nich (Obrázek 45). Výjimka nastává, pokud je jedna ze sousedních výšek zdůrazněná. Podle tloušťky zjišťované vrstevnice lze určit její výšku (Obrázek 46).

Zde by v některých případech pomohly spádovky, které však byly smazány během napojování.



Obrázek 45: Uzavřené vrstevnice s nejednoznačnou výškou



Obrázek 46: Uzavřená vrstevnice s určitelnou výškou

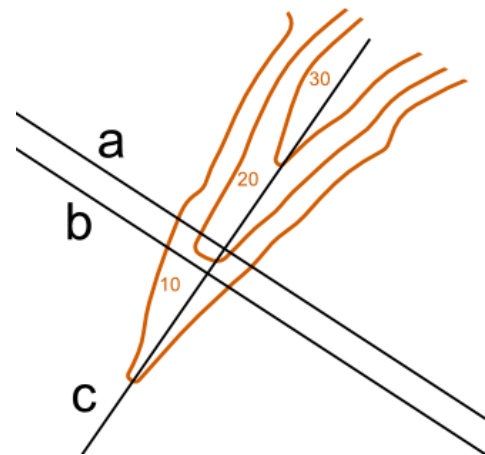
4.3 Vytvoření výškové mapy

Pro vytvoření výškové mapy jsme vyzkoušeli dvě metody. Ani jedna však nedává ideální výsledky.

4.3.1 Catmull-Rom spline

Výhodou interpolace pomocí Catmull-Rom spline je to, že v místech vrstevnic má správnou výšku. Hodnoty interpolovaných výšek také nejsou omezené výškami nejvyšší a nejnižší vrstevnice. Vrcholy prohlubně tak dosahují výšek, které by měly mít.

Výsledek interpolace pomocí Catmull-Rom vypadá nepřirozeně a je vidět, kde byly vrstevnice. Tvoří zde „schodovitý efekt“. Jeho příčina je znázorněna na obrázku Obrázek 47. Schody ve směru paprsku *c* nejsou způsobeny



Obrázek 47: Příčina "schodovitého efektu"

tímto paprskem, ale zprůměrováním s dalšími paprsky. Paprsek *a* na rozdíl od paprsku *b* protíná vrstevnici s výškou 20. Tím mezi nimi vzniká výškový rozdíl, přestože jsou velmi blízko u sebe.

Místy se také dají pozorovat stopy paprsků používaných k interpolaci.

4.3.2 Radiální aproximace

Tuto metodu jsme vybrali na základě Geospatial analysis [2]. Autoři Geospatial analysis na rozdíl od nás vycházeli z uniformních výškových bodů. Naše vzorky jsou však pouze na vrstevnicích a nejsou rozloženy rovnoměrně po celé mapě. Proto jsou naše výsledky horší.

Ze začátku jsme používali pevný poloměr radiální funkce. Poloměr naší radiální funkce musel být dostatečně velký, aby se v jeho dosahu nalézaly vzorky z více vrstevnic. Jinak by výškové mapě vznikly jen rovné plochy. Důsledkem toho však do hodnot na jedné vrstevnici výrazně zasahovaly i hodnoty okolních vrstevnic a hodnoty výškové mapy byly na vrstevnicích nepřesné.

Se zavedením proměnlivého poloměru podle hustoty vrstevnic se nepřesnosti na vrstevnicích výrazně snížily. Velikost poloměru musí být po celé mapě spojitá, jinak se změny poloměrů projeví ve výsledném modelu. Stále však platí, že aproximované

hodnoty jsou vždy omezeny výškou nejnižší a nejvyšší vrstevnice v okolí. Kolem vrcholů a v prohlubních proto není téměř nikdy správná hodnota.

