

Semestrální práce z předmětu

KMA/POK

Počítačová kartografie

**3D generalizace budov
(3D building generalization)**

Pavla Králíčková
A08N0004P
kralicko@students.zcu.cz

Obsah

Obsah	2
Seznam obrázků	3
Seznam tabulek	3
Úvod	4
1. Problematika 3D generalizace budov	5
1.1 Level of detail (LoD)	5
1.2 Metody sběru dat	6
1.3 Typy 3D modelů budov	6
1.4 Metody 3D generalizace budov	7
1.4.1 Segmentace struktury budovy	7
1.4.2 Rozeznávání struktury budovy	7
1.4.3 Generalizace modelu budovy	8
1.4.4 Vizualizace modelu budovy	8
2. 3D generalizace budov podle Martina Kady	9
2.1 Generalizace fasády budovy	9
2.2 Generalizace střešní konstrukce	9
2.2.1 Generalizace pomocí podprostorů	9
2.2.2 Generalizace pomocí primitivních typů střešních konstrukcí	10
2.2.3 Generalizace střešní konstrukce typifikací	12
3. 3D generalizace budov podle Andrey Forberg	13
3.1 Generalizace s využitím poznatků z analýzy obrazu a matematické morfologie	13
3.2 Generalizace posunutím rovnoběžných stěn	14
4. 3D generalizace budov pomocí retriangulace	15
5. 3D generalizace modelu města	16
5.1 Generalizace pomocí jednoduchých buněk	16
5.2 Generalizace pomocí konvexním obalu	16
5.3 Generalizace pomocí voxelizace	17
5.3.1 Voxelizace	17
5.3.2 Operace nad rastrovými daty	17
6. Zhodnocení popsaných generalizačních procesů	19
6.1 Zhodnocení jednotlivých generalizací	19
6.1.1 3D generalizace podle Martina Kady	19
6.1.2 3D generalizace podle Andrey Forberg	20
6.1.3 3D generalizace pomocí retriangulace	20
6.1.4 3D generalizace modelu města	21
6.2 Porovnání popsaných generalizací	21
6.3 Kombinace generalizačních postupů	23
Závěr	24
Zdroje	25

Seznam obrázků

<i>Obr. 1 LoD pro CityGML</i>	6
<i>Obr. 2 Základní typy fasád budovy a střešních konstrukcí</i>	8
<i>Obr. 3 Procentuální zastoupení zastavěné plochy v podprostorech</i>	9
<i>Obr. 4 Ukázky nerovností po generalizaci střešní konstrukce</i>	10
<i>Obr. 5 Ukázka původních a generalizovaných modelů</i>	10
<i>Obr. 6 Primitivní typy střešní konstrukce</i>	11
<i>Obr. 7. Vstupní 3D model budovy, generalizace střešní konstrukce podle postupu uvedeném v článku [1] a generalizace pomocí primitivních typů</i>	11
<i>Obr. 8 Vstupní 3D model budovy, generalizovaná fasáda budovy a výsledný model se střešní konstrukcí generalizovanou pomocí primitivních typů</i>	12
<i>Obr. 9 Příklad využití typifikace pro generalizaci střešní konstrukce</i>	12
<i>Obr. 10 Ukázky speciálních struktur ve 2D a ve 3D</i>	13
<i>Obr. 11 Ukázka nové metody: rovnoběžné stěny jsou posouvány proti sobě</i>	14
<i>Obr. 12 Metoda squaring pro střešní struktury</i>	14
<i>Obr. 13 Tři typy trojúhelníků po Delaunayho triangulaci</i>	15
<i>Obr. 14 Generalizace pomocí jednoduchých buněk</i>	16
<i>Obr. 15 Voxelizace: původní vektorový model, výsledek voxelizace z velikosti mřížky 2m a výsledek filtrované voxelizace se stejnou velikostí mřížky</i>	17
<i>Obr. 16 Vstupní mode, použití operace dilation a erosion</i>	18
<i>Obr. 17 Ukázka model před a po retriangulaci</i>	20

Seznam tabulek

<i>Tabulka 1 Porovnání generalizací z hlediska možnosti nastavení LoD</i>	22
<i>Tabulka 2 Porovnání generalizací z hlediska typu dat, pro který je určena</i>	22

Úvod

Výpočetní technika a multimedia zaznamenaly v posledních letech rychlý vývoj. Tento trend se samozřejmě projevil také v geoinformačních systémech a kartografii. Dnes je již spíše výjimkou uživatel klasických map. Prakticky každý má dnes přístup k internetu, kde jsou hojně využívanou aplikací např. mapové portály.

Vývoj však šel dál a pohled na pouhou 2D mapu již dnes nikoho neoslňuje. Popularitu získávají 3D modely měst. Zdá se, že je otázkou prestiže každého města, provozovat aplikaci 3D modelu města.

S přechodem ze země, tedy z 2D modelů, do 3D prostoru přibylo nejen dat, ale také mnoho kartografických problémů při vizualizaci těchto dat. Jedním ze základních otázek vizualizace je generalizace, která právě s 3D modely měst a budov nabyla na důležitosti.

První kapitola této semestrální práce se věnuje tématu 3D generalizace budov z obecného pohledu, zmiňuje některé ze důležitých pojmů týkajících se této problematiky a ukazuje, že před začátkem generalizace je nutné zodpovědět některé otázky týkající se původu a struktury vstupních dat.

Další část práce je věnována různým postupům generalizace, které byly publikovány v posledních třech letech. Každý z postupů, které zde budou popsány, pohlíží na problém 3D generalizace budov z jiného úhlu pohledu.

Autorem prvních dvou zdrojových článků je Martin Kada. Jeho přístup ke 3D generalizaci budov se od dalších zde zmíněných odlišuje zejména důrazem na generalizaci střešní konstrukce. Tento aspekt je v jiných článcích opomíjen, či záměrně potlačen.

Jiný přístup ke generalizaci reprezentuje ve svém článku Andrea Forberg. Popisuje dva způsoby 3D generalizace budov. Zejména druhý z těchto přístupů je po úpravě vstupních dat obecně použitelný a snadný na implementaci.

Další ze zde prezentovaných článků je článek týmu z univerzity v ZhengZhou, který je ukázkou generalizace budov reprezentovaných množinou trojúhelníků. Tento přístup ke 3D generalizaci budov je zaměřen zejména na zredukování množství vstupních dat.

Posledním ze zde popisovaných článků se týká 3D generalizace modelu města. Na rozdíl od předchozích článků je tento zaměřen na vyšší stupeň generalizace, zejména na generalizaci celých uličních bloků modelu města.

V šesté kapitole jsou popsány generalizace zhodnoceny a z několika vybraných hledisek porovnány. Dále je navržena kombinace uvedených generalizačních procesů pro dosažení optimální vizualizace modelu města.

1. Problematika 3D generalizace budov

Před samotným popisem způsobů 3D generalizace budov, které jsou obsahem většiny zdrojových článků, je nutné seznámit se s problematikou 3D generalizace budov v širším kontextu a osvětlit pojmy s ní svázané.

V této kapitole budu čerpat převážně z knihy *Generalisation of Geographic Information: Cartographic Modelling and Applications* [3]. Tato publikace byla vydána za podpory Mezinárodní kartografické asociace (*International Cartographic Association*). Obsahuje 17 článků různých autorů, jejichž společným jmenovatelem je kartografická generalizace. Článek Andrey Forberg a Luqui Menga *3D building generalization* se úzce dotýká tématu této semestrální práce. Článek přistupuje ke generalizaci 3D budov v obecnější rovině.

1.1 Level of detail (LoD)

Jedním ze základních termínů používaných v rámci 3D generalizace budov a při tvorbě 3D modelů měst je termín *level of detail* (LoD), čili úroveň podrobnosti. Tento termín popisuje, až do jakých detailů má být objekt vizualizován. Úroveň podrobnosti je úzce spjata s generalizací, resp. se stupněm generalizace, který před vizualizací použijeme.

