

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV GEODÉZIE

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF GEODESY

INFORMAČNÍ MODEL MĚSTA NA BÁZI 3D DAT

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

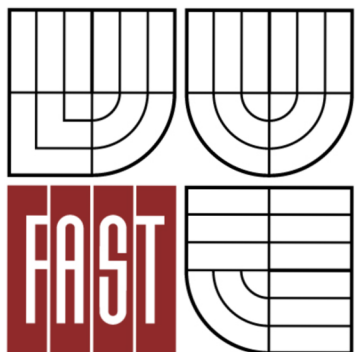
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. MICHAL DOLNÍK

BRNO 2016



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV GEODÉZIE

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF GEODESY

INFORMAČNÍ MODEL MĚSTA NA BÁZI 3D DAT CITY INFORMATION MODEL BASED ON A 3D DATA

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. MICHAL DOLNÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. TOMÁŠ VOLAŘÍK

BRNO 2016



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3646 Geodézie a kartografie
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3646R003 Geodézie a kartografie (N)
Pracoviště	Ústav geodézie

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. Michal Dolník
Název	Informační model města na bázi 3D dat
Vedoucí diplomové práce	Ing. Tomáš Volařík
Datum zadání diplomové práce	30. 11. 2015
Datum odevzdání diplomové práce	27. 5. 2016
V Brně dne 30. 11. 2015	

.....
doc. RNDr. Miloslav Švec, CSc.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

Herman, L. Brno, 2011. Moderní kartografické metody modelování měst. Diplomová práce.

Kolbe, T. H., Gröger, G., Plümer, L. Delft, 2005. CityGML - Interoperable Access to 3D City Models. In Proceedings of Int. Symposium on Geoinformation for Disaster Management. Springer Verlag.

Zásady pro vypracování

Prověřte rešerši současného stavu poznání v oblasti modelování měst ve 3D. Zaměřte se zejména na modely uchovávající informace o objektech. Zvolte vhodnou technologickou linku, jak z geometrie typu CAD získat informačně bohatý model jednotlivých budov a v celku části města (data na území města Brna). Požadovaným výstupem bude model části města v informačně bohatém formátu (např. CityGML). Nepovinným výstupem bude scéna ve webové aplikaci.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

.....
Ing. Tomáš Volařík
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Táto diplomová práca sa zaoberá tvorbou dátového 3D modelu mesta. Cieľom je ukázať potenciál 3D dát pri problematike mestských 3D modelov a vytvorenie metodiky konverzie 3D vektorových dát bez informácií, na dátovo orientovaný 3D model mesta. Pre tento účel bol zvolený formát CityGML, ktorý je v súčasnosti rozšírený v oblasti 3D mestských modelov. Tento formát nám okrem geometrie umožňuje ukladať aj sémantické, topologické a vizuálne informácie. Z hľadiska konceptu je práca rozdelená do dvoch celkov. Prvý tvorí teoretická časť, kde popisujem podporované formáty pre 3D dáta. Následne sa zaoberám delením a spôsobmi využitia 3D modelov miest v praxi a teoretickému popisu štruktúry formátu CityGML a jeho výhodami. V druhej časti podrobne popisujem proces konverzie dát a ich spracovanie. Pre praktickú časť boli využité geometrické dáta modelov mestských častí Líšeň a Nový Lískovec a dáta o spotrebách energie niektorých panelových domov. V závere práce sú zhodnotené všetky dosiahnuté výsledky, možnosti využitia a rozvoja modelu.

Klíčová slova

CityGML, 3D model, sémantika, informácia, energetické dáta, model mesta, Líšeň, Nový Lískovec

Abstract

This diploma thesis deals with creation of data-oriented 3D city model. The aim is to show potential of 3D data in the field of 3D city models and to develop a methodology of conversion of 3D-data with no information to data oriented 3D city model. For this purpose has been chosen format CityGML, which is well-known in the field of 3D city models. This format allows us to store semantical, topological and visual information besides geometry. In terms of concept, thesis is divided into two parts. First part is focused on theory, where are mentioned 3D supported formats. Further I deal with categories of city models according to its usage in praxis and theory about structure of CityGML and its advantages. In second part, I deal with the process of data conversion and its processing. I used geometric data of city parts Líšeň and Nový Lískovec and energy data of some blocks of flats. In the end of thesis, I summarize all the results, possible usage and development of the model.

Keywords

CityGML, 3D model, semantics, information, energy data, city model, Líšeň, Nový Lískovec

...

Bibliografická citace VŠKP

Bc. Michal Dolník *Informační model města na bázi 3D dat*. Brno, 2016. 77 s., 4 s. příl.
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie.
Vedoucí práce Ing. Tomáš Volařík.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 22.5.2016

.....
podpis autora
Bc. Michal Dolník

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

Prohlášení:

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 22.5.2016

.....
podpis autora
Bc. Michal Dolník

Podakovanie:

Ďakujem môjmu školiteľovi, Ing. Tomášovi Volaříkovi za cenné rady, pripomienky a ochotu konzultovať problémy spojené s prácou. Takisto ďakujem Ing. Martinovi Černému Ph.D. za rady a usmernenie v práci. V neposlednej rade patrí ďakujem aj Jamesovi Charltonovi z Northumbria University za inšpiráciu v problematike 3D mestských modelov.

Táto práca bola vytvorená v rámci aktivít a s podporou projektu TA ČR Centrum kompetencie TE02000077 s názvom „Intelligentní Regiony – Informační modelování budov a sídel, technologie a infrastruktura pro udržitelný rozvoj“.

Obsah

1	ÚVOD	12
1.1	Ciele práce	12
1.2	Charakteristika územia	13
2	ZBER DÁT DO 3D GIS	14
2.1	Metódy zberu dát	14
2.1.1	LiDAR – Light Detection And Ranging	14
2.1.2	Ostatné metódy diaľkového prieskumu	16
2.1.3	Ostatné metódy	16
3	SÚČASNÝ STAV REPREZENTÁCIE V 3D GIS	18
3.1	Vektorové formáty v 3D GIS	18
3.1.1	ESRI Shapefile®.....	19
3.1.2	KML – Keyhole Markup Language.....	19
3.1.3	GML – Geography Markup Language	20
3.1.4	GeoJSON	20
3.1.5	CityGML.....	21
3.2	3D Formáty pre geometrickú reprezentáciu	22
3.2.1	VRML – Virtual Reality Modelling Language.....	22
3.2.2	COLLADA – COLLaborative Design Activity.....	22
3.2.3	glTF – GL Transmission Format	23
3.2.4	CZML – Cesium Language	24
4	3D MODEL MESTA	25
4.1	Klasifikácia 3D modelov.....	25
4.1.1	Delenie na základe úrovne reálnosti	25
4.1.2	Delenie na základe spôsobu zberu dát	26
4.1.3	Delenie na základe funkcionality modelu.....	27
4.2	Oblasti využitia 3D modelov (Use – Cases).....	27
4.2.1	Delenie spôsobov využitia 3D modelov	27
4.2.2	Príklady využitia (Use-Cases).....	28
4.3	Príklady existujúcich 3D modelov.....	30

5	CITYGML	33
5.1	Viac-úrovňová reprezentácia.....	33
5.2	Koherentné sémanticko-geometrické modelovanie	35
5.3	Priestorovo – orientovaný model.....	36
5.3.1	Geometrický model.....	36
5.3.2	Topologický model	38
5.4	Tematický (sémantický) model.....	39
5.5	Rozšírenie formátu CityGML – Application Domain Extensions (ADE)....	42
5.5.1	NoiseADE (šírenie hluku).....	42
5.5.2	TunnelADE	43
5.5.3	BridgeADE	43
5.5.4	HydroADE	44
5.5.5	CAFM ADE	44
5.5.6	GeoBIM ADE	44
5.5.7	EnergyADE.....	44
6	TVORBA CITYGML MODELU MESTA BRNA	46
6.1	Použité dáta	46
6.1.1	Geometrické dáta	46
6.1.2	Popisné dáta	46
6.1.3	Energetické dáta.....	47
6.2	Použitý software.....	47
6.3	Predspracovanie a modifikácia vstupných dát	48
6.3.1	Prevod do formátu Shapefile MultiPatch.....	48
6.3.2	Prevod do formátu Shapefile PolygonZ.....	50
6.3.3	Klasifikácia tried RoofSurface a WallSurface.....	50
6.3.4	Tvorba geometrie pre triedu GroundSurface	51
6.4	Konverzia do CityGML.....	52
6.4.1	CityModel	53
6.4.2	Building	54
	V tejto časti postupu ide o tvorbu abstraktnej triedy <i>Building</i> . Celý postup sa nachádza na obr. 6.12.....	54
6.4.3	RoofSurface a WallSurface.....	54
6.5	Post-processing dátového modelu.....	60

6.5.1	Databázová schéma 3DCityDB	60
6.5.2	Štruktúra dát energetických spotrieb	61
6.6	Vývoj a využitie v budúcnosti	64
7	ZÁVER	65
	ZOZNAM LITERATÚRY	66
	ZOZNAM SKRATIEK	71
	ZOZNAM TABULIEK	73
	ZOZNAM OBRÁZKOV	74
	ZOZNAM PRÍLOH.....	77

1 ÚVOD

Problematika konceptu 3D dát v GIS sa stáva stále viac a viac diskutovanou témou. V oblasti architektúry sa o tomto pojme hovorí už dlhší čas, zatiaľ čo v obore geoinformatiky môžeme tento koncept považovať za relatívne nový.

Časový rozdiel aplikácie tohto konceptu sa v jednotlivých odboroch výrazne líši. Dôvod je ten, že v oblasti architektúry slúžia 3D dáta výlučne iba pre grafické účely. Geoinformatika zohľadňuje dátové štruktúry, sémantiku, topológiu a jednotlivé vzťahy medzi nimi. Pracuje s dátami v hlbšom kontexte, komplexne ich spracováva a analyzuje ich informačnú štruktúru. Preto musíme pri 3D dátach rozlišovať dve úrovne, grafickú a informačnú/dátovú.

Geografický informačný systém (GIS) je výsledkom synergie rôznych vedných odborov ako geografia, informatika, geodézia, matematika atď. V čom sa ale podstatne líši od iných informačných systémov je to, že GIS je nástroj, ktorý primárne pracuje s priestorovými dátami.

Výhoda 3D GIS spočíva predovšetkým v tom, že pridáva tretí rozmer a tým kompletne reprezentuje realitu. Vzhľadom na túto skutočnosť ponúka širšiu škálu priestorových analýz, ktoré slúžia ako nástroje v iných odvetviach.

1.1 Ciele práce

Cieľom práce je ukázať výhody a postup tvorby 3D reprezentácie na štúdií 3D modelu mesta. Dôležité je odhaliť radu špecifik, ktorým sa 3D dáta líšia od 2D dát a taktiež poukázať aké benefity nám tento typ dát poskytuje.

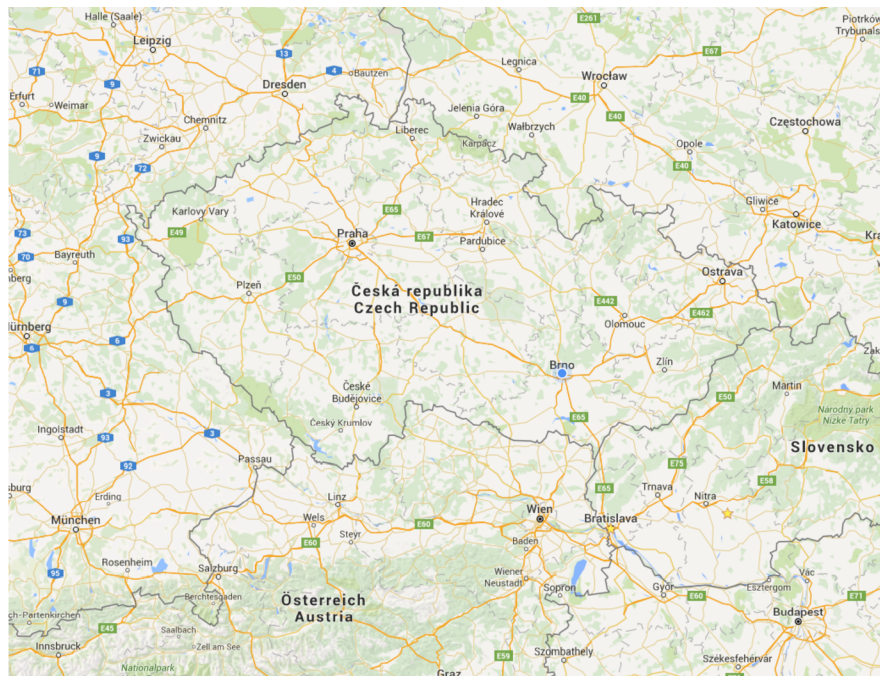
Pre splnenie cieľa bude použitý dátový formát CityGML, ktorý je medzinárodným štandardom OGC (Open Geospatial Consortium) a slúži na reprezentáciu a výmenu geografických a iných dát. Menovaný formát definuje trojrozmernú geometriu, topológiu a sémantiku tým, že je zameraný hlavne na informačnú štruktúru mestského modelu. CityGML je založené na jazyku GML (*Geography Markup Language*), ktorý je výmenným formátom geografických dát.

Moja práca je rozdelená do piatich ucelených častí. V druhej kapitole opisujem základné metódy zberu 3D dát. V tretej kapitole opisujem súčasný stav 3D reprezentácie dát v GIS a formáty, ktoré sa používajú pre 3D dáta, ich výhody/nevýhody a rozdiely medzi

nimi. V štvrtej kapitole sa venujem typom 3D modelov miest, ich rozdeleniu, spôsobom využitia. V záverečnej časti spomeniem významné existujúce modely miest. V piatej kapitola popisuje teoretickú rovinu formátu CityGML, jeho štruktúru, výhody a spôsoby využitia. V záverečnej časti podrobne popisujem praktickú časť metodiky tvorby modelu mesta.

1.2 Charakteristika územia

Záujmová lokalita pre spracovanie v rámci mojej diplomovej práce sú mestské časti Brna – Nový Lískovec a Líšeň. Brno je počtom obyvateľov najväčšie mesto Moravy a druhé najväčšie mesto Českej republiky. Je správnym centrom Juhomoravského kraja s postavením štatutárneho mesta. Rozloha mesta je približne 230,22 km². Počet obyvateľov je v súčasnosti 377 508. Mesto leží v nadmorskej výške 237 m. n. m. Najvyšší bod leží vo výške 479 m. n. m. a najnižší bod vo výške 190 m. n. m. Vzhľadom na skutočnosť, že záujmová lokalita je veľkého rozsahu, bude v mojej práci kladený väčší dôraz na metodiku tvorby modelu než na kvantitu spracovaných dát [1].



Obr. 1.1 Zobrazenie mesta Brna na mape (Google Maps)

2 ZBER DÁT DO 3D GIS

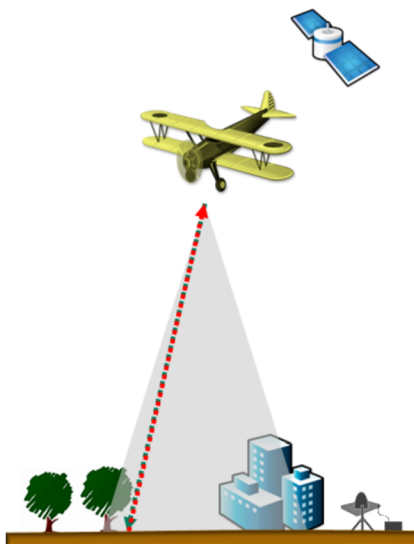
2.1 Metódy zberu dát

Pre voľbu najvhodnejšej metódy zberu, musíme brať do úvahy viac parametrov. Najdôležitejším z nich je presnosť. Pre niektoré účely postačia metódy, poskytujúce nižšiu presnosť. V našom prípade bola použitá metóda leteckého laserového skenovania - LiDAR. Táto metóda nám dáva k dispozícii pre našu aplikáciu nadmerne vysokú presnosť a jej výhodou je aj rýchlosť samotného procesu zberu dát.

Pred výberom metódy zberu, je potrebné myslieť aj na metódu spracovania nameraných dát. Výsledky rôznych metód zberu sa odlišujú dátovou štruktúrou aj konzistenciou, a preto je treba voliť vhodné metódy spracovania, ktoré vyžadujú isté postupy a programové vybavenie.

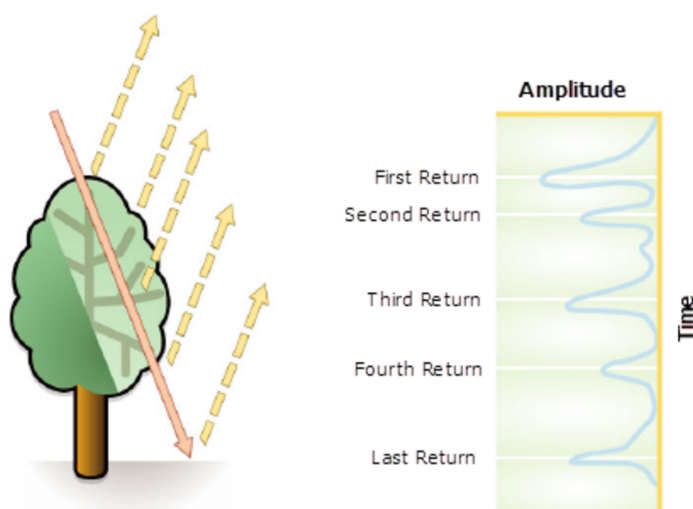
2.1.1 LiDAR – Light Detection And Ranging

Je jednou z metód diaľkového prieskumu. Jej princíp je založený na základe merania tranzitného času medzi vlnou vyslanou senzorom a vlnou odrazenou od pozemného cieľa. Výsledná vzdialenosť je potom jeho funkciou. Táto metóda najčastejšie používa platformu lietadla [2].



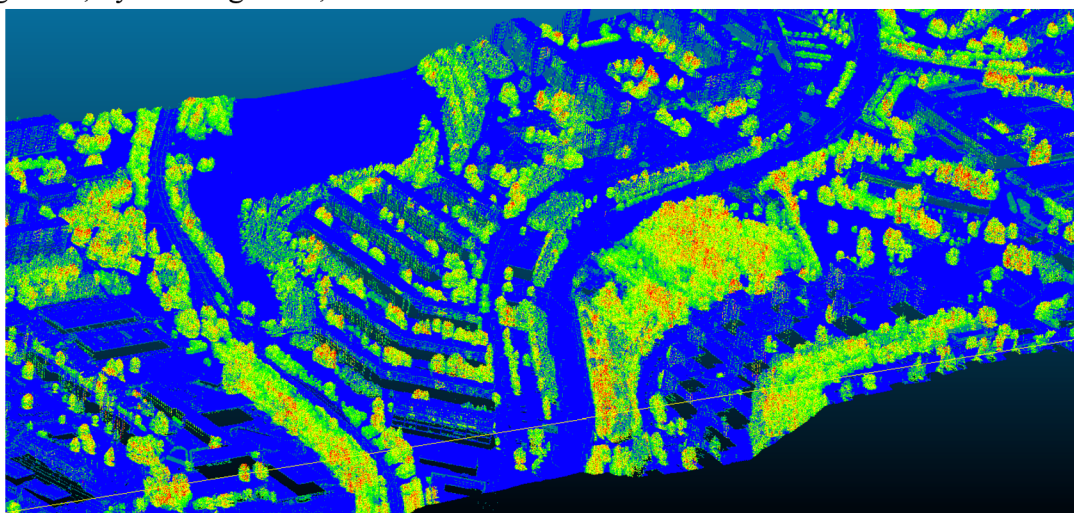
Obr. 2.1 Grafické zobrazenie LiDARu [3]

Namerané dáta sú v podobe trojrozmerného bodového mračna. Presnosť a hustota bodov závisí od konfigurácie merania. Výhodou tejto metódy je, že výsledné bodové mračno poskytuje viac informácií, než len informáciu o polohe. Dáta obsahujú intenzitu (je to sila odrazeného signálu), počet návratov (pôvodný signál sa môže vrátiť viacnásobne v závislosti od trasy signálu), číslo návratu (poradie v ktorom sa jednotlivé signály vrátili do prijímača) [3]. Bodové mračno okrem uvedených atribútov obsahuje ešte mnoho iných, ako GPS čas, uhol skenovania, RGB atď.