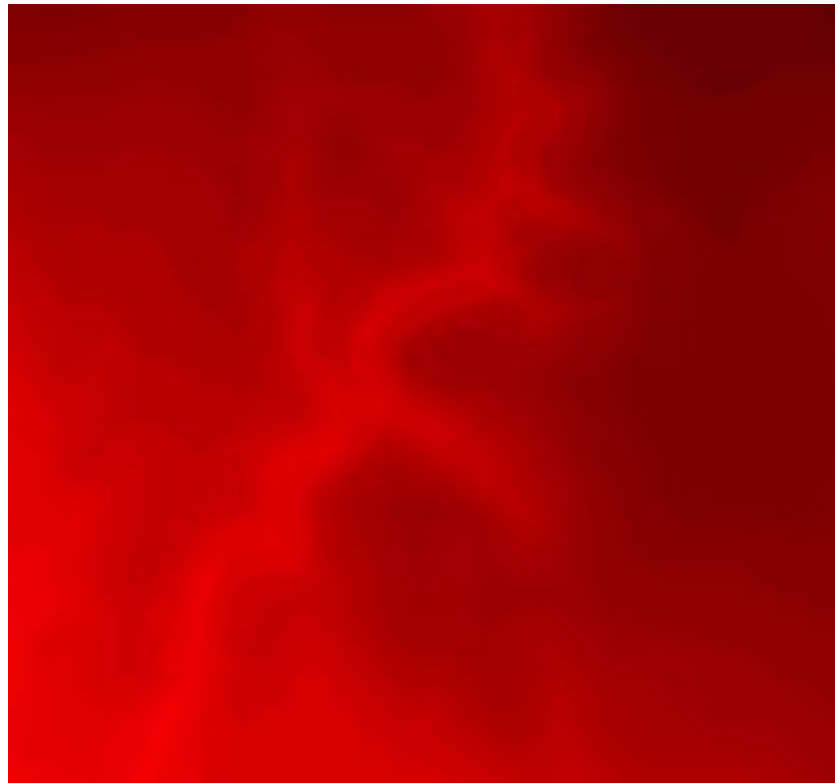
Trojrozměrný model vypadá lépe než u předchozí metody, ale stopy vrstevnic jsou zde stále velmi výrazné.

Návrhy na zlepšení

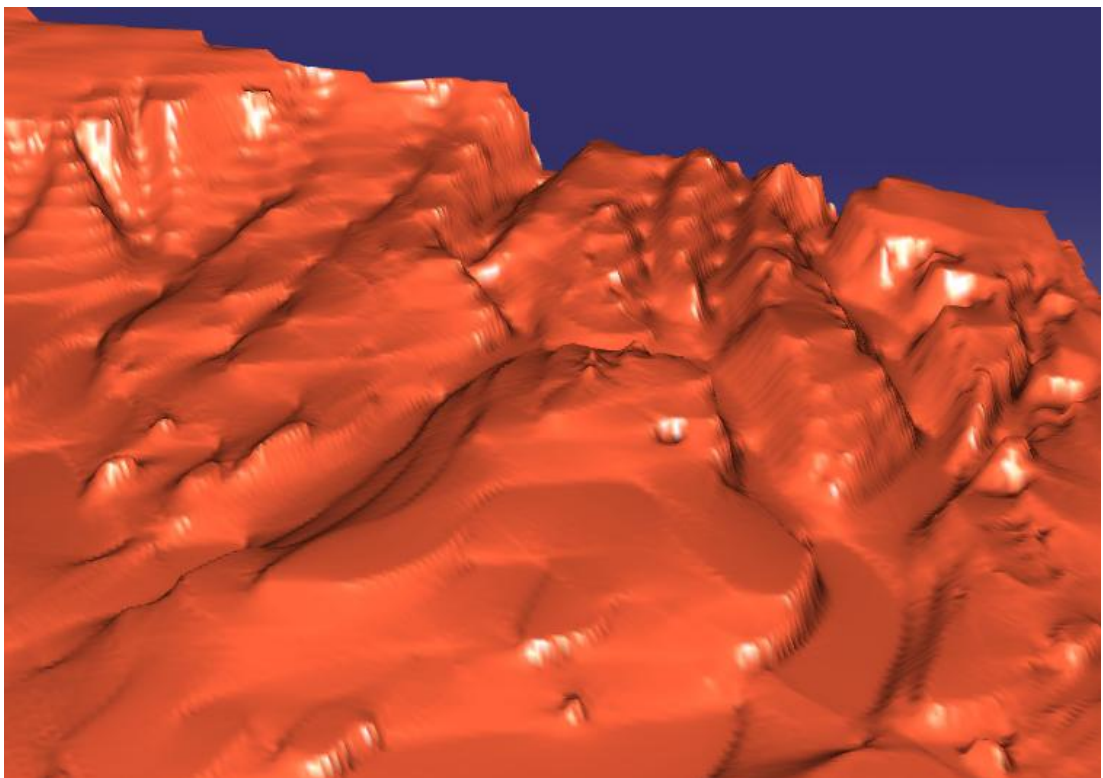
Interpolace by se možná dala zlepšit kombinací obou výše zmíněných metod. Spočítala by se výšková mapa pomocí Catmull-Rom spline a z ní by se vybraly další vzorky pro radiální interpolaci. Například lokální minima a maxima, pro lepší aproximaci vrcholů a prohlubin.