Jedním z cílů 3D modelů měst je snaha o vyvolání dojmu, že se ve městě opravdu nacházíte, procházíte jeho ulicemi, případně nad ním prolétáte. Rozlišovací schopnost lidského oka je snižuje se vzrůstající vzdáleností pozorovaných objektů. Při pohledu do ulic virtuálního města máte mít dojem, že budovy blíže k vám jsou zobrazené do nejmenších detailů, kdežto s přibývajícím vzdáleností od pozorovatele detailů ubývá, až na horizontu vidí pouhé obrysy budov, či bloků budov. Na rozdíl od klasické mapy s pevně daným měřítkem a tedy i stupněm generalizace je v tomto případě nutné v jednom pohledu vizualizovat budovy v různých stupních generalizace.

Na rozdíl od klasických 2D map, kde je v závislosti na měřítku definován také stupeň generalizace, neexistují pro LoD žádná všeobecně uznávaná pravidla. V podstatě každý odborník zabývající se generalizací 3D budov si stanovuje vlastní pravidla pro charakteristiku různých LoD.

Úrovně podrobnosti jsou rozlišovány čísly, čím vyšší číslo, tím větší úroveň podrobnosti. Autoři obvykle rozlišují 3 až 5 stupňů LoD.

Příkladem LoD může být např. škála stanovená Thiemannem v roce 2004:

- LoD1 – seskupené bloky budov o stejné výšce,
- LoD2 – bloky jednotlivých budov bez střešních struktur,
- LoD3 – LoD2 s jednoduchými střešními strukturami.

Podle vzdálenosti od místa pozorovatele jsou jednotlivé budovy zařazeny do LoD a je provedena příslušná generalizace.

Jiný příklad volby LoD je uveden v [6]:

- LoD0 – model oblasti,
- LoD1 – model města bez střešních struktur,
- LoD2 – model města se střešními strukturami,
- LoD3 – detailní model,
- LoD4 – model vnitřku budovy.

Vizuální podoba uvedených definic LoD, která se využívá v CityGML (více informací na <http://www.citygml.org>), je uvedena na obr. 1.



Obr. 1 LoD pro CityGML

1.2 Metody sběru dat

Jednou z otázek, na kterou si musíme před samotným započítáním generalizačního procesu odpovědět, je otázka původu dat. To, jakým způsobem byla data pořízena, vypovídá o přesnosti modelů budov vstupujících do procesu generalizace. Tato otázka je důležitá v prakticky všech geovědách.

Při znalosti přesnosti měření a tedy i přesnosti modelu budovy můžeme predikovat odchylky modelu budovy od reálného stavu. Vzhledem k obvyklé konstrukci lze například předpokládat pravouhlost budovy. Tento předpoklad pravděpodobně vzhledem k nepřesnosti měření nebude splněn. Díky znalosti přesnosti měření ovšem lze nastavit podmínky, za kterých bude model budovy považován za pravouhlý. Tento fakt zjednodušuje proces generalizace.

Autoři výše zmíněného článku v publikaci [3] uvádějí způsoby získávání dat:

- letecká fotogrammetrie,
- letecké laserové skenování,
- pozemní měření,
- blízká fotogrammetrie,
- pozemní laserové skenování a
- odvození ze stávajících databází a map.

1.3 Typy 3D modelů budov

Další důležitou otázkou je typ vstupních dat. Každá z generalizací je implementována pro jiný typ vstupních a právě data v této podobě na vstupu vyžaduje. Pokud jsou data jiného typu, je nutné je převést do jiné prezentace vyžadované vybranou generalizací, či tuto generalizaci upravit pro naše potřeby.

Autoři výše zmíněného článku v publikaci [3] uvádějí následující typy vstupních dat:

- Voxel model
3D budova je reprezentována maticí složenou z voxelů (z angl. *volume element*, tedy objemový element), což jsou kostky stejné velikosti. Voxel model má obdobné vlastnosti, tedy výhody i nevýhody, jako 2D rastr.
- Parametrický popis

Budova je reprezentována jednoduchými parametricky popsanými objekty. Budova je v prostoru umístěna pomocí 6 parametrů (posun a rotace).

- CSG reprezentace (*Constructive Solid Geometry*)
Objekt je popsán pomocí základních těles (hranol, kužel...) použitím množinových operací (sjednocení, průnik...).
- B – reprezentace (z angl. B = boundary, tj. hranice)
Reprezentace pomocí hranice, objekt je popsán orientovanými stěnami. V této reprezentaci je často využíváno TIN (z angl. *Triangular Irregular Network*, tj. nepravidelná trojúhelníková síť)
- S – reprezentace (z angl. S = Solid)
Objekt je popsán sítí čtyřstěnů (*Tetrahedral Network*, zkráceně TEN).

1.4 Metody 3D generalizace budov

Výzkum zabývající se 3D generalizací budov se v současné době koncentruje na řešení následujících otázek: segmentace struktury budovy, rozeznávání struktury budovy, generalizace modelu budovy a vizualizace různých LoD.

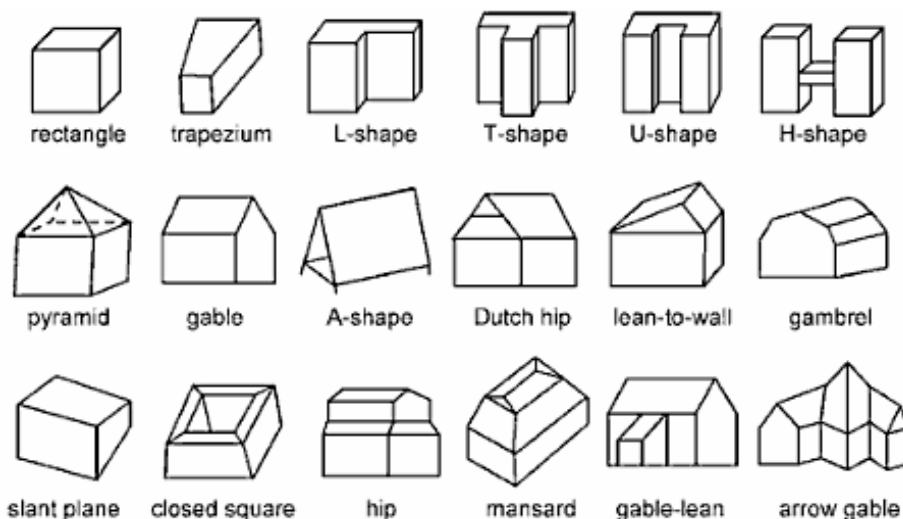
1.4.1 Segmentace struktury budovy

K tématu segmentace struktury bylo publikováno několik článků. Jeden z možných přístupů k segmentaci je zmíněn také v publikaci [3]. Analyzovaný objekt je pomocí posunujících se rovin rozřezáván na segmenty. Algoritmus končí ve chvíli, kdy jsou všechny segmenty konvexní objekty. Odkazy na jednotlivé segmenty poté obvykle bývají uloženy ve formě stromové struktury, která umožňuje přehledné a rychlé vyhledávání.

1.4.2 Rozeznávání struktury budovy

Rozeznávání struktury budovy je dalším důležitým tématem týkajícím se 3D generalizace budov. Pokud rozeznáme strukturu budovy a přiřadíme jí některý z definovaných základních typů budov, může být proces generalizace zjednodušen. Ze vstupního modelu pak mohou být odvozeny parametry přiřazeného typu budovy. Problémem však zůstává, že ne všechny budovy lze takto jednoduše klasifikovat.

Autoři v publikaci uvádějí rozpoznávací algoritmus, pro který byly definovány základní typy fasád budovy a střešních konstrukcí (viz obr. 2). V prvním kroku algoritmus přiřadí modelu typ fasády na základě počtu vrcholů, hran, orientace hlavní osy atd. Ve druhém kroku je pak rozeznám typ střešní konstrukce na základě obdobných parametrů.



Obr. 2 Základní typy fasád budovy (horní řádek) a střešních konstrukcí (spodní řádky)

1.4.3 Generalizace modelu budovy

Příklady generalizace modelu budovy, kterých existuje celá řada, se budeme zabývat v dalších kapitolách. Vlastní způsob generalizace navrhuje také autorka tohoto článku a tento bude popsán v kapitole 3.

1.4.4 Vizualizace modelu budovy

Poslední část článku se zabývá různými způsoby vizualizace modelů budov, zejména jejich vizualizací v různých úrovních podrobnosti (LoD). Existují dva základní přístupy, jak k vizualizaci budov v různých LoD přistupovat.