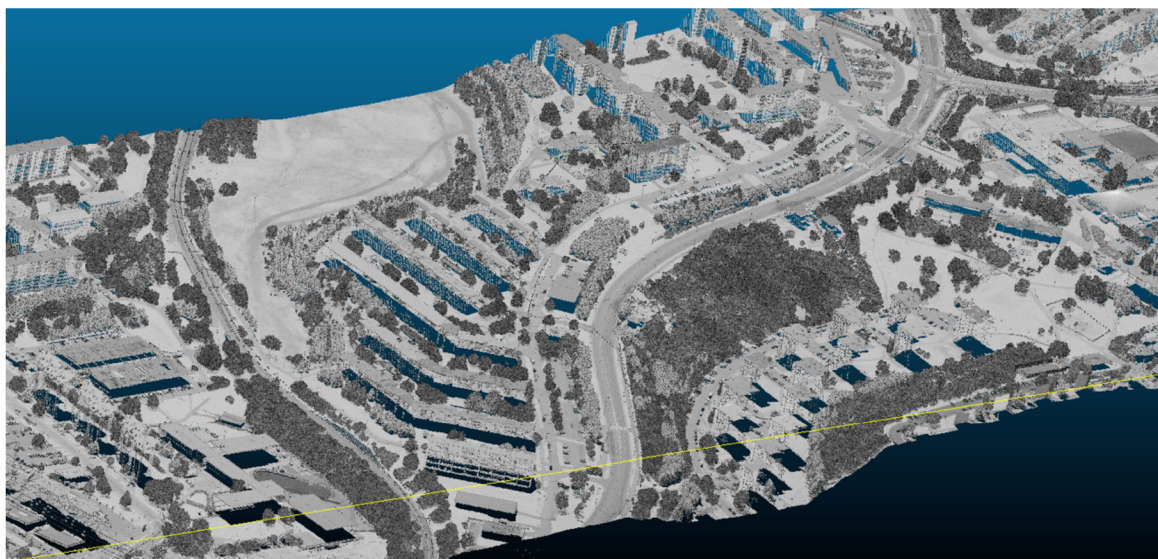


Obr. 2.2 Schematické znázornenie merania v čase [3]

Vyššie spomenuté atribúty sú nevyhnutnou súčasťou procesu klasifikácie bodového mračna. Pred začatím spracovania je nutné mračno zbaviť bodov, ktoré predstavujú odľahlé merania. Výsledkom klasifikácie je rozklasifikované mračno v ktorom vieme jednoznačne rozlíšiť povahu a typ snímaných objektov a rozdeliť ich do tried - budova, cesta, nízka vegetácia, vysoká vegetácia, atď.



Obr. 2.3 Bodové mračno – klasifikácia podľa počtu návratov



Obr. 2.4 Bodové mračno – klasifikácia podľa intenzity

2.1.2 Ostatné metódy diaľkového prieskumu

Pri ostatných metódach sú vytvárané dvojice alebo väčšie bloky snímok. Ako platformy sú najčastejšie používané lietadlá alebo družice. Takto získané snímky je nutné následne spracovať pomocou fotogrametrických postupov. V prípade snímkovania zástavby je nutné počítať s väčším zákrytom, alebo so zatičením časti plochy vysokými budovami. Výškové informácie sú zisťované stereoskopicky [4].

Z družicových sú najviac využívané predovšetkým tie metódy, ktoré disponujú vysokým rozlíšením. Medzi takéto systémy patria QuickBird alebo IKONOS. Využívané sú aj ďalšie fotogrametrické metódy, napríklad šikmé snímkovanie, alebo zisťovanie výšok z vrhaných tieňov. Ďalšou metódou z oblasti DPZ je radarová interferometria, kde je okrem intenzity odrazeného aktívneho žiarenia registrovaný aj fázový posun, ktorý predstavuje údaj o vzdialenosti skúmaného objektu od senzoru [4].

2.1.3 Ostatné metódy

V súčasnosti sa v praxi na zber trojrozmerných dát používajú aj bežné geodetické metódy ako sú GNSS merania a merania pomocou totálnych staníc. Iný spôsob získavania 3D dát je ich extrakcia z existujúcich 2D dát (územné plány, mestské geodatabázy a pod.). Tento spôsob získavania 3D dát však býva geometricky menej podrobný, pretože 3D dáta vznikajú extrudovaním 2D geometrie (väčšinou sa jedná o krabicový model mesta), no

z pohľadu dátovej sémantiky býva oveľa podrobnejší, pretože obsahuje mnoho informácií a môže byť naviazaný na rôzne zdroje dát.

3 SÚČASNÝ STAV REPREZENTÁCIE V 3D GIS

V dnešnej dobe je spoločnosť závislá na informáciách viac ako kedykoľvek pred tým. Čím viac sú informácie používané v rôznych oblastiach a kontextoch, tým viac vznikajú rozdiely medzi formami ich výmeny.

Z tohto dôvodu sa hovorí o pojme „interoperabilita“, ktorý sa zameriava na schopnosť preniesť dáta z jedného systému do druhého [5].

Bezproblémová výmena dát vyžaduje štandardy. Open Geospatial Consortium je medzinárodná organizácia, ktorá sa zaoberá vytváraním otvorených štandardov v oblasti priestorových dát. Tieto štandardy sú dostupné zdarma pre každého, za cieľom zlepšenia interoperability zdieľania priestorových dát [6].

Interoperabilitou priestorových dát sa zaoberá predovšetkým nariadenie Európskej komisie - INSPIRE, ktoré vstúpilo do platnosti 15. mája 2007 a má byť naplnené do roku 2019. Smernica INSPIRE nariaďuje členským štátom EÚ vytvorenie infraštruktúry priestorových dát za cieľom vzájomného zdieľania priestorových dát a verejného prístupu k priestorovým dátam [35].

INSPIRE sa venuje širokej škále priestorových dát a definuje dátové špecifikácie pre adresné informácie, administratívne jednotky, parcely, budovy, land cover, land use a mnoho ďalších [36]. Pre nás je relevantná smernica INSPIRE týkajúca sa budov – *INSPIRE Data Specification on Buildings – Technical Guidelines*. Táto technická špecifikácia pojednáva o dátovom modeli *Buildings* v kontexte INSPIRE. Definuje geometrické a sémantické parametre budov. Tieto parametre a špecifikácie budem popisovať v piatej kapitole, kde sa venujem formátu CityGML, ktorý je súčasťou INSPIRE, ako štandard pre 3D modely [37].

V nasledovných kapitolách spomeniem najpoužívanejšie dátové formáty v GIS. Pozornosť budem venovať aj formátom, ktoré slúžia na webovú reprezentáciu.

3.1 Vektorové formáty v 3D GIS

Na účel reprezentácie trojrozmerných objektov existuje celá rada formátov. Rozdiely medzi nimi spočívajú v účeloch, pre ktorý daný formát slúži a preto nás budú zaujímať iba tie, ktoré majú možnosť aplikácie v oblasti 3D GIS.

V tejto kapitole podrobnejšie popíšem formáty, ktoré sú najpoužívanejšie v oblasti 3D GIS, pretože dokážu uchovávať geometriu, ale predovšetkým sémantické informácie.

3.1.1 ESRI Shapefile®

ESRI Shapefile® je formát, ktorý sa používa na ukladanie geografických dát a atribútov. V prípade shapefile-u sa nejedná o otvorený štandard, ale špecifikáciou dátového modelu je veľmi podobný formátu SFA, ktorý je štandardom OGC. Formát patrí spoločnosti ESRI, ktorá sprístupnila otvorenú dokumentáciu špecifikácie tohoto formátu.

Tento formát neukladá topológiu, ale iba geometriu. Z tohoto dôvodu je jeho výhodou rýchlejší rendering jednotlivých geometrických prvkov. Geometrické prvky sú reprezentované prostredníctvom bodov, línií a polygónov. Samotná geometria je reprezentovaná ako množina vektorových súradníc. Atribúty sú uložené v dBASE® formáte [7].

Rozdiel medzi shapefilem a ostatnými formátmi je v tom, že shapefile má dátovú štruktúru rozdelenú do viacerých súborov. V súbore „.shp“ je uložená samotná geometria, v „.shx“ je indexovanie, „.dbf“ slúži na ukladanie atribútov. Tieto tri zložky sú nevyhnutné. Z ostatných je najznámejší „.prj“, v ktorom je uložená informácia o súradnicovom systéme [8].

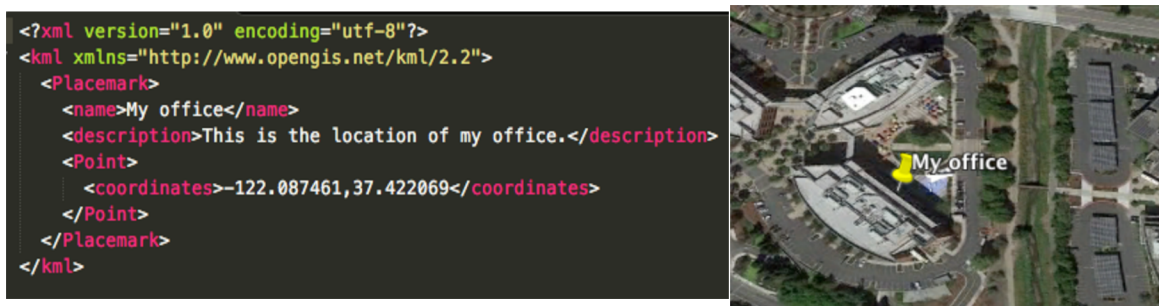
3.1.2 KML – Keyhole Markup Language

Jedná sa o formát, ktorý je používaný na zobrazovanie geografických dát v mapových aplikáciách. Jedná sa o dvojrozmerné mapové portály, ale aj prehliadače, ktoré podporujú trojrozmerné geografické dáta [9].

Formát je založený na XML (*Extensible Markup Language*). Poloha jednotlivých prvkov je definovaná v súradnicovom systéme WGS84, teda obsahuje zemepisnú šírku, zemepisnú dĺžku a ortometrickú výšku nad modelom geoidu EGM96. K jednotlivým objektom, ktoré sa v súbore nachádzajú, môžu byť pridelené aj atribúty [10].

Často používaná je jeho komprimovaná verzia, ktorá má príponu .kmz. Tá môže okrem geometrie a atribútov obsahovať aj rôzne grafické prvky ako sú obrázky a textúry. Táto komprimovaná verzia sa používa na distribúciu 3D modelov vo formáte COLLADA, ktorý spomeniem v tejto kapitole neskôr [10].

Štandard KML bol vytvorený spoločnosťou Google, za cieľom jeho použitia v prehliadači Google Earth. Neskôr sa však tento formát stal medzinárodným štandardom OGC, ktorý sa ďalej podieľa na jeho vývoji [10].



Obr. 3.1 Špecifikácia bodu vo formáte KML na podklade Google Earth

3.1.3 GML – Geography Markup Language

Tento formát je založený na báze jazyka XML a slúži na výmenu geografických dát. GML slúži ako modelovací jazyk pre geografické systémy, ale aj ako otvorený výmenný formát pre zdieľanie geografických informácií na internete [11].

Koncept GML je definovaný schémou XSD (*XML Schema Document*) a UML (*Unified Modelling Language*) schémou, ktorá popisuje štruktúru dokumentu. Schéma umožňuje rozšíriť hierarchiu štruktúry formátu a tak sa GML stáva základom pre iné štandardy ako napr. CityGML. Teda miesto geometrických objektov ako body, línie a polygóny, užívateľ vie napr. rozoznať obyčajnú cestu od diaľnice a naopak. Táto vlastnosť sa ako užitočná prejaví najmä vtedy, ak tieto definície budú rešpektovať celé komunity užívateľov, čo zabezpečí jednoduchú a zrozumiteľnú výmenu dát [11].

Výhodou formátu GML je to, že dokáže uchovávať veľké množstvo dát. Medzi tieto patria informácie ako geometria, súradnicový systém, topológia, čas, dynamický prvok, jednotky mier, smery, observácie a vzhľad objektov [12].



Obr. 3.2 Špecifikácia bodu vo formáte GML

3.1.4 GeoJSON

GeoJSON je otvorený formát pre výmenu geografických dát založený na formáte JSON (*JavaScript Object Notation*). Formát GeoJSON dokáže reprezentovať prvky a geometriu sa vzťahujúcu k nim i atribúty, ktoré sa k nim viažu [13].

Formát podporuje geometrické objekty ako Point, LineString, Polygon, MultiPoint, MultiLineString, MultiPolygon, GeometryCollection [13].

Výhodou tohto formátu je podpora v širokej škále softvérov (napr. QGIS), knižníc (napr. GDAL, Mapnik), webových aplikácií (napr. MapBox, Leaflet, CartoDB, MapServer, GeoServer) a mnoho iných. Tento formát je prínosom v oblasti webových technológií, pretože oproti iným má kratší a prehľadnejší zápis.

Odvodeným formátom od JSON je aj formát TopoJSON, ktorý je menej populárny. Hlavnou úlohou formátu TopoJSON je minimalizácia dátového toku medzi webovým serverom a klientom. Formát je čiastočne stratový, pretože súradnice lomových bodov sú zapisované v relatívnej polohe od daného počiatku a v celých číslach, čím sa stráca presnosť. K úspore veľkosti pridáva aj fakt, že hranice dvoch susediacich polygónov sú uložené iba jedenkrát [14].

```
var geojsonFeature = {
  "type": "Feature",
  "properties": {
    "name": "Coors Field",
    "amenity": "Baseball Stadium",
    "popupContent": "This is where the Rockies play!"
  },
  "geometry": {
    "type": "Point",
    "coordinates": [-104.99404, 39.75621]
  }
};
```

Obr. 3.3 Definícia bodu s atribútmi vo formáte GeoJSON

3.1.5 CityGML

CityGML je otvorený vektorový formát založený na XML, slúžiaci na reprezentáciu virtuálnych 3D modelov miest. Je aplikačnou schémou pre GML3 (Geography Markup Language), ktorý je výmenným formátom pre priestorové dáta. Aj formát GML3 aj CityGML sú štandardnými formátmi OGC. CityGML sa odlišuje od ostatných formátov tým, že okrem geometrie obsahuje aj sémantiku, atribúty a topologické väzby, čo výrazne rozširuje možnosti modelu pri analýzach.

V piatej kapitole podrobne popíšem formát CityGML, jeho vlastnosti, výhody a použitie [28].

3.2 3D Formáty pre geometrickú reprezentáciu

V tejto kapitole podrobnejšie popíšem formáty, ktoré sa využívajú na 3D reprezentáciu objektov, ale nesú výlučne iba informáciu o geometrii, teda nie je možné, aby obsahovali aj sémantické informácie. Tieto formáty sa najčastejšie využívajú v architektúre a v grafickom modelovaní.

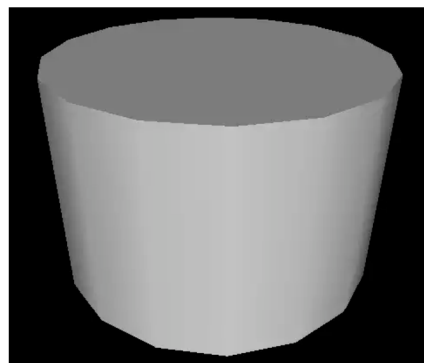
3.2.1 VRML – Virtual Reality Modelling Language

VRML je grafický formát založený na deklaratívnom programovacom jazyku, ktorý bol navrhnutý pre popis trojrozmerných scén obsahujúcich aktívne i pasívne objekty, ktoré boli použité napríklad v aplikáciách virtuálnej reality a na internete, kde slúži ako prenosový prostriedok pre trojrozmerné modely.

VRML je textový formát, v ktorom sú priestorové telesá popísané pomocou zoznamu súradníc vrcholov. Okrem samotnej geometrie tento formát môže popisovať aj jednotlivé grafické prvky ako farba, priehľadnosť, lesk atď. [16].

Samotný formát VRML nedokáže uchovávať georeferenciu objektov, preto v oblasti geoinformatiky je užitočnejšie jeho rozšírenie GeoVRML, ktorý slúži na reprezentáciu a vizualizáciu geografických dát v grafických aplikáciách [17].

```
#VRML V2.0 utf8
# A cylinder
Shape {
  appearance Appearance {
    material Material { }
  }
  geometry Cylinder {
    height 2.0
    radius 1.5
  }
}
```



Obr. 3.4 Špecifikácia objektu (valca) vo formáte VRML

3.2.2 COLLADA – COLLABorative Design Activity

COLLADA je výmenný formát založený na jazyku XML. Slúži na výmenu 3D dát medzi jednotlivými aplikáciami.

Medzi výhody formátu COLLADA patrí to, že dokáže ukladať vizuálne scény, ako efekty, tieň, animácie, fyziku, kinematiku a dokáže reprezentovať jednotlivé objekty na viacerých úrovniach.

Tento formát je vyvíjaný neziskovým technologickým konzorciom Khronos Group a stal sa jedným z otvorených štandardov. Súbor má príponu dae (*digital asset exchange*) [18].

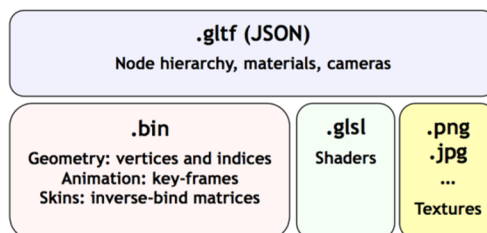
3.2.3 glTF – GL Transmission Format

Jedná sa o otvorený formát, ktorý slúži na výmenu 3D modelov a scén medzi aplikáciami. Výhodou formátu glTF je, že minimalizuje veľkosť dát a čas, ktorý je potrebný na vykreslenie grafiky v aplikáciách využívajúcich WebGL a OpenGL [19].

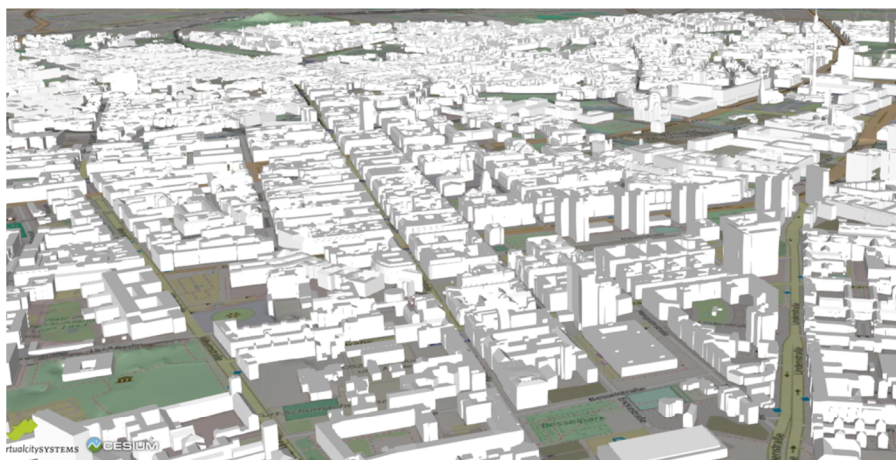
Práve z tohoto dôvodu sa veľmi rýchlo stal obľúbeným v oblasti publikácií webových scén a v streamovaní 3D modelov v rozhraní webových prehliadačov.

K vývoju formátu glTF prispela taktiež spoločnosť Khronos Group, ktorá uvoľnila špecifikáciu formátu prostredníctvom repozitára GitHub, kde sa na vývoji podieľali rôzne skupiny vývojárov.