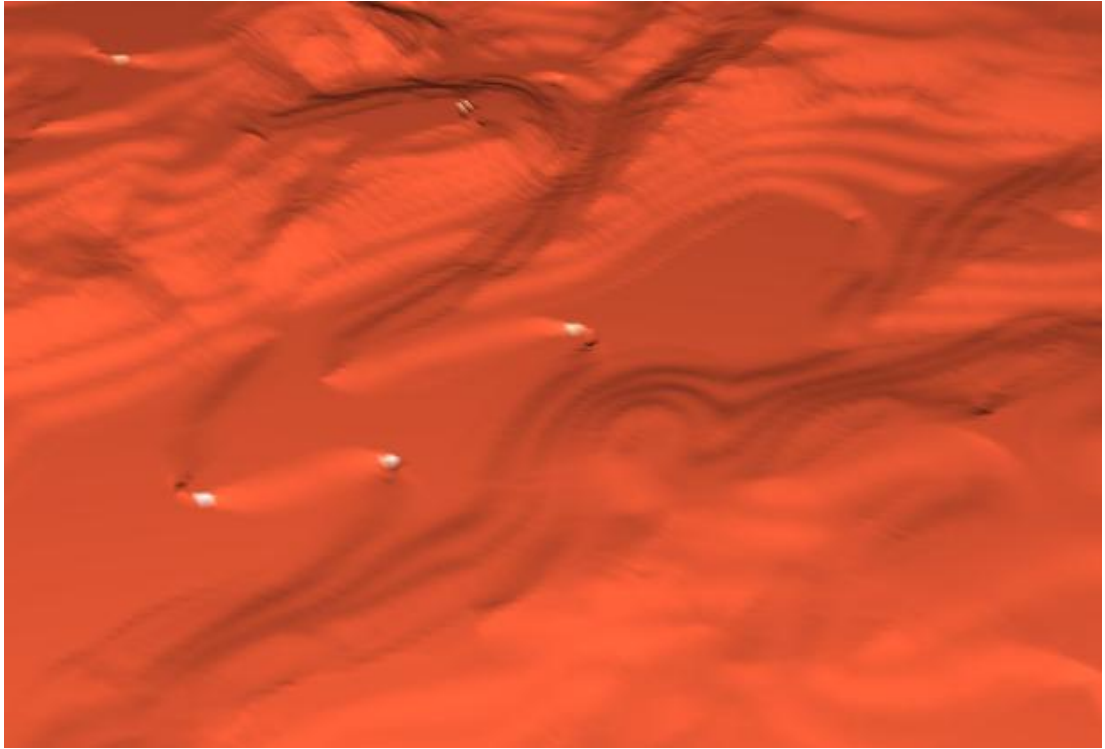
Obrázek 48: Interpolace pomocí Catmull-Rom splines



Obrázek 49: Aproximace radiální funkcí



Obrázek 50: Interpolace pomocí Catmull-Rom splines – vizualizace výškové mapy



Obrázek 51: Aproximace radiální funkcí – vizualizace výškové mapy

5 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout algoritmy na poloautomatickou konverzi sítě vrstevnic do výškové mapy a vytvořit aplikaci, která tyto algoritmy implementuje. Hlavními úkoly bylo: pokusit se napojit přerušené linie vrstevnic, uspořádat správně výšky vrstevnic a vhodnou interpolací či aproximací vygenerovat výškovou mapu terénu.

Vytvořili jsme soubor algoritmů, který dokáže napojit většinu přerušovaných linií vrstevnic. Chybně napojené vrstevnice jsou z velké části způsobeny nestandardními chybami ve vstupních datech.

Navrhli jsme základní verzi algoritmu, který uživateli usnadní správné uspořádání výšek vrstevnic. S větším rostoucím počtem chyb v mapě však roste počet vrstevnic, které musí uživatel v průběhu algoritmu zadat. Na některé chyby program upozorní, jiné může uživatel rozpoznat z chování aplikace. Běžné chyby je možné přímo v aplikaci opravit.