Podle prvního přístupu mají být jednotlivé LoD uloženy přímo v modelu každé budovy. Dle druhého přístupu by vizualizace jednotlivých úrovní podrobnosti byla realizována přímo při zobrazování, tzv. *on the fly*.

Každý z těchto přístupů má své výhody a nevýhody. V prvním případě může být samotná vizualizace rychlejší, neboť bude probíhat pouze přepínáním mezi jednotlivými již realizovanými úrovněmi podrobnosti. S tím je však spojena vyšší paměťová náročnost. V druhém případě je tomu přesně naopak. Model budovy bude uložen pouze v jednom, nejdetailnějším LoD a generalizace bude realizována před vizualizací, což ji může zpomalit.

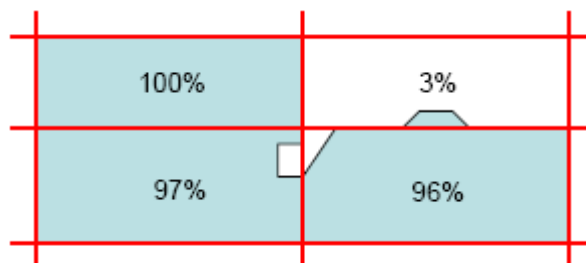
2. 3D generalizace budov podle Martina Kady

Martin Kada ve svém článku [1] představuje nový způsob automatické 3D generalizace modelů budov. Postup generalizace je rozdělen do dvou základních kroků. Prvním krokem je generalizace fasády modelu budovy. Druhým krokem je pak generalizace střechy budovy.

2.1 Generalizace fasády budovy

Ke generalizaci fasády budovy autor využívá poloprostory definované rovinami v prostoru. Tyto roviny aproximují zdi budovy a eliminují výčnělky a další nerovnosti. Míra generalizace, tedy velikost výčnělků, které budou eliminovány, je předem nastavitelná. Přesto se autor zmiňuje o tom, že v případě složitých modelů budov se generalizační proces nemusí obejít bez lidského zásahu.

Tyto roviny rozdělí prostor na menší podprostory. Pro každý z těchto podprostorů je nutné definovat, zda bude součástí výsledném generalizovaného modelu budovy, či zda bude prázdný. Toto je provedeno pomocí výpočtu procentuálního zastoupení zastavěné plochy v každém podprostoru (viz obr. 3).



Obr. 3 Procentuální zastoupení zastavěné plochy v podprostorech

Podprostory označené jako části budovy jsou poté spojeny v jeden celek, který představuje generalizovanou fasádu budovy.

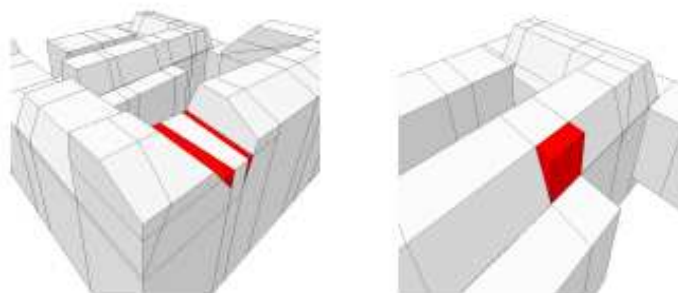
Vzhledem k tomu, že půdorysy budov bývají obvykle pravoúhlé, aproximující roviny jsou primárně generovány na sebe kolmé, nebo rovnoběžné. To odstraňuje případné nepřesnosti ve vstupním modelu. Hodnota úhlu mezi fasádami, která je vyhodnocena jako chyba, je nastavitelná. Proto v případě budovy, která nemá na sebe kolmé zdi, je tento fakt zachován.

2.2 Generalizace střešní konstrukce

2.2.1 Generalizace pomocí podprostorů

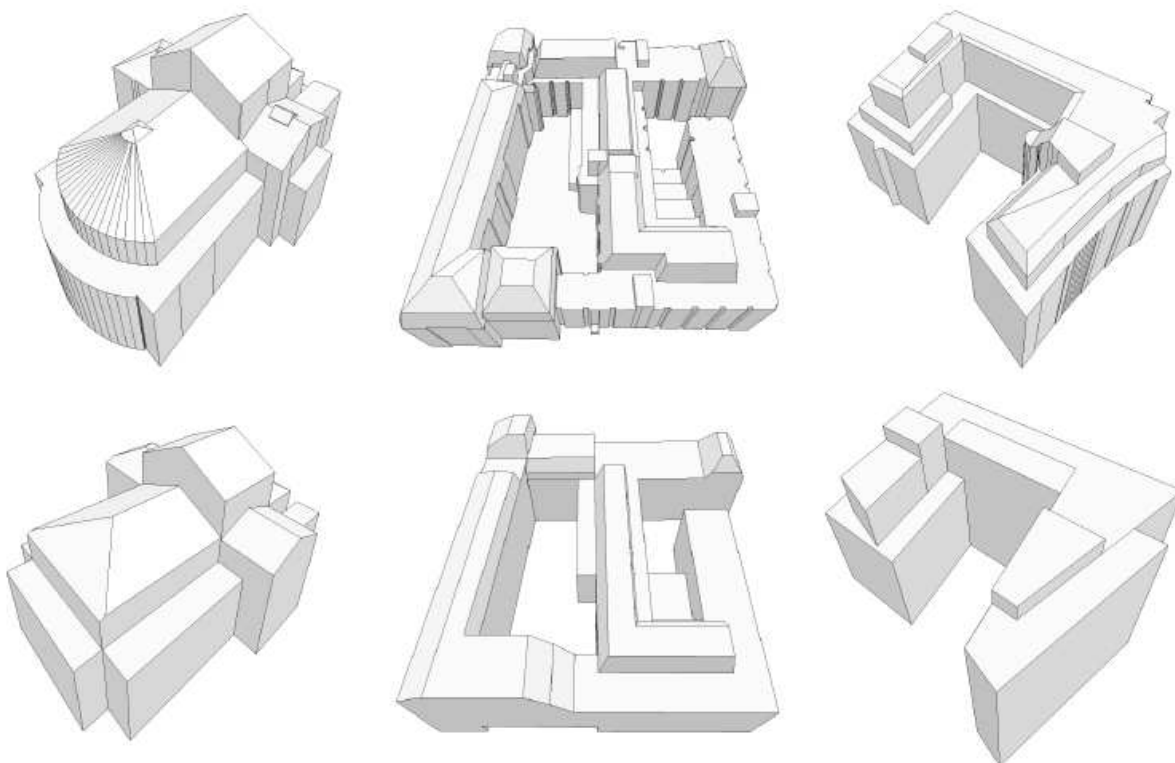
K takto vzniklému 2,5D generalizovanému modelu budovy, je nutné připojit střešní konstrukci. V případě aproximace střechy lze postupovat obdobně jako při generalizaci fasády budovy. Při generalizaci fasády budovy jsme se mohli pohybovat pouze nad půdorysným plánem budovy, zde však řešíme generalizaci ve 3D prostoru. Segmenty střešní konstrukce jsou aproximovány rovinami, které opět rozdělí prostor do menších podprostorů. Průnikem rovin aproximujících fasádu budovy a střešní konstrukci, vzniká 3D generalizovaný model budovy.

V této fázi je nutné přistoupit k odstranění některých nerovností ve střešní konstrukci. Uvedeným postupem totiž vznikají otvory, nebo naopak výčnělky střechy (viz obr. 4). Pro nalezení a odstranění těchto nedostatků je definováno několik algoritmů.



Obr. 4 Ukázky nerovností po generalizaci střešní konstrukce

Porovnání původních a generalizovaných modelů je uvedeno na obr. 5.