Na obr. 3.5 je znázornené, čo všetko môže byť súčasťou štruktúry formátu (geometria, animácie, tieňe, textúry, kamery,...) [20].



Obr. 3.5 Obsahová štruktúra formátu glTF



Obr. 3.6 Model mesta Berlín zobrazený pomocou webovej platformy CesiumJS a formátu glTF (Zdroj: virtualcitySYSTEMS)

3.2.4 CZML – Cesium Language

Základom formátu CZML je JSON schéma. Slúži na reprezentáciu grafickej dynamickej scény vo webovom prehliadači pod platformou Cesium. Cesium je jedna z mála open-source knižníc s podporou API (Application Programming Interface), ktorá slúži na zobrazovanie 3D modelov a scén vo webovom prostredí. Podporuje formáty CZML a glTF.

Formát je schopný uložiť geometrické primitíva, ako body, línie, polygóny, 3D modely a dokáže vyjadriť aj ich variácie v čase [21].

```
{
  "id": "InternationalSpaceStation",
  "position": {
    "referenceFrame": "INERTIAL",
    "epoch": "2012-05-02T12:00:00Z",
    "cartesian": [
      0.0, -6668447.2211117, 1201886.45913705, 146789.427467256,
      60.0, -6711432.84684144, 919677.673492462, -214047.552431458,
      90.0, -6721319.92231553, 776899.784034099, -394198.837519575
    ],
    "nextTime": 300.0,
    "interpolationAlgorithm": "LAGRANGE",
    "interpolationDegree": 5
  }
}
```

Obr. 3.7 Ukážka zápisu objektu vo formáte CZML

4 3D MODEL MESTA

V posledných rokoch sa využitie 3D modelov miest rozšírilo do viacerých oblastí, kde môžu slúžiť jednému ale aj viacerým účelom. Využívajú sa na analýzu už existujúcich javov, k simulácii a predikcii prírodných javov (napr. povodne), pri územnom plánovaní, kde poskytujú možnosť posúdenia vplyvu budúcich zmien krajiny alebo územia. V súčasnosti stále vznikajú nové možnosti aplikácie týchto modelov.

V nasledovnej kapitole podrobnejšie popíšem kategórie členenia 3D modelov, oblasti ich využitia (use-cases) a príklady existujúcich 3D modelov miest vo svete.

4.1 Klasifikácia 3D modelov

3D modely môžeme kategorizovať na základe rôznych vlastností. V tejto podkapitole uvediem kategorizáciu 3D modelov na základe vlastností, ako úroveň reálnosti modelu, spôsob zberu dát a funkcionality modelu.

4.1.1 Delenie na základe úrovne reálnosti

Toto delenie je závislé od výslednej podrobnosti geometrických detailov. Podľa Shiode N. [22] delíme modely na:

- **Modely založené na panoramatických snímkach.** Panoramatické snímkovanie je nenákladná metóda, ktorej výsledkom je pseudo-3D vizualizácia. Rozsah tejto vizualizácie je obmedzený na jednotlivé miesta snímkovania. Tento typ modelu nepodporuje žiadne analytické funkcie.



Obr. 4.1 Ukážka panoramatickej snímky z portálu Google Street View (miesto: Brno – Líšeň) (Zdroj: Google StreetView)

- **„Krabicové“ modely budov (blokové modely).** Najčastejšie vzniká extrudovaním 2D pôdorysov. Geometria modelu je primitívna, no model už môže poskytovať základné analytické možnosti. Tento model môže obsahovať aj textúry.
- **Architektonický model.** Model obsahuje architektonické detaily stien a striech. Môže vzniknúť pomocou moderných fotogrametrických metód a automatizovaným spracovaním. Do tejto skupiny spadá viacero typov modelov, ktoré budem podrobne opisovať v piatej kapitole.
- **Plne objemové CAD modely.** Využívajú sa k modelovaniu individuálnych modelov. Zber dát je zabezpečený pomocou geodetických meraní a terestrického laserového skenovania. Tieto modely sú podrobné (môžu obsahovať aj interiéry). Táto kategória patrí medzi najnákladnejšie. [22]

4.1.2 Delenie na základe spôsobu zberu dát

Ďalšie kritérium, ktoré zvolil Shiode N. [22] na členenie modelov miest, sú metódy zberu dát.

- **Pozemné snímkovanie.** Táto metóda má využitie pre získavanie textúr. Fotografujú sa fasády a steny. Pri tejto metóde je možné využiť aj fyzikálne poznatky (pri použití infračervených snímok je možné zistiť tepelné chovanie budovy).
- **Panoramatické fotografovanie.** Poskytuje vyšší stupeň reálnosti. Pozostáva z panoramatických snímok, ktoré na seba kontinuálne nadväzujú. Výsledok tejto metódy je možné vidieť na obr. 4.1.
- **Letecké snímkovanie.** Poskytuje komplexnú informáciu o horizontálnom rozložení zástavby a ďalších objektov. Pri spracovaní stereopárov je možné extrahovať informácie o výškach objektov. K podobnému účelu môžu slúžiť družicové snímky s vysokým rozlíšením.
- **LiDAR.** Poskytuje aj vertikálnu aj horizontálnu geometrickú informáciu o danom území. V tejto oblasti sa jedná o najpresnejšiu techniku zberu dát.

Toto delenie funguje iba v teoretickej rovine, pretože v súčasnosti sa pri tvorbe modelov miest používa kombinácia viacerých metód.

4.1.3 Delenie na základe funkcionality modelu

V prípade členenia podľa funkcionality modelu, sa jedná hlavne o sémantický obsah a funkciu daného modelu, ktoré sú nasledovne sprostredkované užívateľovi. Podľa tohoto kritéria delí Shiode N. [22] modely na:

- ***Estetické modely***. Tieto majú len účel vizualizácie a prezentácie. Tieto modely sú prevažne realizované v grafických formátoch (napr. VRML alebo OBJ).
- ***Riešenie s obmedzenými analytickými funkciami***. Tieto modely disponujú aspoň jednou analytickou funkciou. Najčastejšie analýzou viditeľnosti. Neumožňujú však rozšírenie týchto funkcií.
- ***Plne analytické modely***. Ponúkajú rôzne analytické funkcie napr. analýza viditeľnosti, tieňovanie, rôzne simulácie. Túto škálu poskytovaných analýz je možné ďalej rozširovať.
- ***Hybridné modely***. Sú kombináciou virtuálnych modelov s fyzickými reprezentáciami.

4.2 Oblasti využitia 3D modelov (Use – Cases)

V poslednej dekáde, bola problematike 3D modelov venovaná dominantná pozornosť hlavne vizualizácií a grafike. V súčasnosti je však táto problematika zastúpená v celej rade aplikácií, kde sa nejedná len o vizuálnu časť, ale predovšetkým o informačnú.

4.2.1 Delenie spôsobov využitia 3D modelov

V tejto podkapitole preberiem jednotlivé možnosti využitia 3D modelov v GIS a ich potenciál v rôznych aplikáciách.

Podľa [23] rozdeľujeme analýzy/spôsobu využitia 3D modelov (use-cases) na tie, ktoré sú závislé na:

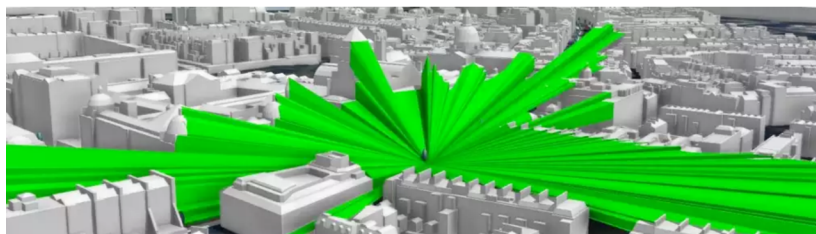
- geometrií (napr. slnečný osvit, tieň),
- geometrií, ale aj na sémantickej časti (napr. potenciál solárneho využitia),
- rozšíreniach a externých dátach, kde patria napr. hlukové analýzy. Samotné šírenie hluku sa dá vypočítať aj pomocou geometrie, ale dôležité sú sémantické informácie, ako materiál budov, počet obyvateľov atď. Práve tieto informácie prinášajú kvalitnejšiu výpovednú hodnotu.

Ďalej môžeme podľa [23] jednotlivé use-case rozdeľovať na základe významnosti grafickej reprezentácie výsledku. Na základe tohoto kritéria ich delíme na:

- **Nevizuálne.** Pre reprezentáciu a využitie výsledku analýzy/operácie nie je nutná vizualizácia, ale postačí ju spracovať a uchovať na databázovej úrovni. Do tejto skupiny patrí napríklad využitie solárneho potenciálu striech budov. Výsledok takejto analýzy je podstatný v matematickom/informačnom podaní. Môže byť znázornený aj graficky, ale pre výsledok to nie je podstatné.
- **Vizuálne.** Analýzy/operácie patriace do tejto skupiny si vyžadujú taktiež matematické procesy. Rozdiel spočíva v tom, že tieto by bez vizuálnej časti nedávali užívateľovi žiaden zmysel. Patrí sem napr. navigácia alebo územné plánovanie.

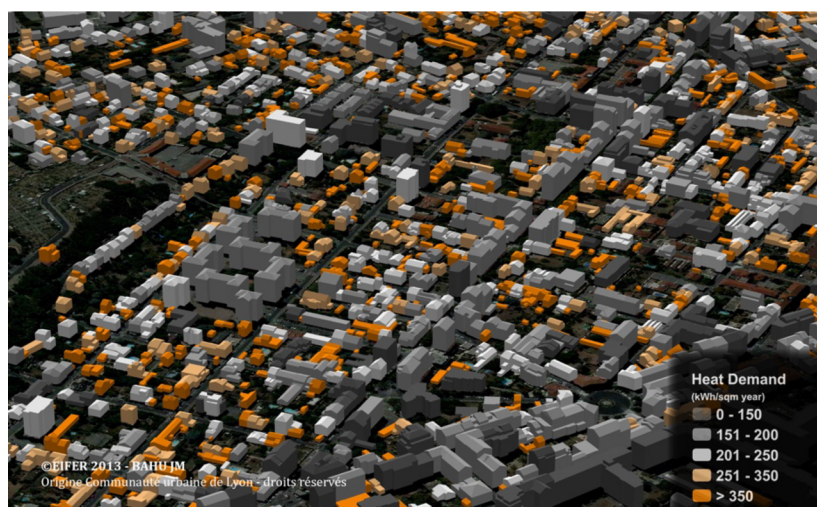
4.2.2 Príklady využitia (Use-Cases)

- **Vizuálne analýzy.** Detekcia vhodného miesta pre bezpečnostnú kameru. Detekcia šírenia signálu – výber vhodného miesta pre vysielajúce. Analýzy vrhania tieňov. Vizualizácia spojenia dvoch bodov. Detekcia množstva svetla, ktoré prenikne do budovy cez okná (populárne v krajinách s kratšou dobou denného svetla).



Obr. 4.2 Ukážka vizuálnej analýzy šírenia signálu

- **Spotreby energie.** Analýza energetických spotrieb z kombinácie dát ako objemy budov, počet poschodí, typ budovy, materiál a izolácia. Predikcia energetických spotrieb, detekcia tepelných mostov a tepelných strát.



Obr. 4.3 Grafická reprezentácia tepelných strát [23]

- **Bezpečnosť.** Známa poloha dverí, okien a únikových východov. Výhodné pre záchranné služby a krízové situácie (evakuácia).
- **Solárny potenciál.** Kombináciou znalostí plošného obsahu strechy a jej orientácie vzhľadom na svetové strany vieme vypočítať efektívnosť a návratnosť investície do solárnych panelov.



Obr. 4.4 Odhad solárnej radiácie budovy [23]

- **Hlukové analýzy.** Šírenie hluku medzi budovami v mestských častiach. Šírenie hluku od hlavných ciest a diaľnic. Táto aplikácia má využitie aj pri procese územného plánovania.
- **3D Kataster.** Cieľom tejto myšlienky, je zaviesť do evidencie katastra nehnuteľností aj tretí (výškový) rozmer. Toto riešenie by pomohlo najmä pri riešení problémov visutých budov a konštrukcií, ktoré pri pohľade zvrchu prekrývajú iné budovy alebo cestnú

infraštruktúru (vid' Obr. 4.5). Ďalším benefitom tohoto konceptu by bola presnejšia evidencia inžinierskych sietí.

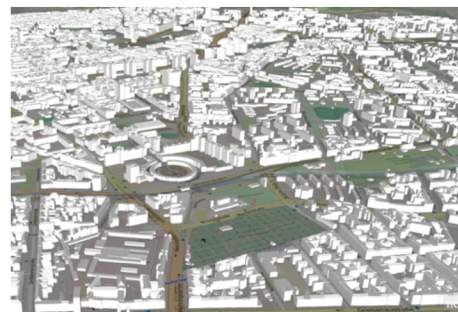


Obr. 4.5 Problém 2D reprezentácie v katastri [23]

- **Marketing.** Na základe kombinácie vyššie uvedených príkladov využitia by si našla táto platforma využitie aj v marketingu a predaju nehnuteľností. Pomocou nej by bolo totiž možné získať informácie o možnom výhľade z okna, hluku, energetickej záťaže atď.
- **Plánovanie infraštruktúry.**
- **Indoor navigácia.**

4.3 Príklady existujúcich 3D modelov

V súčasnosti je pre 3D modely miest z krajín Európy najviac populárne Nemecko, ktoré disponuje 3D modelmi viacerých miest. Medzi najznámejšie patrí model mesta Berlín.



Obr. 4.6 Ukážka CityGML modelu mesta Berlín

Tento model je voľne dostupný na stiahnutie ako Open Data prostredníctvom webovej služby. Model zahŕňa 550 000 budov o rozlohe 890 km² na úrovni podrobnosti

LoD2 aj s textúrami [24]. Model je možné stiahnuť vo formáte CityGML, ale je dostupný aj v iných formátoch (napr. kmz, Shapefile, 3DS,...).

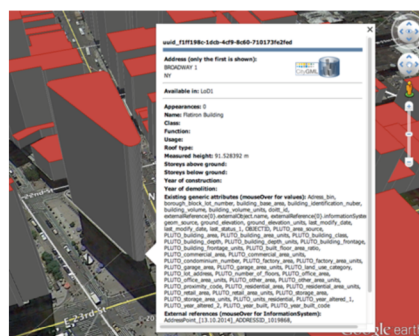
Medzi zaujímavé modely nepochybne patrí Virtual London, ktorý bol vytvorený organizáciou CASA (Centre for Advanced Spatial Analysis).



Obr. 4.7 Ukážka modelu Virtual London

Na tvorbu tohoto modelu boli použité fotogrametrické metódy a fotorealistické snímkovacie techniky s kombináciou GIS a CAD technológií. Cieľ modelu je podľa Battyho (CASA [25]) zapojiť obyvateľov mesta do verejného diania, zaistiť kooperáciu lokálnych urbanistov v procese miestneho plánovania a v neposlednom rade zlepšiť situáciu v prospech životného prostredia.

K zaujímavým projektom patrí aj 3D model mesta New York City. Jedná sa o študentský projekt, ktorého výsledkom je model mesta vo formáte CityGML. Zdroj dát pre tento model bol NYC Open Data Portal, ktorý disponoval 2D a 2,5D datasetmi. Tento model je v súčasnosti najväčším modelom v USA, ktorý je otvorený a prístupný verejnosti [26].



Obr. 4.8 Ukážka modelu mesta New York City [26]

Z Českej republiky je najznámejším a najväčším modelom – model hlavného mesta Prahy. Model odpovedá stavu z roku 2011. Model vznikol kombináciou metód fotogrametrického vyhodnotenia leteckých snímkov a nasledovného CAD modelovania.

Presnosť tohoto modelu je min. 0,5 m. Dáta sú dostupné vo formátoch Shapefile, DGN, DWG [27].

Okrem 3D modelu budov je dostupný aj 3D model zelene. Tento model obsahuje modely stromov vyšších ako 4 m a bodové prvky, ktoré obsahujú informáciu o relatívnej a absolútnej výške a typ zelene [27].



Obr. 4.9 Ukážka modelu hlavného mesta Prahy [27]

5 CITYGML

CityGML je otvorený dátový model, ktorý je založený na jazyku XML, ktorý slúži na správu a výmenu virtuálnych 3D modelov miest. Tento formát je definovaný ako aplikačná schéma pre formát *Geography Markup Language* verzie 3.1.1 (GML3), ktorý je rozširiteľným medzinárodným formátom pre výmenu priestorových dát podľa OGC [28].

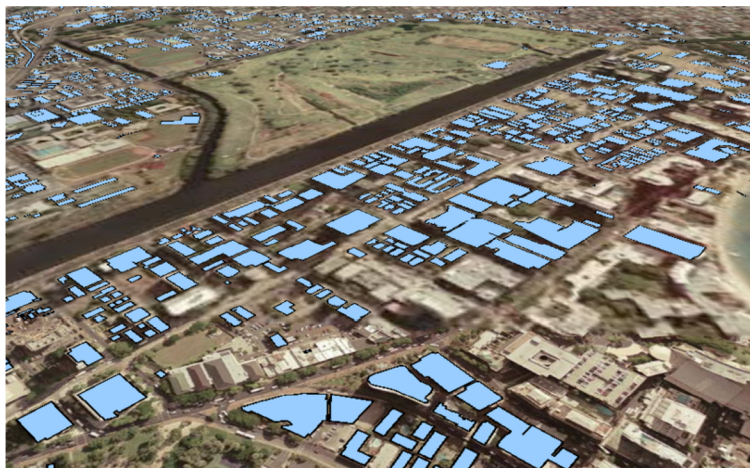
Cieľom vytvorenia tohoto formátu, bolo všeobecne a jednoznačne zadefinovať jednotlivé entity a atribúty mestských modelov a sémantické a topologické vzťahy medzi nimi. Podľa T. Kolbe [28] by táto myšlienka by mala eliminovať neefektívne obhospodarovanie 3D modelov a plné využitie ich informačného potenciálu v rôznych odvetviach.

CityGML okrem grafickej časti reprezentuje predovšetkým sémantickú a tematickú štruktúru modelu, pomocou ktorej dokážeme popísať súvislosti a väzby objektov, ktoré by sa vizuálnou cestou popísať nedali. V tejto rovine sa dá hovoriť o informačnom systéme, ktorý dokáže uchovávať informácie aj bez geometrickej časti, čím sa výrazne líši od iných GIS riešení.

5.1 Viac-úrovňová reprezentácia

CityGML podporuje viacero „úrovní podrobností“ (tzv. Level Of Detail - LoD). V rovnakom dataseťe môže byť ten istý objekt reprezentovaný vo viacerých LoD simultánne. Úrovne podrobností majú 5 kategórií (LoD0-LoD4).

LoD0: Do tejto kategórie spadá 2,5D digitálny model terénu s budovami v podobe 2D polygónov. Budovy môžu byť reprezentované buď pôdorysmi alebo hranami striech.



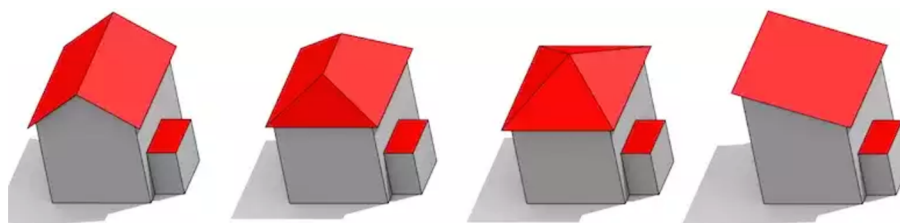
Obr. 5.1 Grafické znázornenie LoD0 modelu [23]

LoD1: „Krabicový“ model budov s plochými strechami (neobsahuje sedlové strechy). Môže vzniknúť extrudovaním pôdorysov budov na základe výškového atribútu.