Implementovali jsme interpolaci pomocí Catmull-Rom splines a aproximaci radiální funkcí. Ani jedna z metod však není ideální. Na výškové mapě terénu interpolované pomocí Catmull-Rom splines zůstávají zvýrazněné linie vrstevnic. Aproximace radiální funkcí zase není přesná a rozměňuje lokální minima a maxima. U aproximace i interpolace jsou místy pozorovatelné dráhy interpolačních přímků resp. kruhy radiální funkce.

Program byl koncipován jako experimentální aplikace, která zvládá celou poloautomatickou konverzi. Program není vyladěný na rychlost a některé úkony by se daly urychlit. Kromě zmíněných algoritmů, nenabízí další funkce, které by mohl uživatel ocenit, jako například lepší editaci mapy. To však nebylo součástí zadání.

Seznam použité literatury

- [1] Richard Čapek a kolektiv: Geografická kartografie, SPN, 1992
- [2] Michael de Smith, Paul Longley, Mike Goodchild: Geospatial Analysis – A comprehensive guide, 2005, <<http://www.spatialanalysisonline.com>>
- [3] Josef Pelikán: prezentace k přednášce Počítačová grafika na MFF UK, <<http://cgg.mff.cuni.cz/lectures/>>
- [4] E. Catmull and R. Rom: A class of local interpolating splines. In Computer Aided Geometric Design, R. E. Barnhill and R. F. Reisenfeld, Eds. Academic Press, New York, 1974
- [5] Martin D. Buhmann: RadialBasisFunctions. Cambridge University Press, 2003
- [6] Vlastimil Havran, Heuristic Ray Shooting Algorithms – disertační práce, České vysoké učení technické, Fakulta elektrotechnická, 2000
- [7] OCAD, < <http://www.ocad.com/> >
- [8] Scalable Vector Graphics (SVG), <<http://www.w3.org/TR/SVG/>>
- [9] Extensible Markup Language (XML), < <http://www.w3.org/XML/> >
- [10] Wavefront OBJ, <<http://www.fileformat.info/format/wavefrontobj/egff.htm>>
- [11] www.wikipedia.org: Geographic information system (GIS) <http://en.wikipedia.org/wiki/Geographic_information_system>

Přílohy

Obsah CD

Součástí této práce je přiložené datové CD s následujícím obsahem:

- kopie této práce ve formátu PDF
- aplikace Převod vrstevnic na výškovou mapu
- zdrojové kódy aplikace
- programátorská dokumentace k jednotlivým třídám a metodám

Programátorská dokumentace

Třída Path

Třída `Path` reprezentuje vrstevnici nebo její část. Odpovídá jednomu SVG elementu `path`. Stejně jako v SVG obsahuje posloupnost kreslicích příkazů `PathData`. Ty mohou být typu `CurveTo` – Bézierova křivka nebo `LineTo` – přímka. Třetím typem je `JoinTo`, který je však stejný jako `LineTo`, a používá se jako spojnice vrstevnic napojených v aplikaci, aby byly odlišeny od původních `LineTo`.

Pro hledání nejbližších vrstevnic a počítání průsečíků vrstevnic s paprsky obsahuje `Path` redundantní reprezentaci, kde je vrstevnice lomenou čarou. Lomená čára je složena z krátkých úseček `KDSegment`, nad kterými je postaven KD-strom. Také obsahuje seznam sousedních vrstevnic a referenci na třídu `Map`, do níž patří. Součástí jsou metody pro vykreslení vrstevnice, otočení vrstevnice, editaci sousedních vrstevnic a její výšky.

Dále se v textu často píše o vrstevnicích. Pojmem vrstevnice se zde rozumí také instance třídy `Path`.

Map

Třída `Map` reprezentuje jednu vrstevnicovou mapu a obsahuje seznam cest a seznam jejich volných konců. `Map` zajišťuje vykreslování vrstevnic do bitmapy, napojování vrstevnic, hledání sousedních vrstevnic a je prostředníkem mezi oknem aplikace (třídou `CSForm`) a třídami `Ordering`, `HeightField`, `KDTree` a `AdjacencyMatrix`.

SVGLoader

Třída `SVGLoader` prochází strom SVG elementů a vyhledává elementy `Path`. Při procházení stromem je udržován seznam transformací od kořenového elementu. U nalezených elementů `Path` se naparsuje element `D` obsahující posloupnost úseček a Bézierových křivek v textové podobě, a jsou na ně aplikovány všechny transformace. Dále je uložena tloušťka a barva čar.