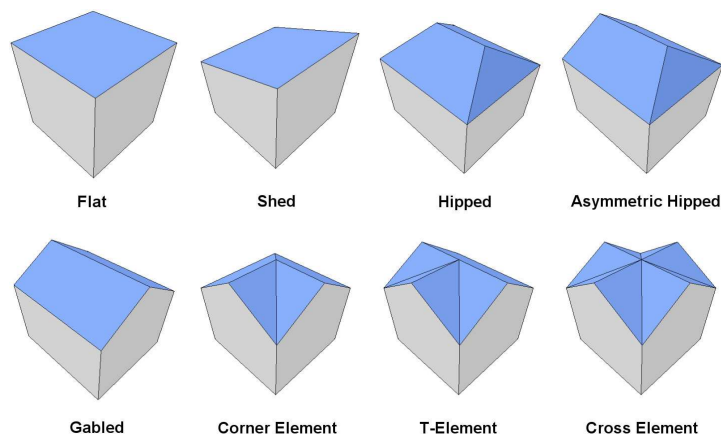


Obr. 5 Ukázka původních (nahore) a generalizovaných modelů (dole)

2.2.2 Generalizace pomocí primitivních typů střešních konstrukcí

V článku [2] Martin Kada rozvíjí a doplňuje generalizační proces popsany v článku [1]. Autor popisuje způsoby vhodné po generalizaci střešní konstrukce budovy. První způsob, který vychází z obdobného principu jako generalizace fasády budovy, byl již uveden výše. Autor znovu připomíná, že při zmíněném způsobu generalizace střešní konstrukce může docházet k některým nepřesnostem, které je následně nutné odstranit pomocí několika algoritmů, a proto uvádí nový způsob generalizace střešní konstrukce pomocí primitivních typů střešních konstrukcí.

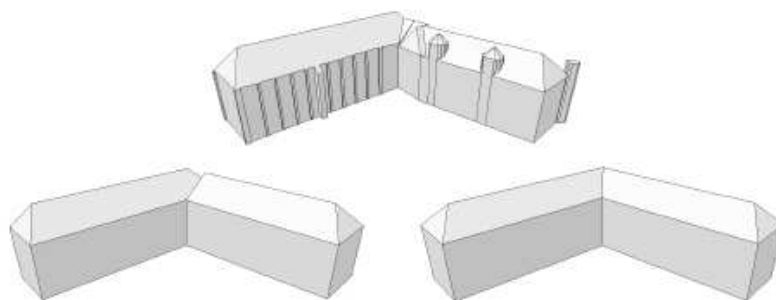
Autor definuje 8 primitivních typů střešních konstrukcí (viz obr. 6).



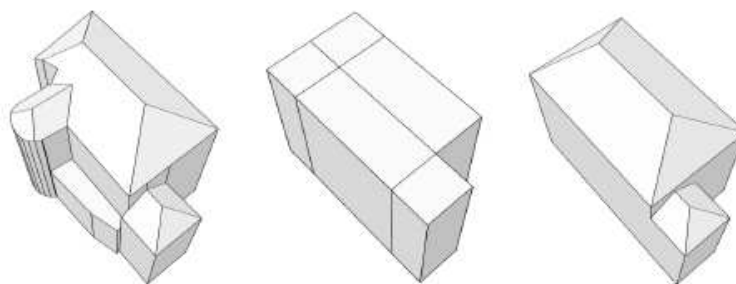
Obr. 6 Primitivní typy střešní konstrukce

Každý z těchto primitivních typů střešních konstrukcí má několik volitelných parametrů, jako je výška hřebene, délka hřebene atd. Tyto primitivní typy střech jsou „usazeny“ na zgeneralizovanou fasádu budovy s přihlédnutím k orientaci budovy. Geometrie generalizované střechy je porovnávána se vstupními daty reprezentujícími střešní konstrukci. Test je prováděn pro různé kombinace hodnot vstupních parametrů primitivních typů střech. Hledá se nejlepší shoda mezi vstupním a aproximujícím modelem. K tomu je využito dvou testujících funkcí. Jednak se testuje součet kvadratických rozdílů výšek střech z obou modelů a dále je zjišťováno procento shodných ploch obou modelů.

Vzhledem k tomu, že obě zde uvedené testované hodnoty jsou v jiných jednotkách, je poměrně složité testovat shodu vstupního a aproximujícího modelu na obě hodnoty současně. Proto jsou nejprve primitivní typy s různými vstupními parametry testovány na procento shodných ploch a až následně, pokud je tato hodnota u více modelů podobná, se přistupuje k testování součtu kvadratických rozdílů výšek střech z obou modelů. V případech, kdy se generalizovaná budova skládá z více částí, je samozřejmě nutné pro každou z těchto částí provést test samostatně.



Obr. 7. Vstupní 3D model budovy (nahore), generalizace střešní konstrukce podle postupu uvedeném v článku [1] (vlevo) a generalizace pomocí primitivních typů (vpravo)

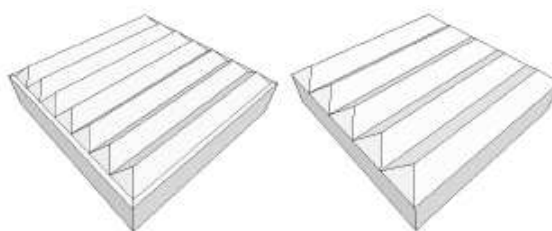


Obr. 8 Vstupní 3D model budovy (vlevo), generalizovaná fasáda budovy (uprostřed) a výsledný model se střešní konstrukcí generalizovanou pomocí primitivních typů (vpravo)

2.2.3 Generalizace střešní konstrukce typifikací

Po dokončení generalizace pomocí primitivních typů střešních konstrukcí, můžeme přistoupit ještě k jistým úpravám.

Jednou z možných úprav generalizované střešní konstrukce je typifikace. Principem typifikace je nahrazení podobně vypadajících prvků nižším počtem těchto prvků. Typickým příkladem použití jsou střechy závodních hal nebo nákupních center (viz obr. 9).



Obr. 9 Příklad využití typifikace pro generalizaci střešní konstrukce

3. 3D generalizace budov podle Andrey Forberg

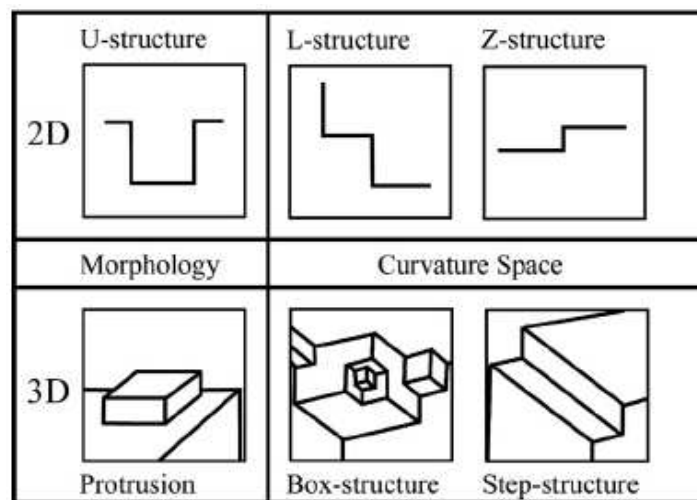
Andrea Forberg v článku [3] využívá poznatků z matematické morfologie a analýzy obrazu ke 3D generalizaci budov. Definuje základní operace, které je možné provádět nad modely budov. Vzhledem k náročnosti tohoto způsobu generalizace navrhuje autorka novou metodu, která je použitelná pro ortogonální objekty.

Důležitým parametrem, použitým pro generalizaci, je měřítkový parametr. Na základě jeho hodnoty je možné rozhodnout o stupni generalizace budovy a tedy také o způsobu generalizace.

3.1 Generalizace s využitím poznatků z analýzy obrazu a matematické morfologie

Autorka v článku definuje základní operace důležité pro generalizaci. Jejich znalost je spjatá s analýzou obrazu a matematickou morfologií. Z první oblasti autorka přejímá metody *split* (rozdělení) a *merge* (spojení). Z druhé oblasti jsou to poté základní operace *dilation* (rozšíření) a *erosion* (obrušování) a kombinované operace *opening* (otevření) a *closing* (zavření).

Postup, který kombinuje poznatky z obou těchto oblastí, se nazývá *reaction-diffusion-space*. Tento postup byl již v minulosti použit pro generalizaci 2D vektorových dat. První část (*reaction*) je realizována posouváním segmentů. Takto jsou objekty spojovány, nebo rozdělovány, výčnělky jsou eliminovány a otvory vyplněny. Druhá část (*diffusion*) se týká generalizace speciálních struktur, jako jsou Z- a L-struktury, kde jsou posouvány pouze speciální segmenty. Ukázky těchto speciálních 2D struktur a jejich obdoby ve 3D jsou uvedeny na obr. 10.