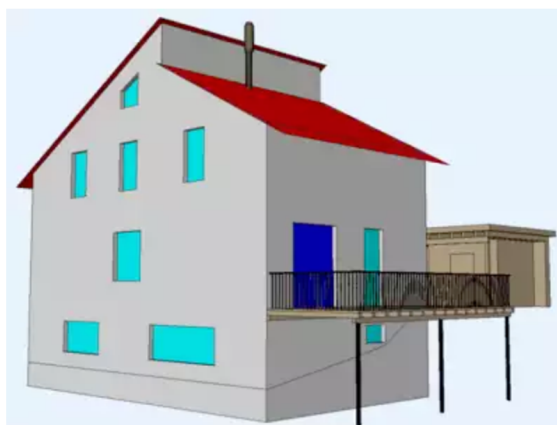
Obr. 5.2 Grafické znázornenie LoD1 modelu [23]

LoD2: Táto úroveň podrobnosti disponuje vyššou podrobnosťou geometrie strechy (sedlové strechy, veže, ...). Oproti predchádzajúcim je rozdiel aj v sémantickej štruktúre častí objektov (delenie prvkov budov na steny, strechy, podlahy).



Obr. 5.3 Grafické znázornenie LoD2 modelu [23]

LoD3: Úroveň LoD3 sa dá nazvať architektonickým modelom, pretože úroveň geometrie objektov dosahuje vysokú podrobnosť. Obsahuje detailné steny a strechy s komínmi, balkónmi, dvere, okná.



Obr. 5.4 Grafické znázornenie LoD3 modelu [28]

LoD4: Táto úroveň dopĺňa LoD3 o interiér budovy. Obsahuje objekty ako izby, vnútorné dvere, schody, nábytok.



Obr.5.5 Grafické znázornenie LoD4 modelu [29]

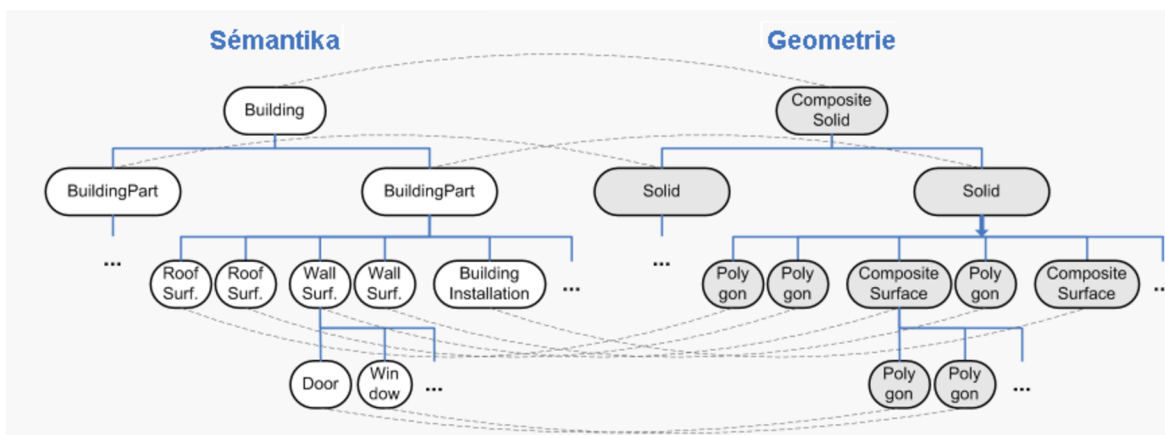
Všetky úrovne môžu byť doplnené o textúry s vysokým rozlíšením.

5.2 Koherentné sémanticko-geometrické modelovanie

Koherentné sémanticko-geometrické modelovanie je jedno z najvýznamnejších vlastností štandardu CityGML. Umožňuje modelovanie sémantickej časti a geometricko-topologickej časti v dvoch nezávislých paralelných líniách, ktoré sú navzájom prepojené.

Jednotlivé objekty reálneho sveta sú v CityGML na logickej(sémantickej) úrovni reprezentované pomocou prvkov (Features) ako Building, Wall, Window, ktorým prislúcha určitý typ geometrie napr. *Polygon*, *Solid* (viď. grafická schéma na Obr. 5.6). Výhodou sémantického modelovania je, že geometrická reprezentácia nie je nevyhnutná, čo znamená,

že jednotlivé objekty môžu byť vyjadrené iba na logickej (sémantickej) úrovni bez geometrie.



Obr. 5.6 Schematické znázornenie postavenia geometrickej a sémantickej časti [28]

5.3 Priestorovo – orientovaný model

Priestorové informácie prvkov CityGML sú odvodené od objektov geometrického modelu GML3. Tento model je založený na štandarde ISO 19107 „Spatial Schema“. Reprezentuje 3D geometriu vzhľadom na štandard *Boundary Representation (B-Rep)*.

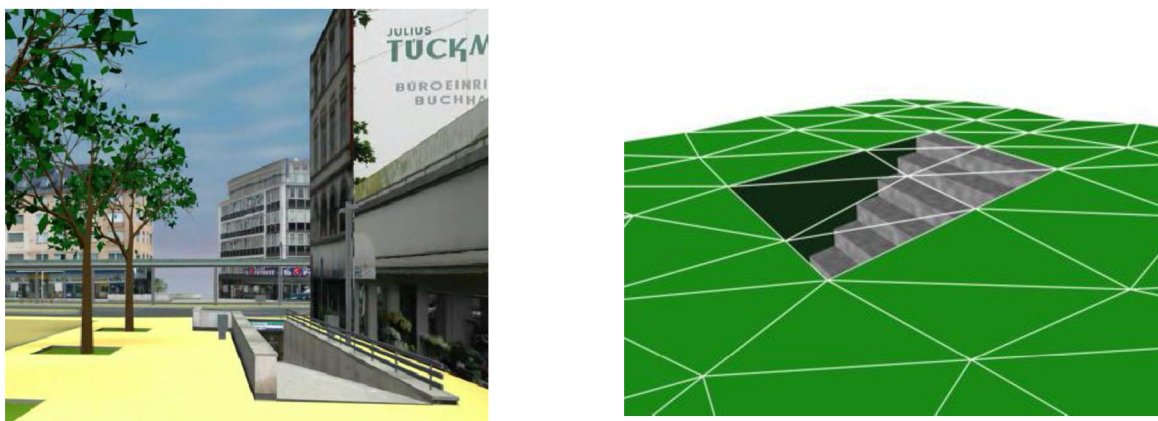
5.3.1 Geometrický model

Geometrický model formátu GML3 pozostáva z geometrických primitív, ktoré môžu byť kombinované za účelom vytvorenia komplexnej alebo agregovanej geometrie.

Trieda *Geometry* sa skladá z 0D až po 3D geometrických primitív, 1D až 3D zložených geometrií a 0D až 3D agregovaných geometrií. Prvky zloženej geometrie (napr. *CompositeSurface*) musia mať topologický vzťah a musia sa skladať z primitíva rovnakého rozmeru. Jednotlivé prvky agregovanej geometrie (napr. *MultiSurface* alebo *MultiSolid*) topologický vzťah mať nemusia (môžu sa prekrývať alebo sa vôbec nemusia dotýkať).

Objemové geometrie sú založené na dátovom modeli hraníc. Tieto telesá sú najčastejšie ohraničené pomocou *MultiSurface*. Definovanie povrchov pomocou kriviek nie je podporované, takéto tvary musia byť aproximované a nahradené množinou plôch. U všetkých prvkov musia byť použité súradnice niektorého z geodetických referenčných súradnicových systémov [28].

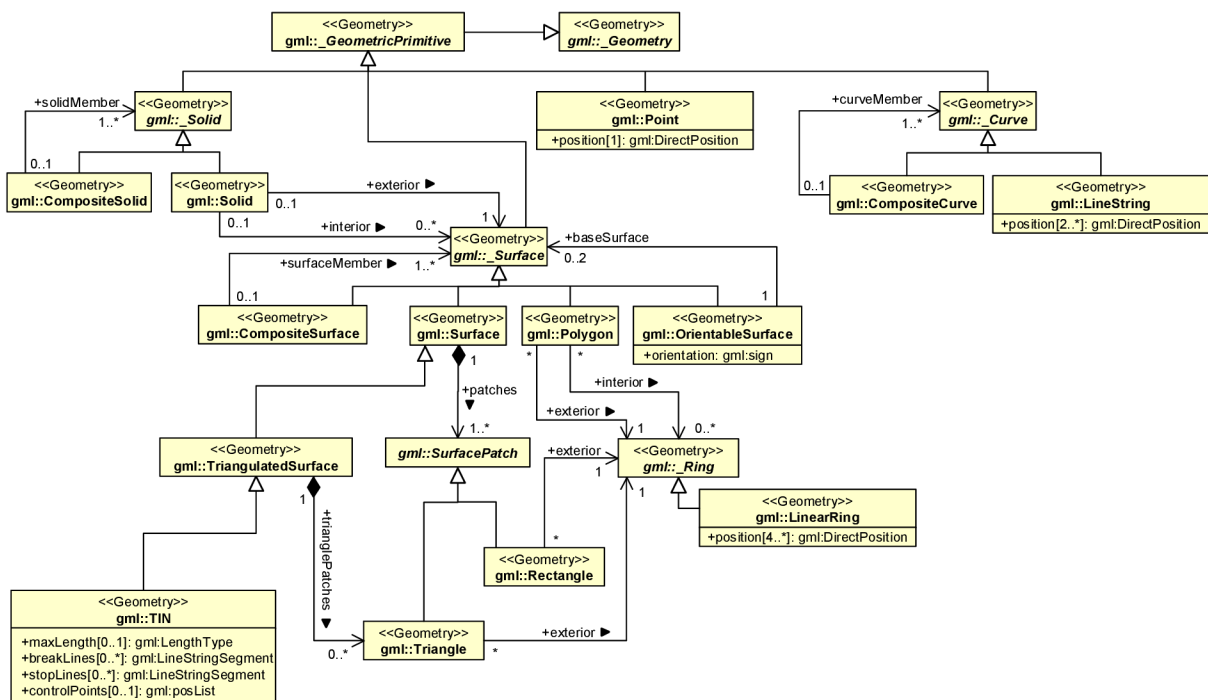
Každý objekt CityGML modelu, by mal byť objemovo uzatvorený z dôvodu možnosti vypočítať objem objektu a možnosti vykonávať akékoľvek analýzy. Problém ale nastáva v prípade zobrazovania vstupov podpovrchových objektov, ktoré sú v skutočnosti otvorené (napr. podzemné vchody, metro). V takomto prípade riešenie poskytuje virtuálny povrch *ClosureSurface* (viď. obr. 5.7).



Obr. 5.7 Príklady využitia povrchu *ClosureSurface* [28]

Význam modelovania podpovrchových objektov (napr. tunelov, podchodov) ako objemovo uzavretých objektov spočíva napr. vo výpočte objemu pre simuláciu záplav. Dôvodom je takisto predísť dieram v digitálnom modeli terénu (viď. obr. 5.7). Tento problém nastáva častokrát vtedy, keď 3D objekty vstupujú pod úroveň terénu. V takomto prípade je riešením použitie *TerrainIntersectionCurve (TIC)* (viď obr. 5.7). Ide o krivku, ktorá je aplikovaná presne na miesto prieniku budovy s terénom.

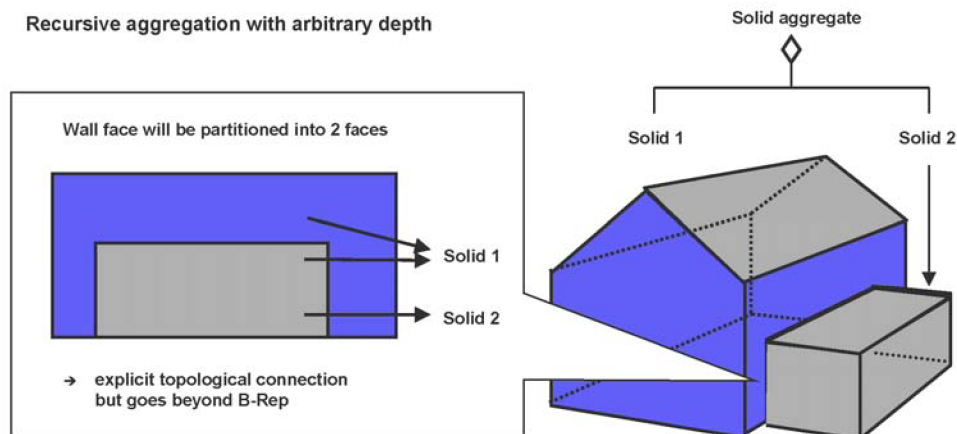
Ďalšia z výhod, ktoré ponúka CityGML, sú tzv. prototypy objektov. Jedná sa zväčša o objekty ako napr. stromy, semafore, dopravné značky, ktorých výskyt je v modeloch pomerne frekventovaný. Rozdiely výskytu objektov rovnakého druhu sú zväčša v polohe, rotácii a veľkosti danej inštancie. V takomto prípade je oveľa efektívnejšie mať dané objekty uložené v databáze iba raz a v prípade ich použitia vytvoriť inštanciu s odkazom na daný objekt. Každá inštancia je definovaná referenciou na prototyp daného objektu, základným polohovým bodom, ktorý určuje polohu inštancie objektu v modeli a transformačnou maticou, ktorá definuje transláciu, rotáciu a mierkový koeficient inštancie oproti prototypu [28].



Obr. 5.8 UML diagram CityGML geometrického modelu [28]

5.3.2 Topologický model

CityGML rozširuje topologické vlastnosti oproti klasickým vlastnostiam GML3. Jednou z nich je napr. zdieľanie geometrie medzi objektami modelu. Výhodou tejto vlastnosti je to, že geometria je reprezentovaná iba raz a ostatné objekty sa na ňu odkazujú. To znamená, že využitím tejto vlastnosti môžeme predísť duplikácii rovnakých dát. Vo všeobecnosti môžu nastať tri prípady. Prvý je, že dve entity môžu byť definované rovnakou geometriou. Môže to byť napríklad situácia, keď je cesta definovaná aj ako prvok triedy *Transport* a súčasne prvok triedy *Vegetation*. Druhý prípad môže nastať v prípade zdieľania časti geometrie medzi entitou a iným typom geometrie. Napr. stena budovy je súčasťou *Solid* geometrie, ktorá definuje budovu a zároveň môže byť definovaná ako trieda *WallFeature*. Tretím prípadom je referencia dvoch geometrií na rovnakú geometriu, ktorá je súčasne ich hranicou. Príkladom môže byť budova vedľa ktorej je garáž, s ktorou zdieľajú spoločnú stenu. Tento príklad je ilustrovaný na obr. 5.9.



Obr. 5.9 Geometricko-topologický model [28]

K vzájomnému zdieľaniu geometrie a topológie slúži štandard *XLink (XML Linking Language)*, ktorým sa jeden prvok odkazuje na geometriu druhého pomocou unikátneho ID.

Budova sa môže skladať okrem geometrických elementov (*lod1Solid* až *lod4Solid*), tak z topologických elementov (*lod1TopoSolid* až *lod4topoSolid*). CityGML teda môže byť nie len geometrickým modelom, ale aj topologicko-geometrickým. Tým sa CityGML líši od starších riešení, ktoré geometriu a topológiu oddeľovali.

5.4 Tematický (sémantický) model

Sémantický model CityGML pozostáva z jednotlivých tried objektov, ktoré sú súčasťou 3D modelov miest. V prípade CityGML je tento typ modelovania založený na štandarde ISO 19109 a GML3. Jednotlivé objekty modelu treba chápať ako reprezentáciu entít reálneho sveta. Vzťahy medzi týmito entitami sú definované pomocou UML (*Unified Modelling Language*).

Základnou triedou všetkých tried modelu je trieda *CityObject*, ktorá zahŕňa všetky ostatné podtriedy, ktoré slúžia na reprezentáciu jednotlivých sémantických tried v modeli (napr. terén, land use, transport, vegetácia, vodstvo, budovy atď.).

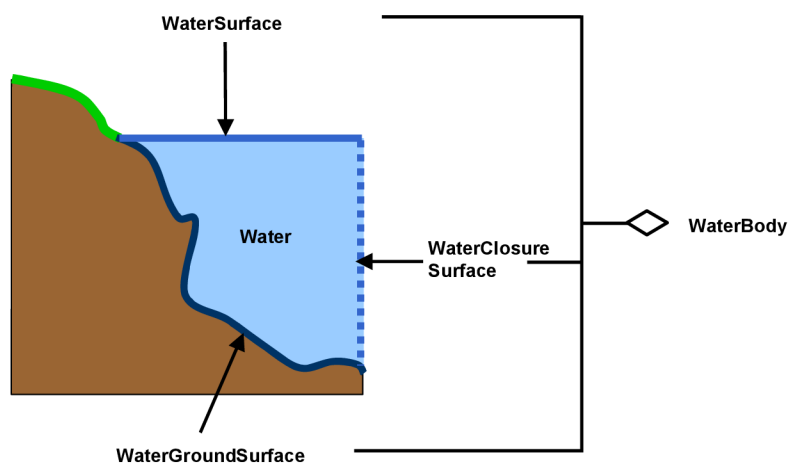
Najdetailnejšou časťou sémantického modelu je trieda určená pre budovy. Umožňuje reprezentáciu tematického a priestorového aspektu budov a ich častí. Jednotlivé budovy patria do triedy *Building*, ich časti do *BuildingPart*, miestnosti do *Room*, steny do *WallSurface* atď. Najvyššia je trieda *_AbstractBuilding*¹ je definovaná pomocou atribútov

¹ Pomocou podtržníku () pred názvom sú odlišené abstraktné triedy. Tieto nemajú priradenú geometriu a hovoria o všeobecných vlastnostiach.

class, *function*, *usage*, *yearOfConstruction* (rok vzniku budovy), *yearOfDemolition* (rok zániku budovy), *roofType* (typ strechy), *measuredHeight* (maximálna výška budovy), *storeyAboveGround* (počet podlaží nad zemou), *storeyBelowGround* (počet podlaží pod zemou), *storeyHeightsAboveGround*, *storeyHeightsBelowGround* (výška nadzemných a podzemných poschodí). Táto trieda neobsahuje geometriu (abstraktná), obsahuje informácie o budove a je nadradená triedam *Building* a *BuildingPart*.

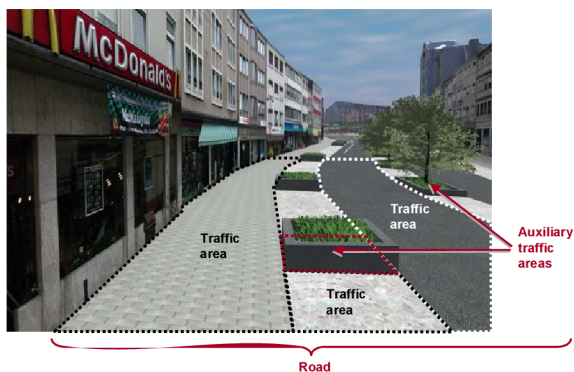
Terén je reprezentovaný pomocou triedy *ReliefFeature*. Táto trieda sa skladá z jednej alebo viacerých častí *ReliefComponent*. DTM môže byť definované rôznymi formami. Patria sem GRID (*RasterRelief*), TIN (*TINRelief*), lomové línie (*BreaklineRelief*), alebo pomocou bodov (*MassPointRelief*). Jednotlivé formy sa môžu medzi sebou kombinovať.

Vodstvo je reprezentované pomocou triedy *WaterBody*. Slúži na reprezentáciu trojrozmernej geometrie riek, kanálov, jazier a povodí. Táto trieda obsahuje podtriedy (viď. obr. 5.10) ako *WaterSurface* (hranica medzi vodou a vzduchom), *WaterGroundSurface* (spodná hranica vody), *WaterClosureSurface* (virtuálna hranica medzi rôznymi druhmi vodstva) [28].