KDTree

`KDTree` je KD-strom umožňující rychlé počítání průsečíků s vrstevnicemi a hledání nejbližší vrstevnice. Pracuje redundantní reprezentací vrstevnic pomocí krátkých úseček `KDSegment`. Délka všech segmentů je omezena a oblasti uzlů KD-stromu se mírně překrývají, takže je možné za polohu segmentů brát bod v jejich středu. Všechny segmenty jsou uloženy v listech.

Ordering

`Ordering` obsahuje metody pro poloautomatické přiřazení výšek. Dvě základní metody pro prohledávání grafu sousednosti vrstevnic jsou `RunOrdering` a `RunBFS`. Stav obou metod se ukládá. Metody vrací mezivýsledky a jsou opětovně volány, aby pokračovaly v práci. Návrátová hodnota je výčtového typu `Interruption`, který udává důvod ukončení metody.

```
public enum Interruption
{
    SlopeElavationError, SameElevationError, ElevationAsignError,
    ElevationQuery, ProgressReport, Finish
}
```

`SlopeElevationError` je problém s přiřazením výšek vrstevnic mezi dvěma zdůrazněnými vrstevnicemi jiné výšky, `SameElevationError` je stejný problém mezi dvěma zdůrazněnými vrstevnicemi se stejnou výškou a `ElevationAsignError` nastane při pokusu přiřadit vrstevnici neplatnou výšku (vrstevnice už má přiřazenou jinou výšku nebo zdůrazněné vrstevnici je přiřazena výška základních vrstevnic a naopak).

`ProgressReport` slouží k tomu, aby byla v mapě označena posloupnost s právě přiřazenými výškami, a poté je metoda automaticky zavolána znovu.

Hodnota `ElevationQuery` je vrácena, když je nutné, aby uživatel vybral výšku nějaké vrstevnice. `Finish` značí dokončené hledání.

`RunBFS` prohledává graf do šířky od zvolené zdůrazněné vrstevnice s přiřazenou výškou až do hloubky rovné frekvenci zdůrazněných vrstevnic. Když je nalezena posloupnost se zdůrazněnými vrstevnicemi na začátku a na konci, která má uprostřed pouze základní vrstevnice, program takovým posloupnostem zkouší přiřadit výšky. Pokud se přiřazení výšek podaří, koncová zdůrazněná vrstevnice se přidá do seznamu budoucích kořenů vyhledávání a prohledávání pokračuje. Pokud se výšky nedají určit, přidá se posloupnost do seznamu posloupností bez výšek. Pokud se při přiřazování výšek narazí na chybu, prohledávání se přeručí a chybná posloupnost se zobrazí uživateli, který jí může opravit.

`RunOrdering` spouští `RunBFS` z možných kořenů prohledávání. Pokud je seznam kořenů prázdný a existuje posloupnost bez výšek, metoda končí s hodnotou `ElevationQuery`. Očekává se, že uživatel přiřadí výšky v posloupnosti a poslední vrstevnice posloupnosti se přidá do seznamu kořenů prohledávání.

Pokud je seznam posloupností bez výšek prázdný, metoda končí s hodnotou `Finish`.

HeightField

`HeightField` je abstraktní třída reprezentující výškovou mapu. Obsahuje metody pro export dat. V aplikaci jsou dvě její implementace `CatmullRomHeightField` a `RadialBasisHeightField`, které výškovou mapu vytvářejí.

CatmullRomHeightField

Třída `CatmullRomHeightField` interpoluje výškovou mapu pomocí Catmull-Rom splinů. Kromě dvourozměrného pole `Heights`, ve kterém bude uložena výšková mapa, využívá další pole o stejných rozměrech – `Counter`. Pole `Heights` se použije jako akumulátor výšek, v poli `Counter` se počítá celkové množství akumulovaných výšek. Na závěr výpočtu se `Heights` vydělí polem `Counter`.

Pod zvoleným počtem úhlů se vyšlou paprsky přes vrstevnicovou mapu. Pomocí KD-stromu se spočtou průsečíky s vrstevnicemi. Vzdálenost průsečíku od počátku paprsku a výšky protnutých vrstevnic se použijí jako souřadnice kontrolních bodů

pro Catmull-Rom spline. V každém bodě paprsku lze podle jeho vzdálenosti od počátku paprsku spočítat jeho nadmořskou výšku.

Ve výškové mapě se naleznou pixely, kterými paprsek prochází. V těchto pixelech se vypočítají koeficienty výšky jako poměrná část pixelu, do které paprsek zasahuje. Koeficient se přičte do pole `Counters`, vypočtená výška vynásobená koeficientem se přičte do `Heights`. Nakonec se každý pixel `Heights` vydělí příslušným pixelem v poli `Counters`.