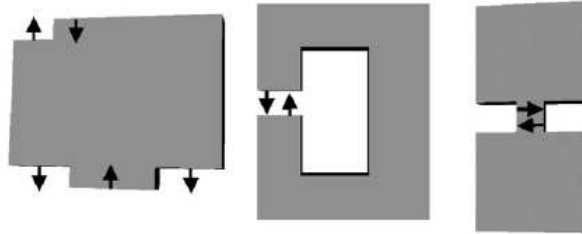


Obr. 10 Ukázky speciálních struktur ve 2D a ve 3D

3D generalizace modelů budov byla realizována v prostředí Visual C++ s pomocí funkcí definovaných v knihovně ACIS. Část generalizace vycházející z poznatků matematické morfologie byla realizována posunem stěn dovnitř, či vně objektu ve směru normálových vektorů. Definovány byly operace spojení, rozdělení, eliminace výčnělků a zaplnění otvorů. Na základě dřívějších poznatků byly definovány některé způsoby generalizace speciálních struktur, ale vzhledem k náročnosti a množství pravidel nebyly ošetřeny všechny speciální případy.

3.2 Generalizace posunutím rovnoběžných stěn

Proto byla zavedena nová metoda, která ošetřuje např. generalizaci výčnělků, ale také box- a step-struktur. Jsou určeny rovnoběžné stěny a spočítána jejich vzdálenost. Pokud je tato vzdálenost menší než daná mezní hodnota, jsou tyto hrany posouvány proti sobě, bez ohledu na směr normály, dokud se nespojí v jednu hranu (viz obr. 11). Tato metoda je velmi jednoduchá a obecná, ale ošetřuje i složité struktury.



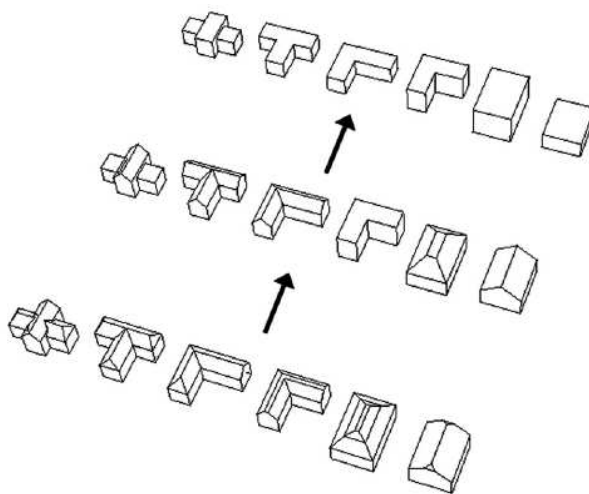
Obr. 11 Ukázka nové metody: rovnoběžné stěny jsou posouvány proti sobě

Uvedená metoda generalizace by mohla v jednom procesu nahradit výše uvedené složité operace. Problémem této metody však je, že je plně funkční pouze pro ortogonální objekty. Pouze malá odchylka od ortogonalit může způsobit, že nedojde k detekci rovnoběžných stěn a tedy také ke spojení či rozdělení objektu.

Abychom se tohoto vyvarovali, je nutné před samotnou generalizací provést tzv. *squaring*.

Aby bylo dosaženo ortogonalit objektu, doporučuje autorka využít Gülchovy rekonstrukční metody, kdy jsou budovy generovány jako soubor 3D primitiv. Tato metoda však zachovává silně neortogonální segmenty, jako jsou např. střechy, beze změny. Vlastní způsob ortogonalizace stěn objektu nebyl autorkou, vzhledem k náročnosti problému, implementován.

Metodu *squaring* je však možné použít pro ortogonalizaci střešních struktur. Nejprve je nutné nalézt hřebeny střechy. Z ploch střechy dotýkajících se těchto hřebenu je vypočtena průměrná výška a střešní konstrukce je eliminována na rovinu. Metoda *squaring* použitá na střešní struktury je ve dvou krocích zobrazena na obr. 12.



Obr. 12 Metoda *squaring* pro střešní struktury

4. 3D generalizace budov pomocí retriangulace

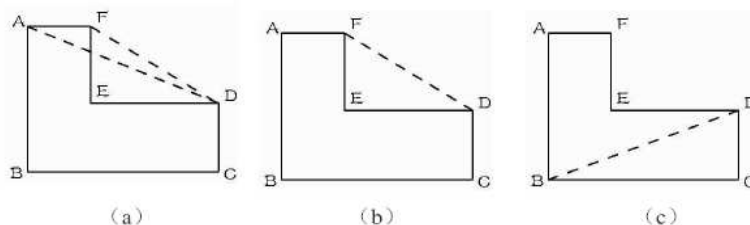
S poněkud odlišným přístupem ke generalizaci budov přichází autoři článku [4]. Tento způsob generalizace budov je založen na retriangulaci vstupních dat. V minulosti již bylo vytvořeno několik triangulačních algoritmů, ovšem jejich vstupem obvykle byly rozptýlené body, nebo hrany definující objekt. Vstupním modelem v popisovaném algoritmu je však neuspořádaný soubor trojúhelníků.

Jak jsem již předeslala výše, vstupním modelem v popisovaném způsobu generalizace budov je nepravidelná trojúhelníková síť (*Triangular Irregular Network*), která reprezentuje fasády budov v modelu města. Tato neorganizovaná struktura musí nejprve projít setříděním. Algoritmus setřídění je uveden v článku. Výsledkem setřídění nepravidelné trojúhelníkové sítě je uspořádaný soubor trojúhelníků reprezentujících jednotlivé stěny budov.

Dalším krokem bylo nalezení hran jednotlivých stěn budov. Toho je dosaženo dalším popsáním algoritmem, ve kterém je pro každý trojúhelník testován počet sousedních trojúhelníků. Pokud trojúhelník nesousedí se třemi trojúhelníky, znamená to, že jedna nebo dvě jeho hrany jsou zároveň hranami stěny budovy. Nalezené hrany stěny budovy jsou uspořádány.

Takto uspořádané hrany tvoří pro každou stěnu budovy hraniční polygon. Tyto polygony poté vstupují do Delaunayho triangulace. Tento způsob retriangulace byl zvolen proto, že generuje optimální trojúhelníky. Od klasické Delaunayho triangulace se zde použitý algoritmus liší tím, že zavádí dvě dodatečné podmínky, zajišťující vhodné provedení triangulace vzhledem k charakteru dat.

První podmínkou je požadavek, aby výsledný trojúhelník neprotínal hranu polygonu, jak je uvedeno na obr. 13(a). Požadavek druhé podmínky je, aby vnitřní bod trojúhelníka ležel uvnitř polygonu. Tento příklad je uveden na obr. 13(b). Na obr. 13(c) je pak uveden trojúhelník splňující obě podmínky. Trojúhelníky nesplňující uvedené podmínky jsou transformovány tak, aby je splnily.



Obr. 13 Tři typy trojúhelníků po Delaunayho triangulaci

Posledním krokem generalizace je sjednocení směru normálových vektorů výsledných trojúhelníků s normálovým vektorem příslušného polygonu.

5. 3D generalizace modelu města

Článek [5] představuje další metody 3D generalizace budov. Na rozdíl od výše zmíněných článků a metod generalizace v nich popsanych, se tento článek věnuje generalizaci budov s nižší úrovní podrobnosti. Cílem generalizace v tomto případě není jen generalizace jedné budovy, ale celých uličních bloků, případně skupin budov.