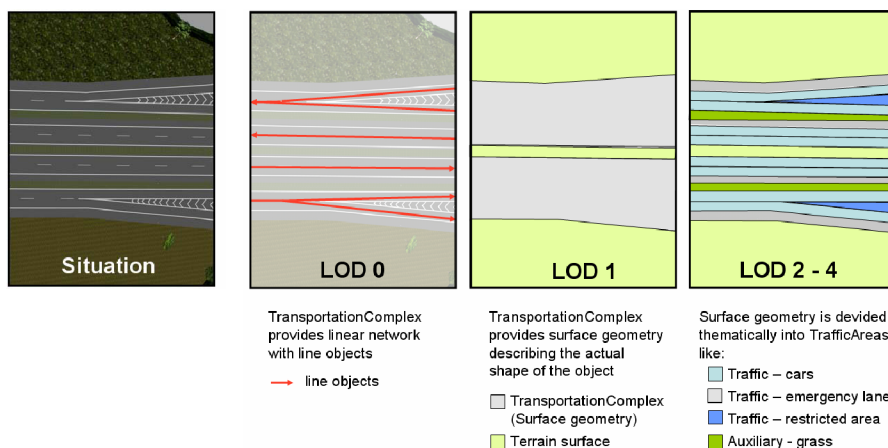
Obr. 5.10 Ilustrácia triedy *WaterBody* [28]

Pre vyjadrenie objektov dopravy je použitá trieda *TransportationComplex*. Mimo geometricko-topologického aspektu zachytáva aj funkčný aspekt. Táto trieda sa skladá z podtried *TrafficArea* (plocha cesty) a *AuxiliaryTrafficArea* (ostatné plochy, ktoré sa nachádzajú na cestnom telese – chodníky, parkovanie,...) vid'. obr. 5.11.



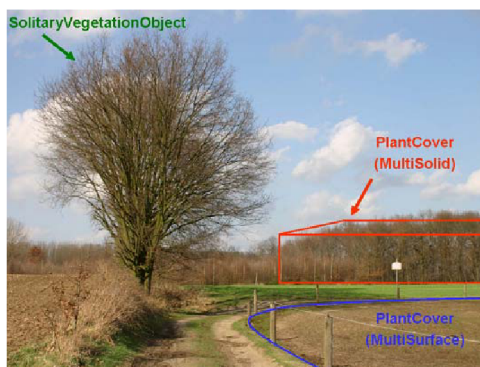
5.11 Vizuálna reprezentácia podtried TransportationComplex [28]

Hlavná trieda *TransportationComplex* môže byť ďalej delená do tématických podtried *Track*, *Road*, *Railway*, *Square*. Podtriedy sú charakterizované atribútmi *function* (obsahuje klasifikáciu do ktorej konkrétna cesta spadá, napr. diaľnica, vedľajšia cesta,...) a *usage* (obsahuje doplnkové informácie), *surfaceMaterial* (materiál povrchu). V LoD0 sú dopravné objekty reprezentované líniami a vo zvyšných LoD1 – LoD4 sú reprezentované pomocou *MultiSurface* vid'. obr. 5.12).



5.12 Znázornenie cesty na jednotlivých úrovniach LoD [28]

Dôležitou súčasťou modelov miest je aj vegetácia. Tá je v CityGML rozdelená samostatné prvky (napr. strom) a vegetačné plochy (napr. lesy, biotopy). Samostatné prvky vegetácie sú vyjadrené triedou *SolitaryVegetationObject* a plochy zahŕňa trieda *PlantCover* (vid'. obr. 5.13). Obe triedy môžu nadobúdať parametre, ktoré bližšie popisujú ich druh a typ (napr. výška, šírka koruny stromu, šírka kmeňa stromu, využitie) [28].



Obr. 5.13 Grafické znázornenie prvkov triedy *VegetationObject* [28]

Trieda *CityFurniture* slúži na reprezentáciu objektov, ako semaforey, uličné lampy, lavičky, lampáše, zastávky pre dopravu. Význam tejto triedy môže byť práve v simulácii dopravnej situácie v meste [28].



Obr. 5.14 Grafické znázornenie objektov triedy *CityFurniture* [28]

5.5 Rozšírenie formátu *CityGML* – *Application Domain Extensions (ADE)*

ADE špecifikujú prídavné moduly samotného jadra formátu *CityGML*. Na rozdiel od triedy *GenericCityObject*, pomocou ktorej je tiež možné zdefinovať triedy chýbajúce v natívnej štruktúre *CityGML*, musí byť ADE definované v samostatnom XSD súbore, ktorý priamo rozširuje štruktúru formátu a nadväzuje na ňu.

5.5.1 NoiseADE (šírenie hluku)

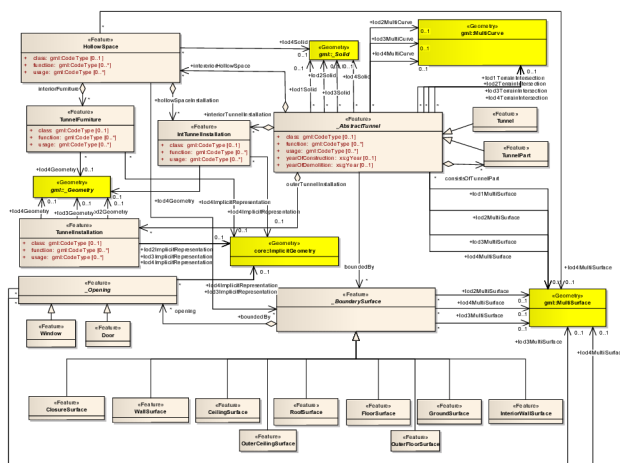
Rozšírenie pre šírenie hluku je implementované priamo v základnej štruktúre *CityGML*. Dôvodom je smernica Európskeho parlamentu, ktorá nariaďuje členským štátom povinnosť kalkulovať hlukové zaťaženie budov a následne dokumentovať na hlukových

mapách. Toto hlukové zaťaženie je vypočítané na základe akustického modelu, hlukového šírenia, ale je dané najmä výpočtami z ukazovateľov, ako sú napr. hustota dopravy, maximálna povolená rýchlosť, typ materiálu vozovky a pod., nie je určovaná meraním [29].

ADE vytvára nové triedy, ale rozširuje aj existujúce triedy o nové atribúty. Hladina hluku je vypočítaná pre 3 denné epochy - deň (06:00 – 18:00), večer (18:00 – 22:00) a noc (22:00 – 06:00) a celý deň (06:00 – 22:00). Túto hladinu vyjadrujú triedy *mDay*, *mEvening*, *mNight* a *mDay16*. Za rovnaké časové úseky sa udáva i podiel nákladných automobilov. Evidované sú aj iné údaje o doprave napr. údaje o rýchlostných limitoch, ktoré sú rozdelené na jednotlivé denné epochy, materiál povrchu vozovky, šírka jazdných pruhov, sklon vozovky, výskyt tunelov a mostov. Ďalej sú obsiahnuté aj údaje o budovách, ktoré sú zapísané priamo v základnej triede *_AbstractBuilding* [28].

5.5.2 TunnelADE

Toto rozšírenie je v súčasnosti už súčasťou formátu CityGML. Služi pre popis tunelov a iných podzemných objektov. Autory tohoto ADE sú Joachim Benner a Gerhard Gröger zo SIG 3D. V štruktúre sa najvyššie nachádza abstraktná trieda *_AbstractTunnel*. Tá je ekvivalentom triedy *_AbstractBuilding*, ktorá má rovnaký charakter, čo znamená, že má rovnaké atribúty, ale aj podtriedy (*Tunnel*, *TunnelPart*, *IntTunnelInstallation*, *TunnelInstallation*, *TunnelFurniture*, *_Opening*, *_BoundarySurface* a iné) [31].



Obr. 5.15 UML diagram pre TunnelADE [30]

5.5.3 BridgeADE

Rozširuje štruktúru CityGML o tematické a geometrické vlastnosti mostov. Od verzie CityGML 2.0 je súčasťou jeho špecifikácie. Takisto, ako TunnelADE, bol BridgeADE vyvinutý so zreteľom na štruktúru triedy *_AbstractBuilding*. Hlavnou triedou

je *AbstractBridge*, ktorá obsahuje podtriedy, ako *Bridge*, *BridgePart*, *ConsistOfBridgePart*. Okrem obvyklých atribútov *class*, *function*, *usage* taktiež obsahuje aj *yearOfDemolition*, *yearOfConstruction*, *isMovable*, *BridgeRoom*, *BridgeInstallation*, *BridgeFurniture* [31].

5.5.4 HydroADE

Rozširuje triedu *WaterBody* o podtriedu *DynamicWater*. Táto trieda sa ďalej vetví na podtriedy *DynamicWaterMetadata* (popisuje použitý software k výpočtu, hydraulický model a iné parametre) a *DynamicCoverage*. V tejto triede sú uložené údaje o výške vodnej hladiny (*waterLevel*, *waterDept*, *probability*) a jej zmene v čase [32].

5.5.5 CAFM ADE

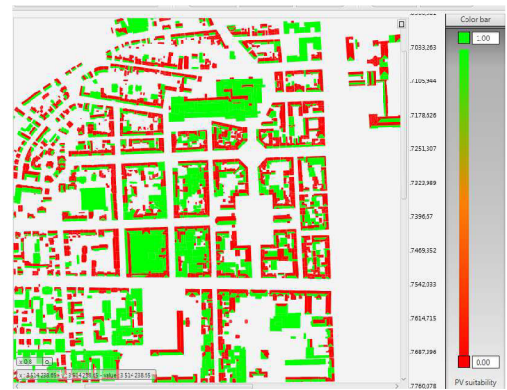
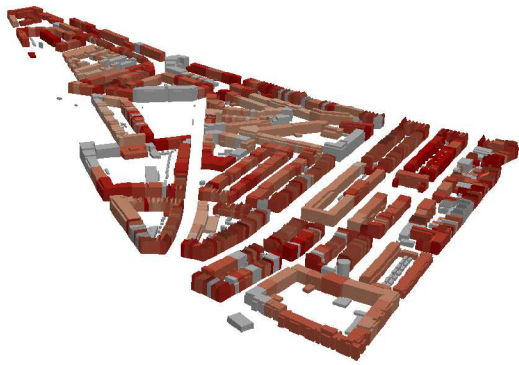
CAFM (Computer Aided Facility Management) rozširuje triedu *Building* o ďalšie prvky, ktoré sú dôležité pre facility management. Toto ADE sa používa iba na úrovni podrobnosti LoD4. K existujúcim triedam pridáva abstraktné podtriedy *_CAFM_CeilingSurface*, *_CAFM_FloorSurface* a *_CAFM_InteriorWallSurface*. Pridané sú aj atribúty o výrobcovi, stave, zodpovednú osobu, rok výstavby (*producer*, *state*, *contactPerson*, *yearOfConstruction*) [32].

5.5.6 GeoBIM ADE

Je rozšírením o podrobnú sémantickú štruktúru prevzatú z BIM (*Building Information Model*). Rozširuje modul *Building*. Toto rozšírenie však platí pre úrovne podrobnosti LoD3 a LoD4. Rozšírené sú napr. triedy *Door*, *Window*, *RoofSurface* [33].

5.5.7 EnergyADE

Umožňuje ukladanie energetických dát do modelu mesta za cieľom interoperability a výmeny týchto dát medzi energetickými spoločnosťami a aj spoločnosťami iných odvetví. Triedy *Building* a *BuildingPart* rozširuje o atribúty, ako *connectionToElectricity*, *heatingSource*, *heatingSystem*, *energyPerformance*, *materials* atď. Toto rozšírenie je možné aplikovať na účely (viď. obr. 5.16) výpočtov emisií CO₂, potenciálu šetrenia energie, využitia solárneho potenciálu, energetické simulácie atď. [34].



Obr. 5.16 Grafické znázornenie použitia EnergyADE na zobrazenie emisií CO₂ a zobrazenie solárneho potenciálu

6 TVORBA CITYGML MODELU MESTA BRNA

Dôvodov, prečo som si pre 3D model mesta vybral práve formát CityGML je viacero. Jeden z hlavných dôvodov je, že je to v súčasnosti najnovší štandard OGC pre 3D dáta a má v budúcnosti obrovský potenciál využitia. Ďalšie nemenej podstatné dôvody spočívajú vo výhodách CityGML oproti ostatným formátom. Medzi tieto výhody patrí napr. značne prepracovaná sémantická štruktúra, možnosť uchovania topológie, možnosť implementácie rozšírení.

6.1 Použité dáta

6.1.1 Geometrické dáta

Ako vstupné geometrické dáta boli použité budovy v 3D vektorovom formáte dgn. Tieto vektorové dáta vznikli z bodového mračna, ktoré bolo namerané pomocou technológie LiDAR a následne spracované programom TerraScan, ktorý pomocou klasifikačných a modelovacích algoritmov vygeneroval z mračna geometriu budov vo vektorovej podobe. Všetky dáta mi boli poskytnuté výskumným centrom AdMaS. Postup konverzie a spracovania dát budú rozobraté v nasledovných podkapitolách.

6.1.2 Popisné dáta

Počas spracovania boli použité aj iné dáta informačného charakteru. Pre doplnenie modelu o adresné dáta bola využitá služba RÚIAN (*Register územní identifikace, adres a nemovitostí*), ktorú spravuje ČUZK (*Český úřad zeměměřický a katastrální*).

RÚIAN je verejný zoznam, ktorý umožňuje užívateľom z verejnej, komerčnej, ale aj z akademickej sféry diaľkový prístup cez internet. Táto služba poskytuje dáta zdarma a využil som ju na stiahnutie informácií o adresách v celom rozsahu mesta Brna. V týchto dáta sa nachádzajú informácie, ako spôsob využitia pozemku, typ stavebného objektu, počet bytov, druh konštrukcie stavebného objektu, pripojenie stavebného objektu k rozvodu plynu, pripojenie stavebného objektu k vodovodu, pripojenie stavebného objektu ku kanalizácií, vybavenie stavebného objektu výťahom, spôsob využitia stavebného objektu a mnoho ďalších [38]. Napriek tomu, že dataset je bohatý množstvom typov evidovaných dát, mnoho z nich evidovaných nie je a väčšina vyššie uvedených atribútov obsahuje

prázdné polia. Pre naše využitie však boli prioritné adresy a adresné body, ktoré dataset obsahoval v plnej miere. Z RÚIAN som využil popisné čísla domov, názvy ulíc a PSČ.

6.1.3 Energetické dáta

Ďalej boli použité dáta o energetických spotrebách. Jedná sa o spotrebu teplej vody a ústredného kúrenia. Tieto dáta sa viažu k lokalite Brno – Nový Lískovec, konkrétne k bytovým domom na adresách Oblá 2, Oblá 5, Oblá 11, Oblá 14, Oblá 17, Oblá 57, Oblá 75, Svážná 3, Kamínky 6, Kamínky 27 a Kamínky 33. Tento dataset bol poskytnutý výskumným centrom AdMaS, ktorý sleduje spotreby energií prostredníctvom senzorovej siete od roku 2001.

6.2 Použitý software

Na hlavnú časť celého postupu bol použitý software FME Desktop (*Feature Manipulation Engine*) od firmy Safe Software. Tento software bol vyvíjaný spoločnosťou od roku 1993. Spočiatku slúžil iba na prevody medzi jednotlivými dátovými formátmi a súradnicovými systémami. Dnes slúži ako „manipulátor“ priestorových dát, teda okrem dátovej konverzie umožňuje aj veľké množstvo dátových modifikácií. Súčasná verzia softwaru je vybavená množstvom funkcií (tzv. transformerov), ako napr. možnosť manipulácie s databázou, množstvo analytických nástrojov, možnosť grafického zobrazenia dát atď. Software tiež podporuje veľké množstvo formátov a súradnicových systémov. Tento software som využil z dôvodu, že ako jeden z mála komerčných softwarov podporuje konverziu do CityGML.

Na určitú časť spracovanie dát, boli využité aj programy od spoločnosti ESRI. Medzi známejšie z použitých patria ArcMap, ArcScene a novšia komplexnejšia verzia ArcGIS PRO. Použitý bol aj CityEngine, ktorý je viac populárny v kruhoch architektov a urbanistov. Ten slúži najmä na tvorbu geometrických dát a umožňuje procedurálne modelovanie, teda modelovanie na základe vopred definovaných (naprogramovaných) pravidiel.

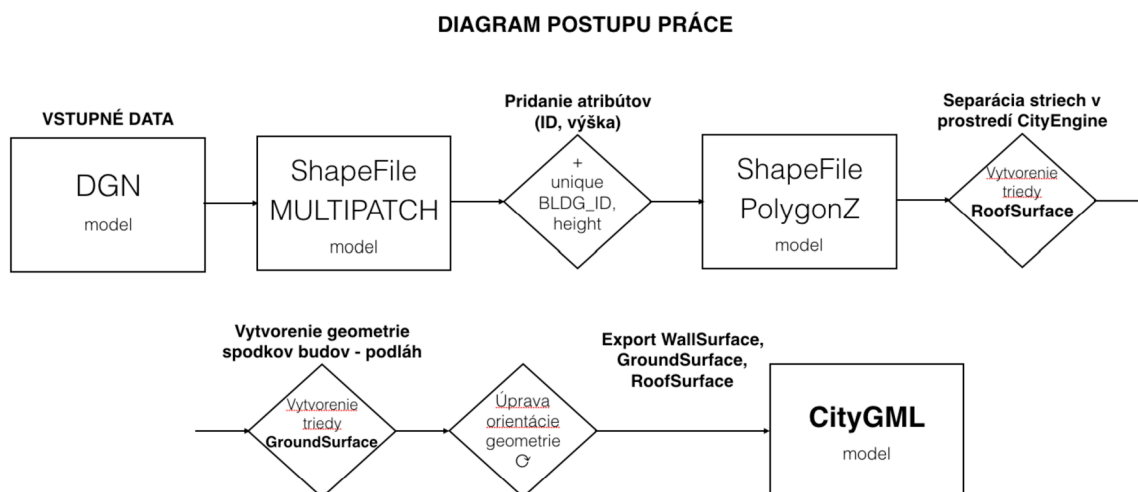
Na databázové riešenie bol použitý databázový objektovo orientovaný relačný systém PostgreSQL, na ktorý bola aplikovaná nadstavba PostGIS. V tejto kombinácii je tento databázový systém populárny najmä v komunite, ktorá je spojená s prácou

s priestorovými dátami. Nadstavba PostGIS rozširuje bežnú funkcionálnosť o množstvo priestorových a analytických funkcií.

6.3 Predspracovanie a modifikácia vstupných dát

Celý postup spracovania sa delí do troch hlavných častí. Prvou je „Predspracovanie a modifikácia vstupných dát“ (tzv. pre-processing). Úspešnosť prvej časti je nevyhnutná pre dokončenie ostatných častí. Druhou časťou je samotná „Konverzia do CityGML“ a treťou je „Správa dát v databáze“.

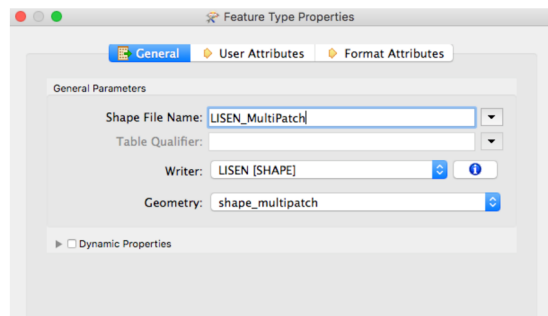
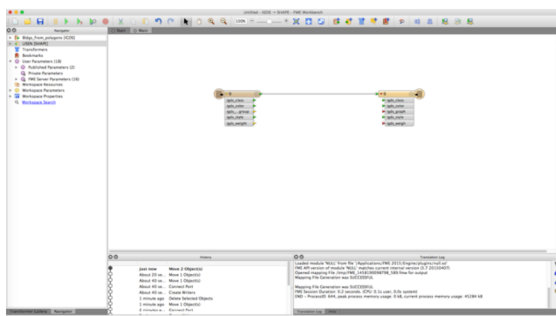
Na obr. 6.1 sú v diagrame schematicky znázornené jednotlivé úkony konverzie do formátu CityGML, ktoré v tejto kapitole podrobne popíšem.