RadialBasisHeightField

Třída `RadialBasisHeightField` aproximuje výškovou mapu radiální funkcí. Z vrstevnic se vyberou vzorky – `Samples`, které obsahují souřadnice na mapě, výšku a vrstevnici, z které byly vytvořeny. Každá vrstevnice se navzorkuje rovnoměrně podle dané vzorkovací frekvence. Vzorky jsou uloženy v mřížce `SamplesGrid`. V každém bodě výškové mapy se inverzní multikvadrickou radiální funkcí spočítá výška. Poloměr radiální funkce se spočítá kosinovou radiální funkcí s pevným poloměrem z poloměrů uložených v `SamplesGrid`.

SamplesGrid

`SamplesGrid` je pomocná datová struktura pro hledání nejbližších vzorků a pro výpočet poloměru radiální funkce. `SamplesGrid` obsahuje 3 dvourozměrná pole stejné velikosti - `samplesGrid`, `radiusGrid` a `samplesInRadiusGrid`. Pole `samplesGrid` obsahuje vzorky utříděné podle vrstevnic, z nichž byly vytvořeny. Pole `radiusGrid` obsahuje minimální vzdálenosti, dvou nejbližších vrstevnic ze všech míst v dané buňce mřížky. Pole `samplesInRadiusGrid` obsahuje všechny vzorky v dané vzdálenosti, utříděné podle příslušných vrstevnic.

Vyplnění `radiusGrid` a `samplesInRadiusGrid` probíhá tak, že se z každé buňky prohledává oblast okolních buněk do čtverce. Prohledávání probíhá v krocích, v každém kroku vyhledávání se čtverec zvětší o jednu buňku mřížky ve všech 4 směrech. Vzdálenost k druhé nejbližší vrstevnici od výchozí buňky se uloží do `radiusGrid` jako poloměr. Všechny nalezené vrstevnice se uloží do `samplesInRadiusGrid`.

Uživatelské rozhraní

Třída CCForm

Aplikace využívá WinForms rozhraní. Po spuštění aplikace se vytvoří instance třídy CCForm, která dědí od `System.Windows.Forms.Form`. CCForm obsahuje vykreslenou mapu, ovládací panel a stavový panel. V horní části aplikace je TabControl, je jehož záložkách se vykresluje vrstevnicová mapa. Pro překreslování a pohyb po mapě slouží DragScrollTabPage, která dědí od TabPage a navíc umožňuje posunování mapy tažením myši a přibližování a oddalování mapy kolečkem myši. Vlastní mapa se vykresluje do komponenty MapPictureBox. K asynchronnímu vykreslování map ve všech záložkách slouží AsyncMapPainter.

Ovládací panel je další TabControl. V každé jeho záložce je implementace abstraktního ovládacího prvku AbstractActionControl, který slouží k nastavení nebo ovládní aplikace. FileControl načítá a ukládá soubory, JoinControl řídí napojování vrstevnic, přiřazování výšek je rozděleno do dvou záložek Order1Control a Order2Control, HeightFieldControl vytváří výškovou mapu, EditControl umožňuje editovat vrstevnice, DisplaySettingsControl slouží k nastavení vykreslování mapy a v AdvanceSettingsControl se nastavují parametry pro napojování.

Ve stavovém panelu je hodnota zvětšení mapy (zoom), počty Path a PathData v mapě.

Časově náročnější operace s vrstevnicemi jsou prováděny asynchronně pomocí třídy `System.ComponentModel.BackgroundWorker`. BackgroundWorker vykonává metody v novém vlákne a zajišťuje bezpečnou komunikaci mezi tímto vlákne a vlákne aplikace tak, že vyvolává události o průběhu a dokončení asynchronní operace přímo ve vlákne aplikace.

Pro provádění asynchronních operací se používají 3 delegáti. WorkerReportProgress umožňuje vypsát stav aplikace do stavového řádku a posouvat ukazatelem pokroku z vlákna třídy BackgroundWorker. MapOperation s instancí WorkerReportProgress jako argumentem a MapOperationCompleted. Metoda delegáta MapOperation se provádí

v novém vlákně a dostává `WorkerReportProgress` jako argument. `MapOperationCompleted` je zavolán po dokončení asynchronní operace.