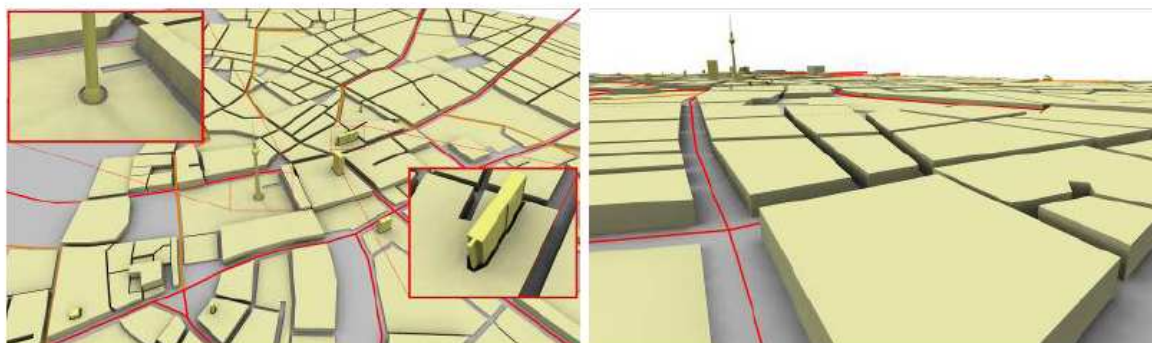
5.1 Generalizace pomocí jednoduchých buněk

Při generalizaci pomocí jednoduchých buněk je model města rozdělen do buněk podle uliční sítě. Uliční síť je definovaná jednotlivými ulicemi, tedy liniemi, a jejich šířkou.

Po rozdělení do buněk je nutné přiřadit každé z nich výšku. Pokud je $h(b_i)$ výška budovy a $a(b_i)$ plocha této budovy, pak můžeme průměrnou výšku buňky \bar{h} čítající n budov vypočítat následovně:

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^n h(b_i) a(b_i)}{\sum_{i=1}^n a(b_i)}.$$

Z procesu generalizace je možné vyloučit některé budovy, které chceme zvýraznit např. administrativní budovy. Dále je vhodné zachovat původní výšku u budov, které značně převyšují ostatní budovy v buňce, jak je tomu ukázáno na obr. 14.



Obr. 14 Generalizace pomocí jednoduchých buněk

5.2 Generalizace pomocí konvexního obalu

V případě generalizace pomocí konvexního obalu je opět model města rozdělen do buněk podle uliční sítě. Pro každou z těchto buněk je pak vytvořen konvexní obal. Tato prezentace v porovnání s generalizací pomocí jednoduchých buněk lépe reprezentuje výškové rozložení budov v buňce.

Na druhou stranu ovšem nezachovává vlastnosti typické pro budovy, tedy ortogonalitu, rovnoběžnost či ostré hrany. Další problém vyvstává v případě, že buňka je konkávní.

Možným zlepšením generalizace by bylo rozčlenění buněk nejen podle uliční sítě, ale přímo do bloků budov, které by bylo závislé na nastavitelné hodnotě maximální vzdálenosti jednotlivých budov.

5.3 Generalizace pomocí voxelizace

Tento způsob generalizace aplikuje postupy filtrování rastrových dat na 3D rastrová data. Nejprve je tedy nutné převést vstupní vektorová data na 3D rastrová data.

5.3.1 Voxelizace

Model města je rozdělen mřížkou o předem definované velikosti. Pro každý z takto vzniklých voxelů je nutné doplnit jeho výšku. Prvním a jednodušším způsobem je výpočet výšky pro každý voxel zvlášť. Druhým způsobem, který je náročnější na čas, avšak dle autorů vykazuje lepší vlastnosti, je výpočet voxelu z osmi s ním sousedících voxelů, tzv. filtrovaná voxelizace. Oba tyto způsoby jsou ukázány na obr. 15.



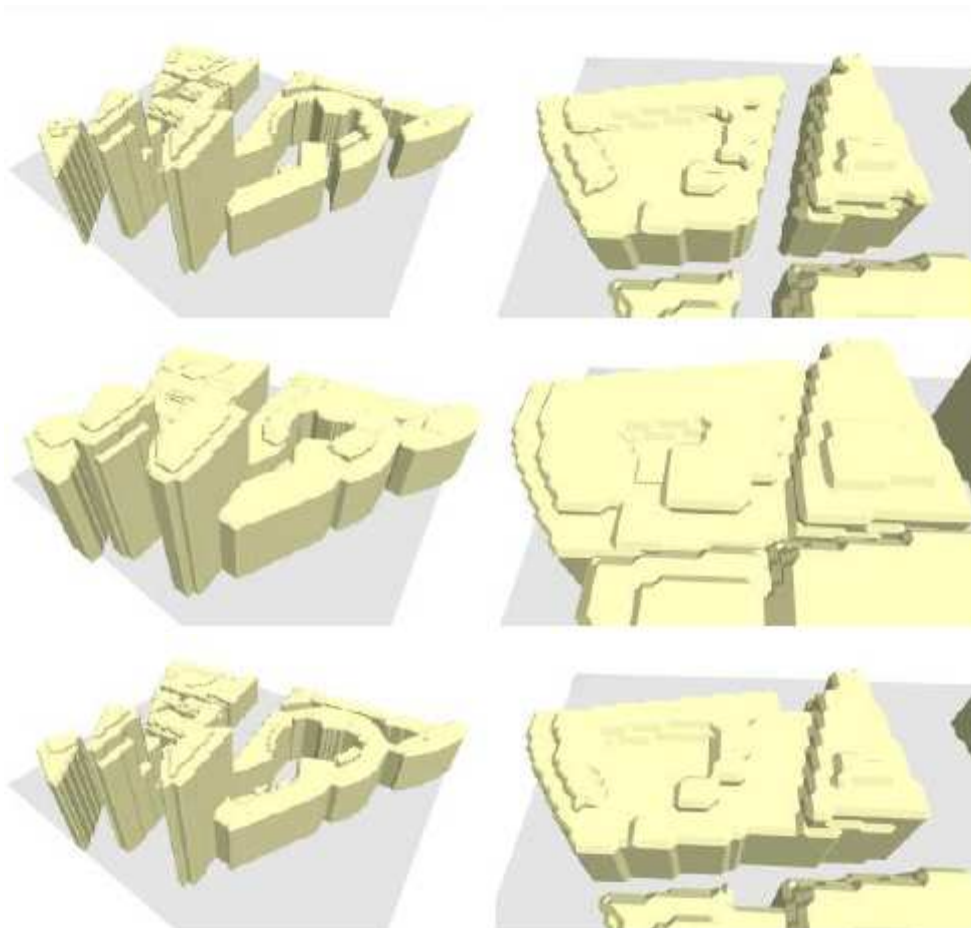
Obr. 15 Voxelizace (zleva): původní vektorový model, výsledek voxelizace z velikosti mřížky 2m a výsledek filtrované voxelizace se stejnou velikostí mřížky

5.3.2 Operace nad rastrovými daty

Pro práci s rastrovými daty již byly v minulosti navrženy různé postupy a implementovány algoritmy. Jedním z těchto postupů jsou morfologické operace.

Vstupním souborem bude 3D rastrový obraz modelu města. Dále je nutné definovat tzv. konstrukční element, který je v článku [5] definován jako kostka o velikosti 3x3x3 voxelů. Konstrukční element se pohybuje po 3D rastrovém obraze a pro každý voxel je porovnán se vstupním obrazem. Na základě počtu voxelů, které jsou elementy budovy a zároveň náleží do konstrukčního elementu, je pak stanoveno, zda výsledný voxel bude součástí, či vně budovy.

Jsou definovány operace *erosion* (obrušování) a *dilation* (rozšíření), které jsou použitelné pro morfologické operace *opening* (otevření) a *closing* (uzavření). Výsledná podoba vstupního obrazu je uvedena na obr. 16.



Obr. 16 Vstupní model (nahore), použití operace *dilation* (uprostřed) a *erosion* (dole)

6. Zhodnocení popsaných generalizačních procesů

Články, ze kterých jsem v této semestrální práci čerpala, přináší nové metody pro 3D generalizaci budov. Většina zdrojových článků se věnuje zejména dané generalizační technice, popisu postupu dané generalizace a dosaženým výsledkům.

V obecném kontextu e problematika 3D generalizace budov popsána pouze v knize [3], a to v článku *3D building generalization*. Právě z tohoto zdroje bylo čerpáno v kapitole 1.

Každý z generalizačních procesů, které jsou popsány v jednotlivých člancích, má své výhody a nevýhody, které budou shrnuty v této kapitole.