Obr. 6.1 Diagram postupu konverzie do formátu CityGML

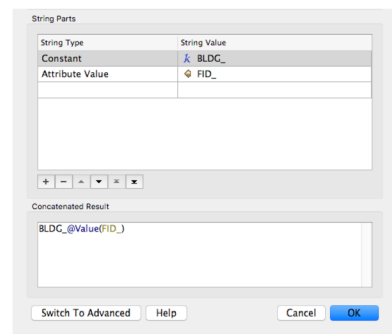
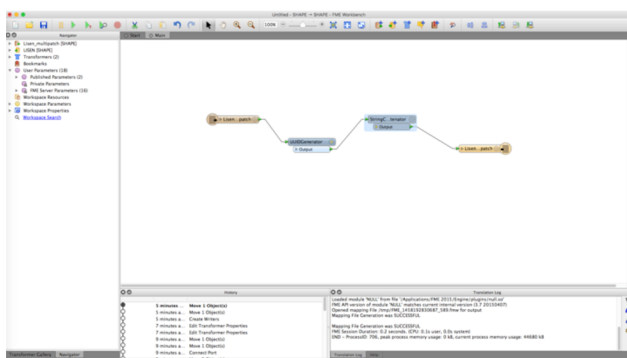
6.3.1 Prevod do formátu Shapefile MultiPatch

Vzhľadom k tomu, že dáta boli dodané vo formáte *dgn*, je nutné v prvom rade previesť dáta do vhodného GIS formátu. Pre môj prípad som si vybral formát *ESRI Shapefile*, no je možné použiť aj iný formát, ktorý má schopnosť ukladať okrem geometrie aj informácie a atribúty. Pre tento prevod, tak ako aj pre všetky ostatné som si zvolil prostredie softwaru FME Desktop (viď. obr 6.2).



Obr. 6.2 Grafické rozhranie FME Desktop (vľavo). Dialógové okno s nastavením parametru prevodu (vpravo)

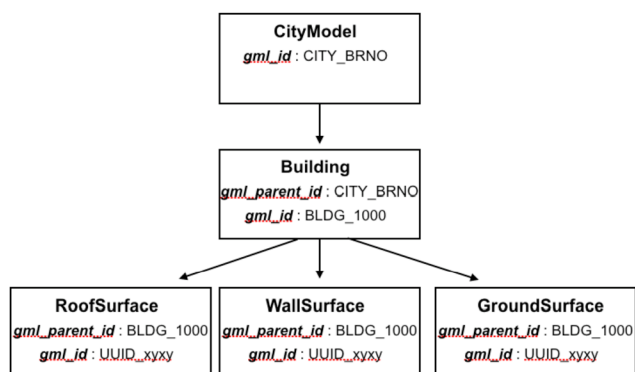
Prvý prevod je do formátu *ESRI Shapefile – MULTIPATCH*. Pre tento formát je špecifické, že definuje skupinu polygónov (napr. celú budovu), ako jeden záznam v databáze. Vo formáte CityGML, musí mať každý objekt svoje unikátne ID (pre budovy sú použité identifikátory *BLDG_XXX*) a preto je nevyhnutné začať od tohoto typu reprezentácie a postupne geometriu členiť na menšie časti – polygóny. Pre vytvorenie identifikátorov boli použité transformery – *UUID Generator* (vytvorí náhodný identifikátor pre každý objekt) a *StringConcatenator* (do identifikátoru pridá textový reťazec „BLDG_“) (viď. obr. 6.3).



Obr. 6.3 Použitie transformero (vľavo). Nastavenie parametrov transformera StringConcatenator (vpravo).

V CityGML musí mať každý objekt dvojité ID označenia - *gml_id* (unikátne ID) a *gml_parent_id* (ID rodiča). Obidve slúžia ako unikátne identifikátory, pričom *gml_parent_id* slúži na vyjadrenie hierarchie a dedičnosti konkrétneho prvku. Tento princíp uvediem na našom príklade modelu mesta Brno. Na vrchole celého modelu je trieda *CityModel*, ktorej *gml_id* je napr. „CITY_Brno“. V našom modeli je pod triedu *CityModel* priamo radená trieda *Building*, tzn., že hodnota jej *gml_parent_id* bude rovná „CITY_Brno“ a *gml_id* bude unikátne („BLDG_XXX“). Pod triedu *Building* patria jej časti - podtriedy, teda

WallSurface, *RoofSurface*, *GroundSurface*, ktorých hodnota parametra *gml_parent_id* bude rovná hodnote „BLDG_xxx“ v závislosti od toho, ku ktorej budove bude daná časť patriť. Správnosť tejto hierarchie je nevyhnutná pre ďalšie kroky a databázové operácie, preto je nutné ju dodržať. Prehľadná schéma sa nachádza na obr. 6.4.



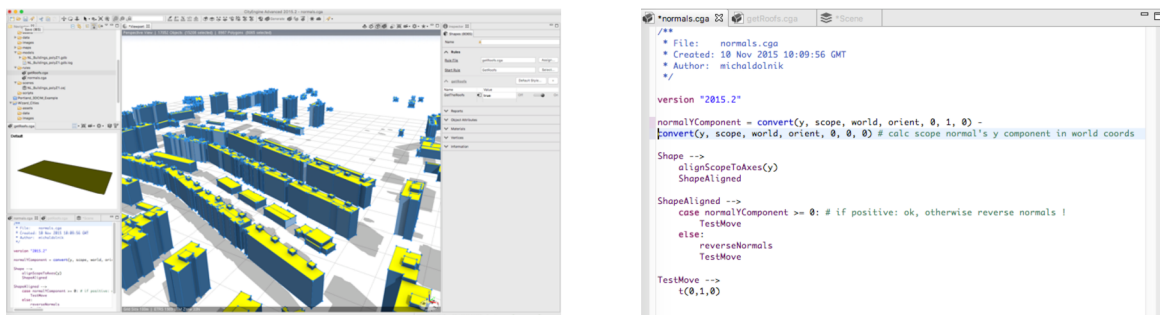
Obr. 6.4 Grafické znázornenie označovania objektov pomocou ID

6.3.2 Prevod do formátu Shapefile PolygonZ

V CityGML najčastejšie pracujeme s objektami, ktoré majú geometriu na úrovni polygónov, pretože budova musí byť reprezentovaná ako celok, zložený z viacerých komponentov – strecha, steny, podlaha. V prípade formátu shapefile sa jedná o typ geometrie *PolygonZ*. Konverziu do tohoto typu geometrie vykonáme rovnako ako v prvom kroku ako *MultiPatch* -> *PolygonZ*. Výsledkom budú dáta vo forme polygónov, ktoré si zanechajú atribút identifikátora rodiča – *gml_parent_id*.

6.3.3 Klasifikácia tried *RoofSurface* a *WallSurface*

V ďalšom kroku je nutné rozklasifikovať geometriu do podtried – *RoofSurface* (strechy) a *WallSurface* (steny). Keďže vstupný dataset neobsahoval podlahy (budovy nie sú uzavreté zospodu), zatiaľ budeme v tomto kroku klasifikovať tieto dve triedy a tretiu triedu *GroundSurface* (podlahy) vytvoríme v ďalšom kroku. Na klasifikáciu striech a stien som použil software CityEngine, v ktorom som si napísal pravidlo(funkcia



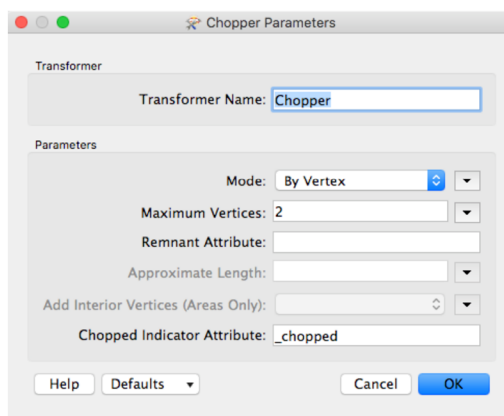
Obr. 6.5 Prostredie CityEngine (vľavo). Pravidlo pre klasifikáciu (vpravo).

v programovacom jazyku pre CityEngine), na základe ktorého sa oddelili vertikálne prvky od zvyšných.

Výstupom z tejto klasifikácie bola ESRI Geodatabáza (.gdb), v ktorej sa nachádzala vrstva. Táto vrstva sa od vstupnej vrstvy líšila atribútom, ktorý vyjadroval príslušnosť daného prvku k triede *WallSurface* alebo *RoofSurface*.

6.3.4 Tvorba geometrie pre triedu *GroundSurface*

Ako som už spomenul, budovy nie sú uzavreté zospodu, preto aby bola dosiahnutá správnosť konceptu CityGML - LoD2 (*RoofSurface*, *WallSurface*, *GroundSurface*), je nutné ich uzavrieť. K tomuto procesu bola použitá kombinácia nástrojov ArcGIS a FME Desktop. Pre vytvorenie tzv. *GroundSurface* som zvolil nasledovný postup. Na začiatku bolo nutné previesť prvky triedy *WallSurface* na typ geometrie PolylineZ. Tento proces je identický s procesom, ktorý som popisoval na začiatku. Novovzniknuté „polylines“ som nechal prejsť cez transformer *Chopper* (viď. obr. 6.6), ktorý pri danom nastavení - maximálneho počtu bodov prvku (Maximum Vertices = 2) „polylines“ rozdelil na čiary – „lines“.



Obr. 6.6 Konfigurácia transformera Chopper pri delení polylinií na samostatné línie

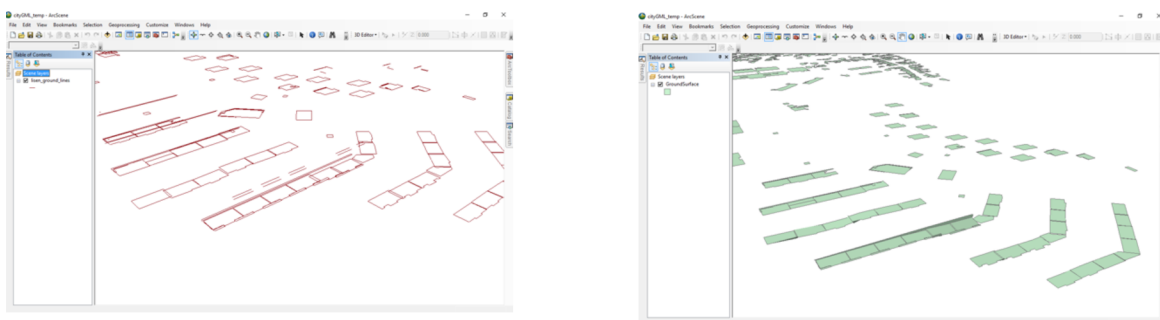
Zvyšok som dokončil v programe ArcGIS. Keďže v tomto kroku nám ide o vytvorenie polygónu, ktorý by zospodu budovu uzavrel, je jasné, že kľúčové bude nájsť tie línie, ktoré tvoria spodné hrany stien (resp. tie, ktoré tvoria prienik s terénom). Pre dosiahnutie úspešnosti v tomto hľadaní je dôležité určiť si správne parametre, na základe ktorých budeme hľadanie vykonávať. Ja som si zvolil parametre pochádzajúce z geometrickej povahy samotných prvkov, a to maximálnu (*maxZ*) a minimálnu (*minZ*) nadmorskú výšku daného prvku. Informácie odvodené z geometrie objektov je v prostredí

ArcGIS možné určiť pomocou funkcie *Calculate Geometry*. Pre ďalší postup je potrebný ešte údaj a to je nadmorská výška spodnej časti budovy (tento atribút som vypočítal na začiatku pre Multipatch a následne bol zachovaný). V atribútovej tabuľke som vytvoril ešte dve polia, pomocou ktorých som definoval výškovú toleranciu, v ktorej sa môžu jednotlivé línie triedy *GroundSurface* nachádzať. Túto výškovú toleranciu som nastavil ako interval 1 meter nad a pod úroveň výšky budovy. Z tohoto výpočtu mi pribudli ďalšie dva stĺpce – nadmorská výška spodnej časti budovy zväčšená o 1 meter (*inc*) a nadmorská výška spodnej časti budovy zmenšená o 1 meter (*dec*). Pre selekciu správnych línií, som použil nasledovný SQL dopyt pomocou funkcie *Definition Query* v prostredí ArcGIS.

```
SELECT * FROM ground_lines
```

```
WHERE minZ = maxZ AND minZ > dec AND minZ < inc
```

Po aplikovaní hore uvedenej tejto selekcie nám ostanú len línie, ktoré po prevode na polygóny uzavru budovy (viď. obr. 6.8). Pre vytvorenie polygónov z týchto línií použijeme nástroj *Feature To Polygon*, ktorý sa nachádza v Toolboxoch prostredia ArcGIS.



Obr. 6.8 Tvorba polygónov *GroundSurface* z línií pomocou nástroja *Feature to Polygon*

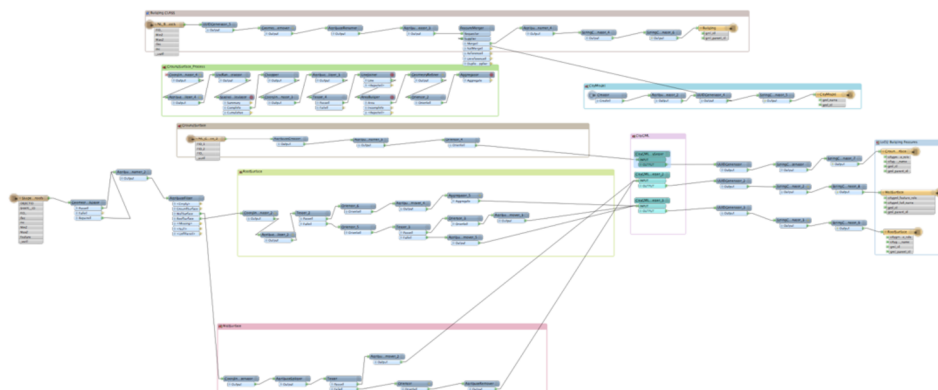
Po úspešnej realizácii tejto etapy, je prakticky dokončená časť predspracovania dát pred konverziou do formátu CityGML. V nasledovnej podkapitole podrobnejšie rozoberiem proces samotnej konverzie dát.

6.4 Konverzia do CityGML

Táto časť procesu sa celá odohráva v prostredí FME Workbench. Ako som spomenul v predošlej kapitole, tento software je určený na manipuláciu a modifikáciu priestorových dát. V našom prípade ako vstupné dáta použijeme modely budov vo formáte ESRI Shapefile, vo forme polygónov s atribútmi *FeatureType* (*RoofSurface*, *WallSurface*,

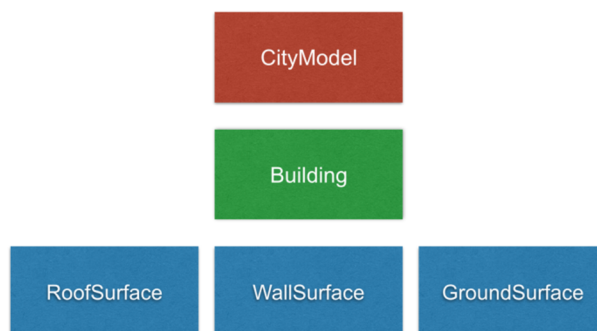
GroundSurface), *gml_parent_id* a *gml_id* za cieľom správneho vytvorenia plnohodnotného CityGML modelu.

Celý postup konverzie v FME Workbench pozostáva z niekoľkých modulov (viď. obr. 6.9).



Obr. 6.9 Grafické znázornenie jednotlivých častí procesu konverzie v prostredí FME Workbench

Z hľadiska hierarchie nadradenosti a podradenosti jednotlivých prvkov sa náš model skladá z časti, ktoré sú znázornené na obrázku 6.10.

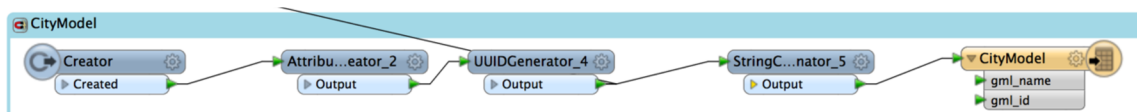


Obr. 6.10 Architektúra konceptu nášho modelu

V nasledujúcich podkapitolách podrobnejšie popíšem role jednotlivých častí a postup ich tvorby v architektúre modelu CityGML.

6.4.1 CityModel

Proces tvorby modulu CityModel pozostáva z niekoľkých komponentov, ktoré je možno vidieť na obr. 6.11.

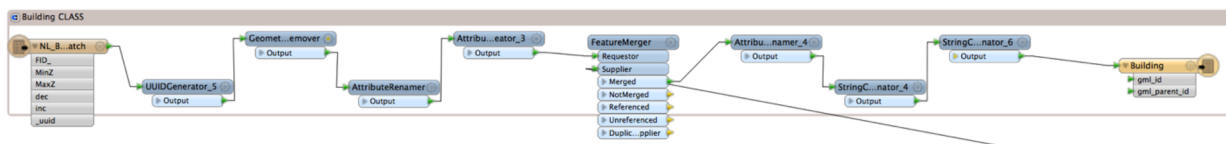


Obr. 6.11 Proces tvorby hlavnej triedy CityModel

Nástroj **Creator** slúži na vytvorenie prvku. Je možnosť vytvoriť aj prvok zo súradníc a referencovať ho do určitého súradnicového systému atď. V našom prípade je potrebné vytvoriť prvok s nulovou geometriou (keďže sa jedná o abstraktnú triedu) a zaradiť ho do súradnicového systému. Ďalší nástroj sa nazýva **Attribute_Creator**. Tento prvok slúži na vytvorenie atribútov a priradenie istej hodnoty danému atribútu. V našom prípade išlo o vytvorenie atribútu *gml_name* s názvom príslušnej časti mesta (napr. „novy_liskovec“/“lisen“). **UUID_Generator** slúži na vytvorenie unikátneho náhodne vygenerovaného ID pre ľubovoľný počet prvkov. V tomto prípade ide iba o vytvorenie prvku *gml_id*. **StringConcatenator**, ktorý slúži na upravovanie atribútov ako textové reťazce. Umožňuje vkladanie textových reťazcov už do existujúcich. V našom prípade išlo o vloženie reťazca „CITY_“ pred *gml_id*, kvôli rozlíšiteľnosti sémantickej povahy jednotlivých prvkov. Celý tento proces sa nakoniec zapíše pomocou **Writera** do prvku *CityModel*.

6.4.2 Building

V tejto časti postupu ide o tvorbu abstraktnej triedy *Building*. Celý postup sa nachádza na obr. 6.12.



Obr. 6.12 Proces tvorby abstraktnej triedy *Building*

Do tejto časti procesu vstupuje geometria vo formáte MultiPatch. Dôvodom je to, že táto vrstva vykazuje reálne číslo počtu objektov, keďže jedna budova je rovná jednému záznamu v databáze. Z tejto vrstvy teda dostaneme presný počet budov, na ktoré sa potom môže viazať ostatné typy geometrie a atribútov. Väčšina procesov a nástrojov sa s predošlým príkladom opakuje. Rozdiel je v použití nástroja **GeometryRemover**, ktorý odstráni geometriu a **FeatureMerger**, ktorý zabezpečí dedičnosť atribútu *gml_id* od triedy *CityModel* a uloží ju do atribútu *gml_parent_id* v triede *Building*.