PathEdit

Ve třídě `PathEdit` je uložena právě vybraná vrstevnice. `PathEdit` poskytuje její hodnoty skrze rozhraní `INotifyPropertyChanged`. To umožňuje svázat položky `Path` pomocí `DataBindings` s prvky okna aplikace.

DragScrollTabPage

Třída `DragScrollTabPage` obsahuje `MapPictureBox`, do kterého se vykresluje mapa, a umožňuje vybírání vrstevnic, posouvání a přibližování mapy. Třída reaguje na události `MouseDown`, `MouseUp`, `MouseMove` a `MouseScroll`. Při každém pohybu myši nad mapou se najde pomocí KD-stromu nejbližší vrstevnice, a pokud se nachází dostatečně blízko kurzoru myši, barevně se označí. Stiskem a uvolněním levého tlačítka myši se zvýrazněná vrstevnice vybere. Po vybrání nové vrstevnice je vyvolána událost `PathSelected`. Po stisku levého tlačítka myši se aktivuje posouvací režim. Podle následného pohybu myši se posouvá mapa. Pohybem kolečka myši se mapa přibližuje a oddaluje.

MapPictureBox

`MapPictureBox` dědí od třídy `System.Windows.Forms.PictureBox`. Obsahuje bitmapy vrstevnicové a výškové mapy. Přepsáním metody `onPaint()` se překreslují přes vrstevnicovou mapu zvýrazněné, vybrané a sousední vrstevnice, úsečky a Bézierovy křivky. Vybrané a sousední vrstevnice získá z instance `PathEdit`, získané v konstruktoru `MapPictureBox`. Další vykreslované objekty jsou uloženy přímo ve třídě a `MapPictureBox` poskytuje metody k jejich přidávání a odebrání.

AsyncMapPainter

`AsyncMapPainter` asynchronně vykresluje vrstevnicovou mapu ve vektorovém formátu a výškovou mapu, uloženou ve dvourozměrném poli do rastrového obrázku. Asynchronní operace zajišťuje `System.ComponentModel.BackgroundWorker`, který provádí metody v novém vlákně a zároveň zajišťuje bezpečnou komunikaci mezi ním a vláknem aplikace. `BackgroundWorker` vyvolává události o průběhu a dokončení

asynchronní operace přímo ve vlákne aplikace. Z vlákna aplikace lze vznést požadavek na zastavení asynchronní operace. `AsyncMapPainter` používá jedno vykreslovací vlákno k postupnému vykreslování různých map. Mapa s parametry pro vykreslení je uložena v instanci třídy `PaintActivity`.

`PaintActivity` obsahuje instance `Map`, obsahující mapová data, `DrawParameters` s nastavením vykreslování, `MapPictureBox`, do kterého se nakreslené obrázky uloží a příznak, zda se má kreslit vrstevnicová nebo výšková mapa. `PaintActivity` generuje identifikační číslo podle svého `MapPictureBox` a druhu mapy, která se má vykreslit. Takže pokud dvě `PaintActivity` kreslí do stejného `MapPictureBox` výškovou mapu, budou mít stejné identifikační číslo.

`PaintActivity` jsou uloženy podle svých ID. Pokud se aktivita ještě nenakreslila a již má být vykreslena nová se stejným ID, stará se zahodí a nahradí se novou. `AsyncMapPainter` lze nastavit prioritní ID. Při vykreslování nové aktivity se nejprve hledá aktivita s prioritním ID. Po úspěšném vykreslení je obrázek uložen do `MapPictureBox`.

Parametry

Aktuální stav aplikace je uložen ve třídě `ApplicationSettings`. Ta implementuje rozhraní `INotifyPropertyChanged`, které umožňuje automatickou synchronizaci s prvky Windows Forms pomocí `DataBindings`.

Parametry pro operace s vrstevnicemi jsou potomky třídy `Parameters`. Také implementují rozhraní `INotifyPropertyChanged` a jsou přímo svázány s uživatelským rozhráním. Oproti `ApplicationSettings` se navíc při ukončení aplikace serializují do XML souboru. Při dalším spuštění se opět načtou. Jsou to `DrawParameters` určující barvy a další parametry zobrazovaných map, `JoinParameters` obsahující parametry napojování, `OrderParameters` obsahující parametry hledání sousedních vrstevnic a `MapParameters` obsahující měřítko mapy a další mapové informace.

Serializaci parametrů do XML zajišťuje `SerializationContainer`.