6.1 Zhodnocení jednotlivých generalizací

V této podkapitole budou zhodnoceny generalizační postupy prezentované ve zdrojových člancích a popsané v předchozích kapitolách.

6.1.1 3D generalizace podle Martina Kady

Martin Kada ve svých člancích [1] a [2] popisuje vlastní postup 3D generalizace budov. Nevýhodou uvedeného postupu je fakt, že generalizace probíhá ve dvou krocích.

První část generalizace, která v podstatě probíhá nad půdorysným plánem budovy, je omezující, neboť předpokládá kolmost stěn budovy k zemi, což nemusí být vždy zachováno.

Pro druhou část generalizace, tedy generalizaci střešní konstrukce, byly popsány dva postupy. První z nich, který vychází ze stejného principu jako generalizace fasády budovy, je sice obecně použitelný, ale generalizovaná střešní konstrukce vykazuje nerovnosti. Druhý způsob generalizace střešní konstrukce, tedy generalizace za pomoci primitivních typů střešních konstrukcí, je možný jen v případě, že generalizovaný model fasády budovy obsahuje pouze rovnoběžné a kolmé stěny. V ostatních případech je nutné provést generalizaci střešní konstrukce podle postupu uvedeného v článku [1].

V případě, že je model budovy po generalizaci její fasády ortogonální, poskytují výsledné střešní konstrukce generalizované pomocí primitivních typů lepší výsledky než po generalizaci uvedené v článku [1].

Problematickým bodem této generalizace je nutnost nastavení parametrů pro eliminaci výčnělků. Parametry musí být nastaveny při generalizaci fasády budovy, případně také pokud je střešní konstrukce generalizována podle postupu uvedeného v článku [1]. V článku jsou uvedeny doporučené hodnoty, které se liší pro generalizaci fasády a generalizaci střešní konstrukce. Tyto hodnoty byly získány experimentálně a neodpovídají zcela přímo velikosti výčnělků, které budou eliminovány. Změnou velikosti těchto parametrů však můžeme dosáhnout různých stupňů generalizace.

Další nevýhodou uvedeného postupu generalizace je fakt, že každá budova je generalizována zvlášť. Proto například nemusí být zachována sousednost či návaznost budov v bloku.

V článku [1] byla také testována rychlost výpočtu, která na 3GHz Intel CPU byla přibližně 30 vteřin pro jeden model budovy. Pokud bude generalizace provedena např. nad modelem města o několika tisících jednotkách, výpočetní čas značně naroste. Autor se v článku [2] bohužel nezmiňuje o časové náročnosti výpočtu, jak tomu bylo u článku [1]. V článku [1] byla časová zátěž způsobena zejména vyhledáváním a opravou nerovností po generalizaci střešní konstrukce. Zajímavou informací by proto bylo, zda se čas výpočtu při generalizaci střešní konstrukce s pomocí primitivních typů snížil. Vzhledem k tomu, že

porovnáváme 8 primitivních typů střešních konstrukcí se vstupním modelem a ke každému typu generujeme různé parametry, lze předpokládat, že i tento výpočet bude časově náročný.

6.1.2 3D generalizace podle Andrey Forberg

Prvně zmíněný způsob generalizace, tedy generalizace s využitím poznatků z analýzy obrazu a matematické morfologie, je velice náročný jak na implementaci, tak na samotný výpočet. Tento způsob se vyznačuje značným počtem netriviálních pravidel, které ovšem stále neošetřují všechny speciální případy. Výhodou na druhé straně je, že tato generalizace je použitelná pro obecné objekty. Po zadání vstupního měřítkového parametru lze docílit různých stupňů generalizace budov.

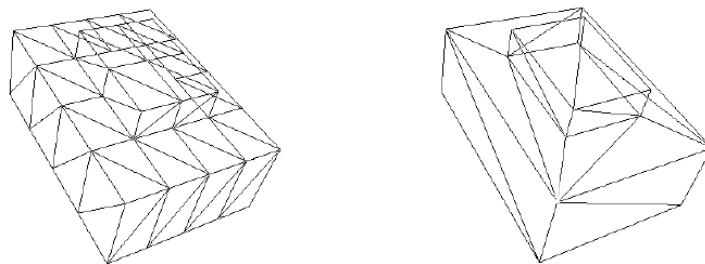
Druhý způsob generalizace, využívající posunu rovnoběžných stěn klade požadavek na ortogonalitu objektu. Budovy ve vstupním modelu ovšem obvykle tuto podmínku nespĺňují, např. kvůli ne zcela přesnému měření. Z tohoto důvodu musí být před samotnou generalizací objekt zortogonalizován. Po této operaci je však tato generalizace velmi efektivní. Zadaná mezní hodnota odchylky rovnoběžných stěn přímo odpovídá nerovnostem, které budou eliminovány. Takto můžeme přímo ovlivnit, jaký stupeň generalizace bude vykazovat výstupní objekt.

6.1.3 3D generalizace pomocí retriangulace

Generalizace za pomoci retriangulace vstupních dat je založena na Delaunayho triangulaci. To zajišťuje, že většina trojúhelníků na výstupu bude optimální s výjimkou těch, které musely být transformovány, neboť nespĺňovaly uvedené podmínky.

Nevýhodou je však samotný výpočet Delaunayho triangulace, který je výpočetně náročný. S rostoucím počtem bodů roste výpočetní čas algoritmu Delaunayho triangulace kvadraticky. Autoři však uvádí, že počet bodů pro každou stěnu budovy by neměl překročit hodnotu 100 bodů a tedy výpočet Delaunayho triangulace by neměl být příliš časově náročný.

Efektivnost uvedené generalizace demonstruje modelový případ budovy zobrazený na obr. 17. Vlevo je model před generalizací, čítající 112 trojúhelníků, vpravo pak model po retriangulaci, čítající 28 trojúhelníků.



Obr. 17 Ukázka model před a po retriangulaci

Ve zde uvedeném příkladě je evidentní, že výsledkem generalizace je snížení objemu dat bez větších zásahů do struktury budovy. V článku není zmíněno, zda by bylo možné pomocí popsané postupu také např. eliminovat výčnělky. Pokud by bylo možné v algoritmu výčnělky identifikovat, jejich eliminace by pak byla velmi jednoduchá. Pouze by byly z Delaunayho triangulace vyňaty polygony náležející těmto výčnělkům.

6.1.4 3D generalizace modelu města

První výhodou 3D generalizace modelu města pomocí jednoduchých buněk je její snadná implementace. Výstupní generalizovaný model města je přehledný a důsledně dodržuje strukturu ulic. Budovy vyjmuté z generalizace, tedy např. důležité administrativní budovy či budovy značně převyšují ostatní, mohou sloužit jako orientační body.

Problémem této generalizace může být výpočet výšek jednotlivých buněk, zejména pak v případě že buňka obsahuje různě vysoké budovy. Pokud bude tato generalizace použita jen pro vizualizaci plánu města nebo pro části města ve větší vzdálenosti od pozorovatele, lze tento problém akceptovat. Další nevýhodou, která vyplývá se samotného procesu generalizace, je nemožnost zobrazení nezastavěných ploch v jednotlivých buňkách, tedy např. nádvoří.

Pokud jsou ulice uloženy v hierarchické struktuře s rozdělením podle důležitosti, je možné nastavit různou míru generalizace pro různé části města. Pro nejvyšší míru generalizace by byly buňky rozděleny jen podle nejdůležitějších komunikací, pro vyšší úroveň podrobnosti by byly buňky rozděleny podle méně významných ulic.

Další z uvedených postupů, tedy generalizace pomocí konvexního obalu, se mi nezdá být vhodným způsobem pro generalizaci budov. Jak již bylo uvedeno, nezachovává vlastnosti typické pro budovy (ortogonalitu, rovnoběžnost, ostré hrany). Konvexní obaly jednotlivých buněk se navíc mohou překrývat.

Posledním popsaným generalizačním postupem je 3D generalizace pomocí voxelizace. Tato generalizace je mimo jiné limitována rozlohou území vzhledem k velikosti dat uložených ve 3D mřížce. Další nevýhodou je, že nezachovává ortogonalitu a rovnoběžnost.

Míra generalizace je nastavitelná pomocí volitelné velikosti mřížky a velikosti konstrukčního elementu při následujících operacích. Velikost mřížky se může v jednom modelu města lišit a důležité budovy mohou být vizualizovány s větší přesností, tedy menší mřížkou.