6.4.3 RoofSurface a WallSurface

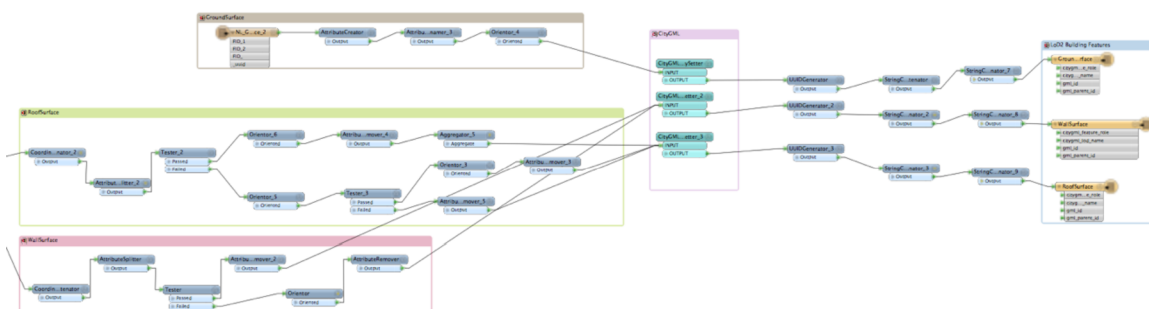
Doteraz sme spomínali iba proces tvorby abstraktných tried v hierarchii CityGML modelu. Pri tvorbe *RoofSurface* a *WallSurface* ide o prácu s fyzickou geometriou

jednotlivých objektov. Práve z tohto dôvodu je nutné aby sme zaistili určité geometrické podmienky.

6.4.3.1 Orientácia polygónov

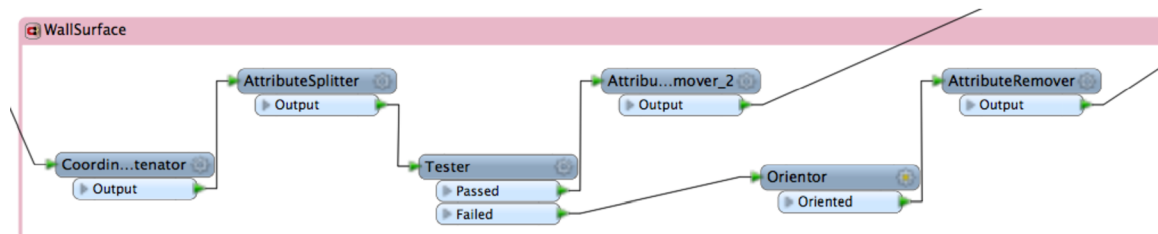
Jeden z najväčších problémov, ktorý pri tvorbe modelu nastal, bol problém orientácie polygónov, ktorý taktiež platí aj pre ostatné vektorové formáty. Pokiaľ je chybná orientácia polygónov (neplatí *Boundary Representation*), nie je možné vykonávať žiadne analýzy. V grafickom rozhraní (grafických prehliadačoch) sa tento jav prejavuje priehľadnosťou polygónov, ktorá sa viaže na orientáciu vrcholov v polygóne. V prípade, že body v polygóne sú orientované v smere proti chodu hodinových ručičiek, je polygón viditeľný z vonkajšej strany a z vnútornej je priehľadný. V opačnom prípade, teda keď sú body v polygóne orientované v smere chodu hodinových ručičiek, je polygón z vonkajšej strany priehľadný a z vnútornej je viditeľný. V CityGML, je dobrá použiteľnosť tejto vlastnosti pri zobrazovaní prvkov ako okno, vonkajšia stena, vnútorná stena, vchod do tunela atď. Je nutné, aby niektoré prvky boli viditeľné z vnútornej strany a naopak. Napr. v prípade vchodu do tunelu, prípadne podzemných konštrukcií je nutné, aby boli uzavreté a to je možné iba s polygónom, ktorý bude transparentný zvonku.

V našom prípade je v záujme mať všetky polygóny orientované v protismere chodu hodinových ručičiek, pretože chceme, aby boli všetky polygóny viditeľné z vonkajšej strany. Pri tomto kroku je vhodné pripomenúť, že vstupné dáta, ktoré používam sú výstup z procesu klasifikácie a automatizovaného modelovania softvéru tretej strany, čo spôsobuje, že geometrická správnosť dát nie je dokonalá. V dátach sa nachádzajú chyby, ako rôznorodosť orientácie polygónov a občasné pretnutie polygónov cez seba. V nasledovnej časti popíšem postup riešenia problému rôznorodej orientácie polygónov a kompletnej konverzie celej geometrickej časti budov (viď. obr. 6.13).



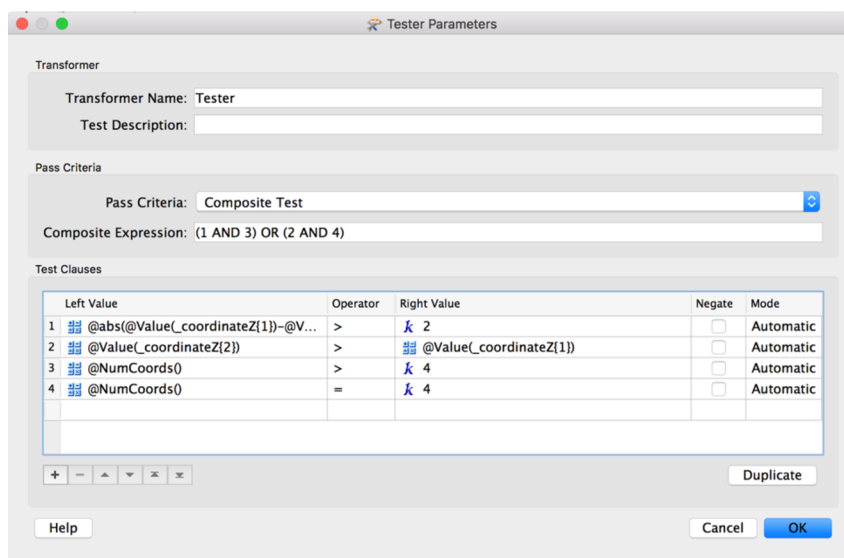
Obr. 6.13 Schéma prevodu geometrických častí – *RoofSurface*, *WallSurface*, *GroundSurface*

Pri konverzii *WallSurface* a *RoofSurface* som použil rovnaký mechanizmus. Tým je použitie podmienkovej rovnice pre testovanie orientácie jednotlivých polygónov. Vetva pre *WallSurface* (viď. obr. 6.14) začína použitím nástroja *CoordinateConcatenator*, ktorý extrahuje výšky jednotlivých bodov polygónu.



Obr. 6.14 Schéma prevodu stien – *WallSurface*

Nasledovný nástroj *AttributeSplitter* prevedie extrahované výšky do poľa, ktoré vstupuje do *Tester*-u, ktorý slúži na filtráciu geometrie na základe stanovenej podmienky (viď. obr. 6.15).



Obr. 6.15 Konfigurácia nástroja *Tester*

Tento nástroj nám umožnil rozdeliť existujúce polygóny na dve skupiny. Na tie, ktoré sú orientované v smere chodu hodinových ručičiek a naopak. Toto rozdelenie sme vykonali na základe porovnania Z súradníc bodov jednotlivých polygónov. Orientácia polygónov a poloha počiatočného bodu polygónu neboli riadené žiadnym pravidlom. Preto bolo nevyhnutné vykonať analýzu početnosti bodov jednotlivých polygónov (teda určiť, koľko bodov sa v polygónoch vyskytuje najčastejšie), na základe ktorej som si definoval vlastné pravidlo pre zmenu orientácie. V tabuľke 6.1 je uvedená početnosť jednotlivých polygónov, na základe počtu bodov v polygónoch. Celkový počet polygónov v datasete je 23 902. V tabuľke som uviedol iba prvých 5 skupín, pretože zvyšné mali zanedbateľnú

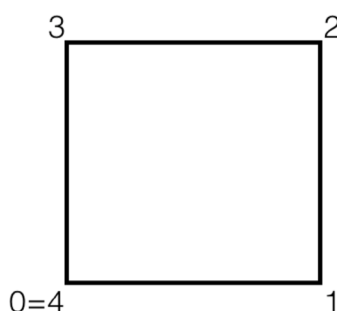
početnosť vzhľadom na celkový počet polygónov. Absolútne najpočetnejšiu skupinu teda tvorí skupina polygónov, ktorá je definovaná štyrmi bodmi.

Počet bodov v polygóne	Početnosť polygónov
3	1 414
4	18 211
5	1 648
6	844
7	360

Tab. 6.1 Tabuľka početnosti polygónov

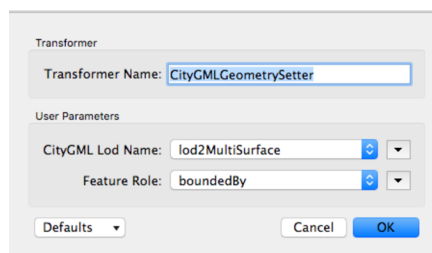
V dátach som vyzozoroval najčastejšie sa vyskytujúcu postupnosť jednotlivých bodov v polygónoch, na základe ktorej som podmienky zadefinoval (viď. obr. 6.16). Najčastejšie sa body vyskytovali v postupnosti, že nultý bod bol vždy v jednom z dolných rohov. Na základe toho som zadefinoval nasledovné podmienky:

$$Z[1] - Z[0] > 2 \text{ AND } n > 4 \text{ OR } Z[2] > Z[1] \text{ AND } n = 4$$



Obr. 6.16 Konfigurácia pre splnenie podmienky orientácie polygónov

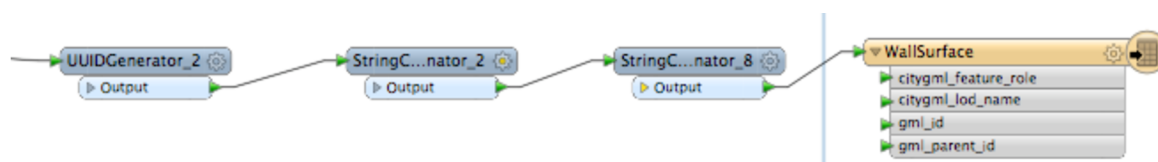
Tie polygóny, ktoré túto podmienku splnia, postupujú ďalej do záverečnej fázy celého procesu spracovania. Naopak tie, ktoré túto podmienku nespĺnia musia prejsť nástrojom ***Orientor***, ktorý slúži na manipuláciu orientácie polygónov. Jedným z kľúčových nástrojov je ***CityGMLGeometrySetter***.



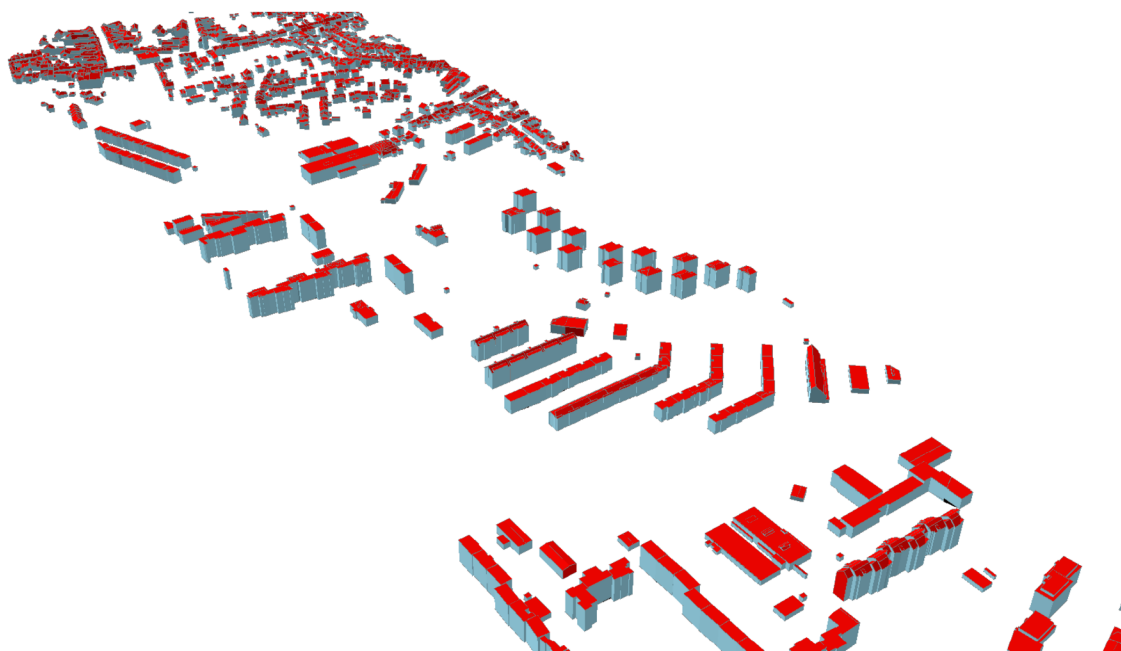
Obr. 6.17 Nástroj CityGMLGeometrySetter

Tento nástroj nám umožňuje nastavenie *CityGML-LoD* a *FeatureRole* (viď. obr. 6.17). V našom prípade sa jedná o *LoD2MultiSurface* a *Feature Role - boundedBy*.

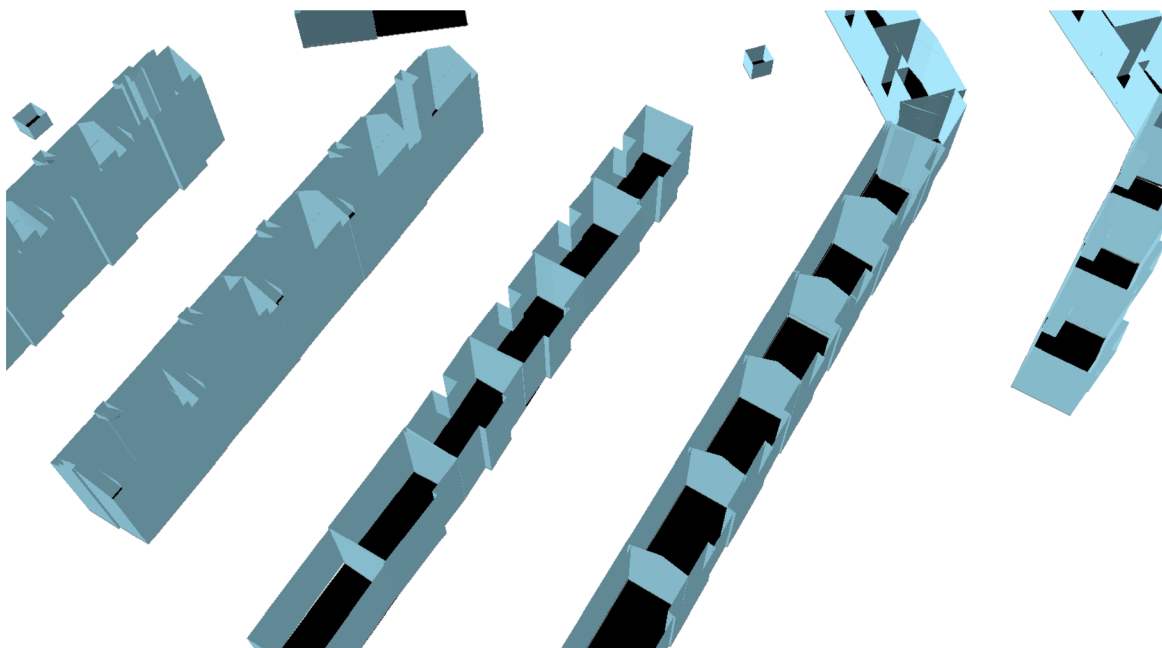
Záverečnú časť postupu tvorí dvojica - *UUIDGenerator*, ktorý zabezpečí vytvorenie unikátneho ID pre každý polygón. *StringConcatenator* – ten slúži na vytvorenie atribútu *gml_id* a vloženie reťazca „UUID_“ do tohoto identifikátora pre zachovanie správnej štruktúry názvov. Tento nástroj je použitý druhýkrát pre upravenie atribútu *gml_parent_id*, kde sa pridáva reťazec „BLDG_“. Na záver sa upravené data zapíšu pomocou *CityGML Writeru*, ktorý je na konci reťaze celého postupu (viď. obr. 6.18).



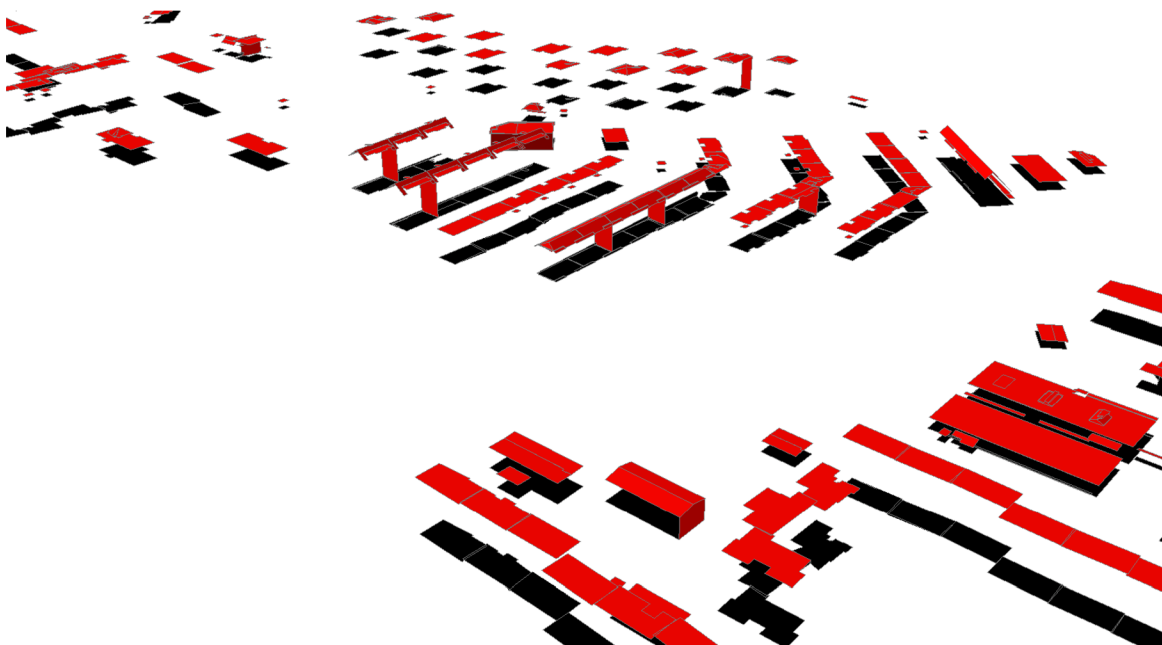
Obr. 6.18 Záverečná časť postupu spracovania a zápis pomocou *CityGML Writeru*



Obr. 6.19 Ukážka modelu – *RoofSurface* a *WallSurface*



Obr. 6.20 Ukážka modelu – GroundSurface a WallSurface



Obr. 6.21 Ukážka modelu – RoofSurface a GroundSurface

6.5 Post-processing dátového modelu

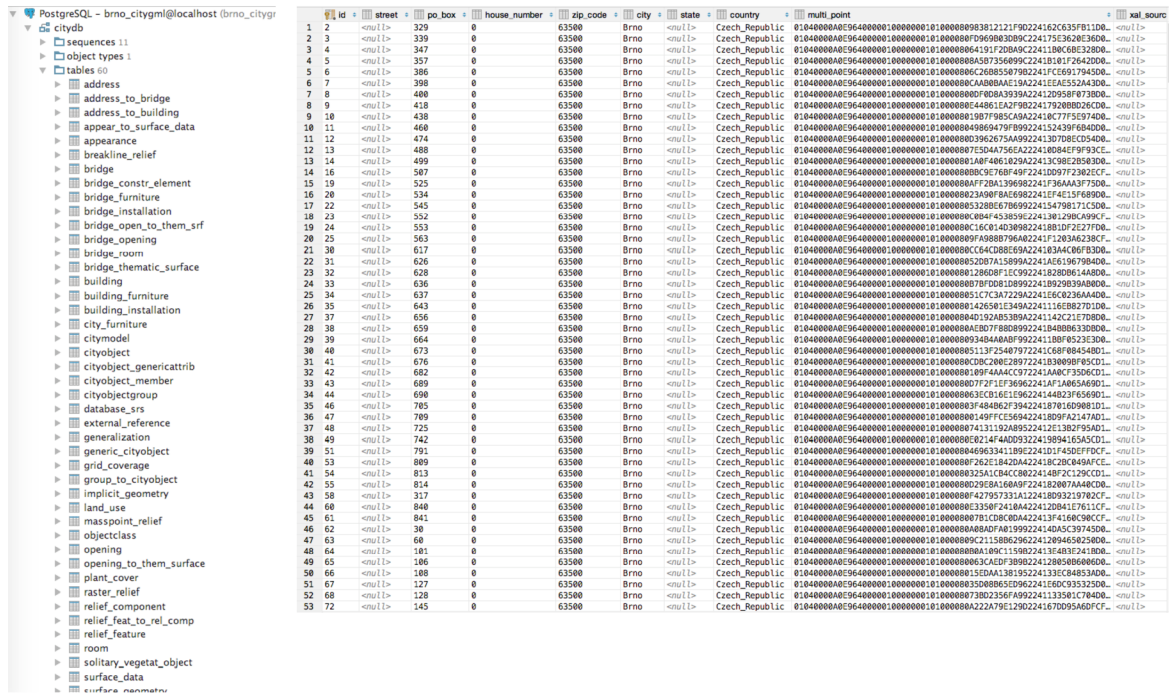
Výsledkom postupov, ktoré som podrobne popísal v predošlej podkapitole je súbor CityGML. V mojom prípade tento súbor obsahuje iba geometriu budov a preto je potrebné mu priradiť ďalšie dáta, ktoré dajú modelu určitú pridanú hodnotu.