AbstractActionControl

`AbstractActionControl` je předek jednotlivých ovládacích panelů a obsahuje metody, které využívá více panelů, jako je například vybírání barev z palety.

FileControl

`FileControl` je panel pro práci se soubory a nastavení parametrů načítané mapy `MapParameters`. `FileControl` ukládá vrstevnicovou mapu do SVG a výškovou mapu do CSV nebo jako trojúhelníkovou síť ve formátu WaveFront OBJ.

JoinControl

Panelem `JoinControl` se řídí napojování vrstevnic. U většiny napojovacích kroků lze regulovat parametry napojování ovládacím prvkem `TrackBar`. Před napojovací operací se aktuální instance třídy `Map` celá zkopíruje a operace se provede na kopii. Původní instance `Map` se vykreslí v další záložce `DragScrollTabPage` a uživatel si může přepínat mezi zobrazením mapy před a po provedení operace. Tlačítkem *Undo* lze načíst zpátky původní verzi `Map` a akci tím vrátit.

Vlastní napojování provádí `BackgroundWorker` ve třídě `CCForm`. `JoinControl` zavolá metodu `DoInWorker()` na instanci `CCForm` a předá jí delegáty `JoinOperation`, odkazující na napojovací metodu a `JoinOperationCompleted`, který se vykoná již ve vlákne aplikace po dokončení asynchronní operace.

Order1Control

Panel `Order1Control` ovládá poloautomatické vrstevnice. Po inicializaci třídy `Ordering` je opakovaně volána její metoda `RunOrdering()`. Podle její návratové metody se uživateli zobrazují informace o průběhu. Uživateli se zobrazí aktuální posloupnost vrstevnic. Když je potřeba vybrat výšku nějaké vrstevnice, zobrazí se uživateli `ListBox` s možnými volbami. Vrstevnice, kterým byla přiřazena výška, se barevně zvýrazňují.

Order2Control

Panel `Order2Control` umožňuje zobrazení vrstevnic, které mají vzhledem k jejich sousedním vrstevnicím špatnou výšku. Dále umožňuje přiřazení výšek vrstevnicím ležících mezi vrstevnicemi s výškovým rozdílem rovným dvojnásobku

základního vrstevnicového intervalu. Dále umožňuje hromadné ruční přiřazování výšek. Po zapnutí hromadného výběrového módu se všechny uživatelem vybírané vrstevnice přidávají do seznamu prvku `ListBox`. Vybraným vrstevnicím jak pak možné hromadně přiřadit stejnou výšku.

EditControl

`EditControl` umožňuje zobrazit a editovat vlastnosti vrstevnice vybrané ve třídě `PathEdit`. Dále slouží k editaci sousedních vrstevnic a ručnímu napojování a rozpojování vrstevnic. Aby bylo možné cokoliv editovat, musí být vybrána nějaká vrstevnice a uložena v `PathEdit`.

Kliknutím na tlačítko *Join with...* se zapne napojovací režim. Po vybrání další vrstevnice v mapě se budou dvě vybrané vrstevnice napojovat. Nejprve se zobrazí spojovací linie mezi dvěma nejbližšími konci vrstevnic. Pokud se vybraly správné konce, uživatel potvrdí napojení tlačítkem *Yes*. Kliknutím na tlačítko *No* se zobrazí další možnosti napojení. Po odmítnutí všech 4 kombinací konců vrstevnice se napojování ukončí.

K rozpojování vrstevnic slouží `Listbox` zobrazující všechny instance `PathData` vybrané vrstevnice. Vrstevnice se rozpojí smazáním nějaké nekrajní instance `PathData`. Po aktivaci výběrového módu lze `PathData` aktuální vrstevnice vybírat také myší na mapě.

HeightFieldControl

`HeightFieldControl` slouží k vytváření výškové mapy. Výškové mapy se vytváří asynchronně. Po stisku nastavení parametrů a stisku tlačítka pro vytvoření mapy se zavolá metoda `DoInWorker()` třídy `CCForm` a předají se jí delegáti na metodu vytvářející výškovou mapu a metodu volanou po dokončení asynchronní operace.

DisplaySettingsControl a AdvanceSettingsControl

`DisplaySettingsControl` a `AdvanceSettingsControl` slouží k nastavení parametrů zobrazování a pokročilých nastavení napojování. Ovládací prvky jsou pomocí `DataBindings` napojeny na položky tříd s parametry implementujícími rozhraní `INotifyPropertyChanged`.