6.2 Porovnání popsaných generalizací

V této kapitole bych chtěla porovnat generalizované postupy popisované ve zdrojových člancích. Jak je zřejmé z popsaného postupu generalizace, jsou mezi generalizačními postupy značné rozdíly. Existuje však několik hledisek, ze kterých by bylo možné tyto postupy porovnat. Avšak ne pro všechny z nich jsou v člancích uvedeny dostačující informace.

Nejprve zavádím značení jednotlivých generalizací, které bude používáno v následujících tabulkách:

- Kada1 – generalizace podle Martina Kady uvedeného v článku [1],
- Kada2 - generalizace podle Martina Kady uvedeného v článku [2],
- Forberg1 – generalizace podle Andrey Forberg s využitím poznatků z analýzy obrazu a matematické morfologie,
- Forberg2 – generalizace podle Andrey Forberg posunutím jednotlivých stěn,
- Retriangulace – generalizace pomocí retriangulace,
- Simple cell – generalizace pomocí jednoduchých buněk,
- Convex-hull – generalizace pomocí konvexního obalu a
- Voxelizace – generalizace pomocí voxelizace.

Parametr LoD, tedy úroveň podrobnosti, byl již popsán v kapitole 1. Pokud je možné před započítím generalizačního procesu nastavit např. velikost výčnělků, které budou eliminovány, lze poté pomocí jednoho generalizačního procesu generovat více modelů s různou úrovní podrobnosti.

V následující tabulce uvádím pro výše popsané generalizace, zda je možné nastavit více úrovní podrobnosti.

Tabulka 1 Porovnání generalizací z hlediska možnosti nastavení LoD

	Možnost nastavení LoD
Kada1	Ano, parametry, které však neodpovídají přímo velikosti výčnělků
Kada2	Jen pro fasádu budovy (viz výše)
Forberg1	Ano, parametry, které však neodpovídají přímo velikosti výčnělků
Forberg2	Ano, parametry přímo odpovídajícím velikosti výčnělků
Retriangulace	Ne
Simple cell	Ne
Convex hull	Ne
Voxelizace	Ano, parametr velikosti mřížky a velikosti konstrukčního elementu

Další porovnání popsaných generalizačních procesů zkoumá pro jaké typy dat, tedy v tomto případě zda pro samostatné budovy, či bloky budov, je daná generalizace použitelná. Porovnání uvádím v tabulce 2.

Tabulka 2 Porovnání generalizací z hlediska typu dat, pro který je určena

	Typ vstupních dat
Kada1	Jen pro samostatné budovy
Kada2	Jen pro samostatné budovy
Forberg1	Pro samostatné budovy i bloky budov
Forberg2	Pro samostatné budovy i bloky budov
Retriangulace	Jen pro samostatné budovy
Simple cell	Jen pro bloky budov
Convex hull	Jen pro bloky budov
Voxelizace	Pro bloky budov, případně však také pro samostatné budovy

Dalším důležitým parametrem, jak již bylo uvedeno v podkapitole 1.3, je typ vstupních dat, tedy jak jsou vstupní modely reprezentovány. Pro toto srovnání jsem v článcích nenalezla dostatek informací. Je zřejmé, že pro 3D generalizaci pomocí retriangulace, je vstupním modelem nepravidelná trojúhelníková síť. Dále v kapitole 5 3D generalizace modelu města je zmíněn požadavek na reprezentaci uliční sítě pomocí linií a parametrem šířky ulice.

Dalším parametrem vhodným pro porovnání popsaných generalizačních postupů by byla časová náročnost výpočtu. Bohužel ani toto srovnání nelze vzhledem k nedostatku informací provést. Dosažitelné údaje o časové náročnosti výpočtu generalizace byly uvedeny v podkapitole 6.1.

6.3 Kombinace generalizačních postupů

Lze konstatovat, že ani jeden z uvedených generalizačních postupů není vhodný pro vizualizaci 3D modelu města, tak jak byl opsán v kapitole 1.

Generalizace podle Kady či Forberg jsou orientovány převážně na vyšší LoD, tedy na nižší úroveň generalizace. Naopak 3D generalizace modelu města popsaná v kapitole 5 je zaměřena na vyšší úroveň generalizace. Kombinací popsaných generalizačních postupů by však bylo možné navrhnout efektivní vizualizaci modelu města.

Nejbližší budovy by bylo vhodné generalizovat podle postupu Martina Kady. Ten klade, narozdíl od jiných, důraz zejména na optimální generalizaci střešních konstrukcí a lze ho, dle mého názoru, mezi generalizace s největší úrovní podrobnosti.

Další budovy v okolí by bylo možné generalizovat podle postupu Andrey Forberg pomocí posunutí stěn. Zde již není důraz kladen na střešní konstrukce, ty jsou dokonce potlačeny. Úroveň podrobnosti je u této generalizace nastavitelná a samotný proces generalizace je výpočetně nenáročný.

Zbytek modelu města by podle mého názoru měl být zgeneralizován pomocí jednoduchých buněk. U budov v pozadí je důležité zejména rozdělení do uličních bloků, což nám tento způsob generalizace umožňuje. Výhodou je také nastavení díky kterému zůstanou vybrané důležité či abnormálně vysoké budovy v původní výšce. Tyto budovy mohou sloužit pro lepší zorientování ve městě.

Závěr

Tato semestrální práce byla věnována tématu 3D generalizace, které je v poslední době tématem diskutovaným zejména díky nárůstu popularity 3D modelů měst.

V první kapitole byly vysvětleny některé základní pojmy, se kterými je možné se v souvislosti se 3D generalizací budov setkat. Dále byly nastíněny některé otázky, které je nutné před samotnou generalizací zodpovědět.

Byly popsány generalizační postupy zmíněné ve zdrojových článcích. Ty byly následně zhodnoceny a porovnány z několika hledisek.

Přetrvávajícím problémem 3D generalizace budov, je zatím všeobecně nesjednocený přístup k této problematice. Zejména existuje značné množství přístupů ke členění úrovní podrobnosti (LoD). V budoucnu bude zřejmě nutné vypracovat všeobecně platnou směrnici definující různé úrovně podrobnosti.

Zdroje

- [1] KADA, Martin. 3D Building Generalization Based on Half-Space Modeling. *Workshop on "Multiple representation and interoperability of spatial data"* [online]. Hannover: February 2006. [cit. 2009-10-12]. Dostupné z: <<http://www.ikg.uni-hannover.de/isprs/workshop2006/Paper/6007/2-Kada2006Hanover.pdf>>.
- [2] KADA, Martin. Generalisation of 3D Building Models by Cell Decomposition and Primitive Instancing. *ISPRS Workshop 2007, Stuttgart* [online]. Stuttgart: June 2007. [cit. 2009-10-12]. Dostupné z: <<http://www.geovisualisierung.net/isprs2007/docs/index.htm>>.
- [3] *Generalisation of Geographic Information: Cartographic Modelling and Applications*. Edited by William A. Mackaness, Anne Ruas, L.Tiina Sarjakoski. First edition. Oxford: Elsevier, 2007.
- [4] LEI, Ge, et al. Re-triangulation arithmetic in 3D building generalization. *XXIII International Cartographic Conference – Proceedings* [online]. Moscow: August 2007. [cit. 2009-10-12].
Dostupné z:
<http://cartography.tuwien.ac.at/ica/documents/ICC_proceedingsICC2007/html/Proceedings.htm>.
- [5] GLANDER, Tassilo – DÖLLNER, Jürgen. Techniques for Generalizing Building Geometry of Complex Virtual 3D City Models. In *Advances in 3D Geoinformation Systems*. Berlin: Springer, 2008. Part II. Papers. Theme V. Visualization. p. 381-400. Dostupné z: <<https://cgs.hpi.uni-potsdam.de/publications/Public/2008/GD08a>>.
- [6] DAHMEN, Christian. *FME and CityGML – Generating 3D City Models in a Variety of Applications*. [online]. 2009. [cit. 2009-01-02]. Dostupné z: <http://www.citygml.org/fileadmin/citygml/docs/CityGML_FME2009.pdf>