Na manipuláciu s CityGML modelom v databázovom rozhraní som použil platformu 3DCityDB. Jedná sa o databázový model, ktorý obsahuje sémantickú štruktúru určenú pre spravovanie a zachovanie hierarchie CityGML modelov miest. Celý systém je postavený na open-source objektovo-orientovanom relačnom databázovom systéme PostgreSQL s nadstavbou PostGIS. 3DCityDB je aplikovaná, ako nová schéma na existujúcu databázu. Po aplikácii sa v existujúcej databáze vytvorí nová tabuľková štruktúra pod schémou *citydb*.

6.5.1 Databázová schéma 3DCityDB

Dáta boli do databázy importované pomocou nástroja *3DCityDB Importer/Exporter*. Tento nástroj zabezpečí, korektnosť importu dát do štruktúry schémy *citydb* a jej tabuliek (viď. obr. 6.19). Vzhľadom na to, že náš model obsahuje iba model budov, budú týmto importom pozmenené iba tabuľky *address*, *building*, *cityobject*, *surface_geometry*, *thematic_surface*. V tabuľke *address*, sú uložené adresné dáta, ktoré pochádzajú z RÚIAN (viď. obr. 6.19). V tabuľke *building* sa nachádzajú identifikátory pre jednotlivé budovy. Tieto identifikátory boli automaticky vygenerované (1 - ...) a slúžia ako *building_id* na spárovanie ostatných dát s konkrétnou budovou. Tabuľka *cityobject* obsahuje všetky inštancie triedy *Building*, resp. časti jej geometrie vrátane indentifikátorov s údajmi, ku ktorej budove patria, geometriu bounding boxu a metadát, ktoré obsahujú kedy bol prvok naposledy modifikovaný, kto ho modifikoval, aký bol dôvod modifikácie. V tabuľke *surface_geometry* sa nachádza uložená geometria (resp. jednotlivé polygóny), ku ktorým sú zapísané atribúty, ako *gml_id*, teda identifikátor prvku, *gml_parent_id* identifikátor rodičovského prvku (teda ku ktorej budove sa polygón vzťahuje) a samotnú geometriu. Tabuľka *thematic_surface* slúži na vyjadrenie sémantického typu danej geometrie, teda ku konkrétnej časti geometrie (polygónu) priraduje istý význam (*RoofSurface*, *WallSurface*, *GroundSurface*,...).

Okrem spomenutých tabuliek sa v databáze nachádza množstvo tabuliek, ktoré slúžia na reprezentáciu ostatných prvkov modelov miest. V našom prípade však využité neboli, pretože náš model zatiaľ obsahuje iba budovy.



Obr. 6.19 Vľavo – databázová schéma *citydb*. Vpravo – Tabuľka *address*, v ktorej sa nachádzajú adresy jednotlivých budov.

6.5.2 Štruktúra dát energetických spotrieb

Jednou z úloh mojej práce je obohatiť model o hodnoty energetických spotrieb. Tieto potreby sú zbierané zo sensorovej siete, ktorá sa nachádza v konkrétnych budovách v mestskej časti mesta Brna – Nový Lískovec. Zber týchto spotrieb prebieha v pravidelných časových intervaloch. K dátam sú známe atribúty – čas, budova, hodnota spotreby ústredného kúrenia, hodnota spotreby teplej vody. Tieto dáta sú vizualizované na obrázkoch č. 6.33, 6.34, 6.35. Na obrázkoch sú farebne odlišené iba tie budovy v ktorých sa nachádzajú senzory.

Vzhľadom na to, že tieto dáta boli spravované v neefektívnej a strojovo neúčitateľnej podobe, musel som navrhnúť tabuľkovú štruktúru, do ktorej sa vložili existujúce dáta a bude naďalej slúžiť pre ukládanie dát a ich efektívne využitie a správu v budúcnosti.

Dáta som uložil ako štruktúru troch navzájom previazaných tabuliek – *measure*, *quantity*, *sensor*. Tabuľka *quantity* (viď. obr. 6.20) slúži na celkovú evidenciu meraných veličín v sensorovej sieti. Nachádza sa tam aj informácia o jednotkách merania a o hodnotách, aké môže daná jednotka nadobúdať. V našom prípade sú oboje merané veličiny merané v jednotke *gigajoule*, preto má táto tabuľka iba jeden záznam. Tabuľka

sensor (vid'. obr. 6.21) eviduje všetky senzory, ktoré sú v senzorovej sieti. Obsahuje údaje o senzoroach, napr. *sensor_type* (údaje o meranej veličine), *place* (bližšia špecifikácia miesta, kde sa senzor nachádza - miestnosť), *quantity_id* (naviazanie na tabuľku veličín - quantity), *building_id* (naviazanie na tabuľku adries), *description* (bližšia špecifikácia senzora). V našom prípade bude mať táto tabuľka počet záznamov rovný dvojnásobku počtu budov, pretože v každej budove sa nachádzajú práve dva senzory. Tabuľka *measure* zabezpečuje evidenciu meraných hodnôt. Obsahuje polia *sensor_id* (naviazanie na senzor, ktorý danú hodnotu odmeral), *value* (hodnota merania), *time* (čas merania).

quantity_id	unit	unit_min	unit_max	quantity_name
1	GJ	0	<null>	heat

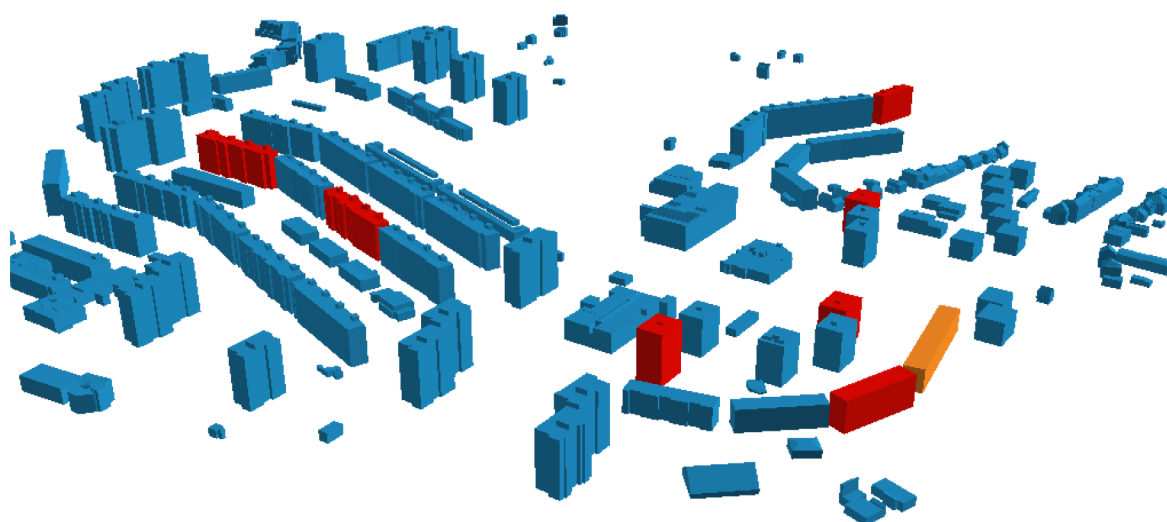
Obr. 6.20 Tabuľka *quantity*

sensor_id	sensor_type	place	quantity_id	building_id	description
1	central_heating_consumption	<null>	1	22799	<null>
2	hot_water_consumption	<null>	1	22799	<null>
3	central_heating_consumption	<null>	1	22867	<null>
4	hot_water_consumption	<null>	1	22867	<null>
5	central_heating_consumption	<null>	1	17113	<null>
6	hot_water_consumption	<null>	1	17113	<null>
7	central_heating_consumption	<null>	1	22564	<null>
8	hot_water_consumption	<null>	1	22564	<null>
9	central_heating_consumption	<null>	1	22955	<null>
10	hot_water_consumption	<null>	1	22955	<null>
11	central_heating_consumption	<null>	1	18343	<null>
12	hot_water_consumption	<null>	1	18343	<null>
13	central_heating_consumption	<null>	1	22057	<null>
14	hot_water_consumption	<null>	1	22057	<null>
15	central_heating_consumption	<null>	1	22491	<null>
16	hot_water_consumption	<null>	1	22491	<null>
17	central_heating_consumption	<null>	1	19520	<null>
18	hot_water_consumption	<null>	1	19520	<null>

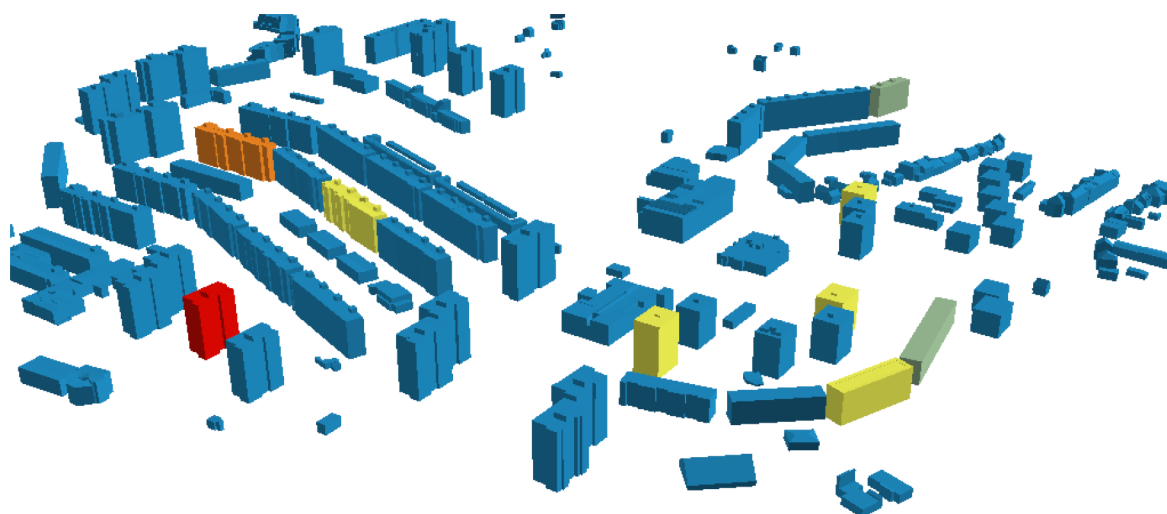
Obr. 6.21 Tabuľka *sensor*

id	sensor_id	value	time (yyyy-MM-dd HH:mm:ss.ffffff)	inserted (yyyy-MM-dd HH:mm:ss.ffffff)
1	2	55.9	2008-01-01 00:00:00.000000	<null>
2	1	55.9	2008-01-01 00:00:00.000000	<null>
3	2	54.1	2008-02-01 00:00:00.000000	<null>
4	1	54.1	2008-02-01 00:00:00.000000	<null>
5	2	38.9	2008-03-01 00:00:00.000000	<null>
6	1	38.9	2008-03-01 00:00:00.000000	<null>
7	2	16.6	2008-04-01 00:00:00.000000	<null>
8	1	16.6	2008-04-01 00:00:00.000000	<null>
9	2	2.6	2008-05-01 00:00:00.000000	<null>
10	1	2.6	2008-05-01 00:00:00.000000	<null>
11	2	0	2008-06-01 00:00:00.000000	<null>
12	1	0	2008-06-01 00:00:00.000000	<null>
13	2	0	2008-07-01 00:00:00.000000	<null>
14	1	0	2008-07-01 00:00:00.000000	<null>
15	2	0	2008-08-01 00:00:00.000000	<null>
16	1	0	2008-08-01 00:00:00.000000	<null>
17	2	10.7	2008-09-01 00:00:00.000000	<null>
18	1	10.7	2008-09-01 00:00:00.000000	<null>
19	2	24.6	2008-10-01 00:00:00.000000	<null>
20	1	24.6	2008-10-01 00:00:00.000000	<null>
21	2	38	2008-11-01 00:00:00.000000	<null>
22	1	38	2008-11-01 00:00:00.000000	<null>
23	2	53.6	2008-12-01 00:00:00.000000	<null>
24	1	53.6	2008-12-01 00:00:00.000000	<null>
25	2	53	2007-01-01 00:00:00.000000	<null>
26	1	53	2007-01-01 00:00:00.000000	<null>
27	2	44.5	2007-02-01 00:00:00.000000	<null>
28	1	44.5	2007-02-01 00:00:00.000000	<null>
29	2	37	2007-03-01 00:00:00.000000	<null>
30	1	37	2007-03-01 00:00:00.000000	<null>
31	2	70.2	2005-01-01 00:00:00.000000	<null>
32	1	70.2	2005-01-01 00:00:00.000000	<null>
33	4	0	2009-06-01 00:00:00.000000	<null>
34	3	0	2009-06-01 00:00:00.000000	<null>
35	4	0	2009-07-01 00:00:00.000000	<null>
36	3	0	2009-07-01 00:00:00.000000	<null>
37	4	0	2009-08-01 00:00:00.000000	<null>
38	3	0	2009-08-01 00:00:00.000000	<null>
39	4	0	2009-09-01 00:00:00.000000	<null>
40	3	0	2009-09-01 00:00:00.000000	<null>

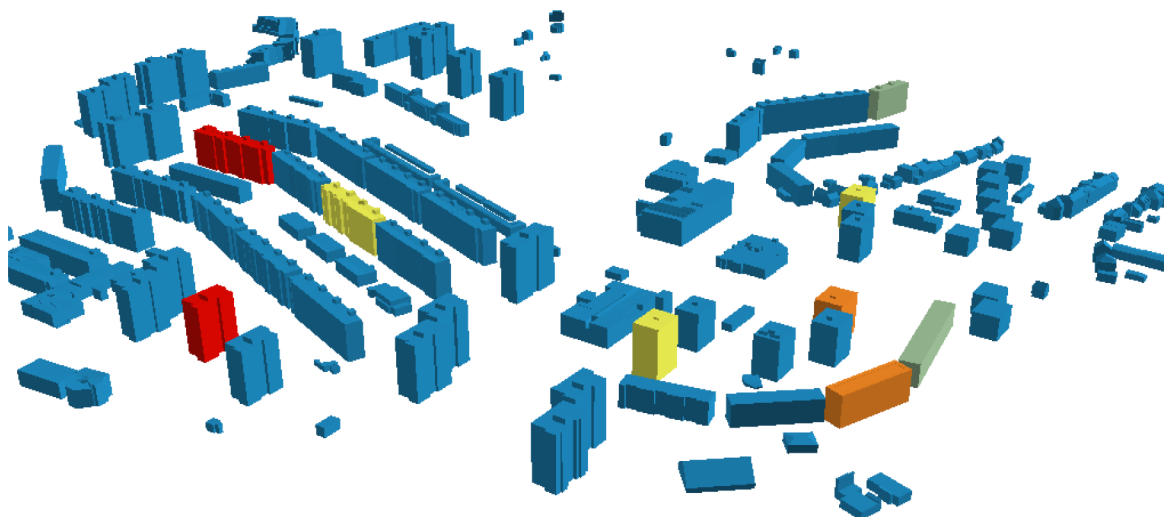
Obr. 6.22 Tabuľka *measure*



Obr.6.33 Grafické zobrazenie spotreby energie – Nový Lískovec – ústredné kúrenie (rok 2001- pred zateplením)



Obr.6.34 Grafické zobrazenie spotreby energie- Nový Lískovec – ústredné kúrenie (rok 2007- po zateplení)



Obr.6.35 Grafické zobrazenie spotreby energie- Nový Lískovec – ústredné kúrenie (rok 2013- po zateplení)

6.6 Vývoj a využitie v budúcnosti

Vízia tejto práce siaha aj do budúcnosti, a to predovšetkým využitím modelu v daných mestských častiach (predovšetkým mestskej časti Nový Lískovec, odkiaľ pochádzajú dáta energetických potrieb). Tento model môže slúžiť mestským častiam ako platforma na výmenu priestorových dát spojených s budovami a inými objektami.

Ďalšou dôležitou časťou pokračovania tejto práce je aj vývoj webovej scény, ktorá by umožnila používateľovi prehliadanie modelu vo webovom prehliadači, možnosti vkladania dát, atď. Pre dokončenie tejto úlohy je však potrebný nástroj na export CityGML modelu priamo z databázy do formátu glTF. Tento nástroj je však stále vo vývoji.

7 ZÁVER

Hlavným cieľom mojej práce bolo vytvoriť koncept 3D modelu mesta. Išlo predovšetkým o vytvorenie vlastnej metodiky procesu tvorby, nie o kvantitu spracovaného územia. V rámci tejto práce som popísal postup tvorby mestského modelu od zberu dát až po vytvorenie dátábázovo-orientovaného modelu, ktorý poskytuje možnosť ďalšieho vývoja a rozšírenia.

Dnes ľudstvo žije v dobe, kedy sa informačné technológie stávajú súčasťou každodenného života a práve preto je výhodou vedieť tieto informácie uchopiť a pracovať s nimi. Práve preto som si vybral formát CityGML, ktorý na rozdiel od ostatných štandardov uchováva obsiahlu dátovú štruktúru miest, ich hierarchiu, topológiu a sémantické informácie. Pri použití tohto formátu je možné pristupovať k mestským dátam ako k celku a vytvoriť medzi nimi synergiu, ktorá môže byť obrovským benefitom pre mestské štruktúry, obyvateľov, firmy a v neposlednom rade pre samotné mesto a jeho rozvoj.

Takéto využitie mestských dát by mohlo viesť k veľmi efektívnemu hospodáreniu s financiami, nehnuteľnosťami, životným prostredím a následne k vytvoreniu fenoménu tzv. Smart City.

Napriek tomu, že je tento formát voľne dostupný už takmer 10 rokov, podarilo sa mu zatiaľ pretaviť iba do infraštruktúr väčších miest. Fakt, že pre maximálne využitie potenciálu takéhoto nástroja je nutné, aby mesto disponovalo istým množstvom informácií a vôľou robiť veci „smart“ potvrdzuje, že ostáva krok nie len do vývoja nových technológií a postupov, ale ostáva oveľa dlhšia cesta k zmene paradigmy ľudského myslenia pre spolupodielanie sa na myšlienke spoločného blahobytu vo svojich príbytkoch a okolí.

ZOZNAM LITERATÚRY

- [1] Brno v kostce. *GOtoBRNO* [online]. Brno: Turistické informační centrum města Brna, 2016 [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://www.gotobrno.cz/brno-v-kostce/t502>
- [2] Lidar UK: How does LiDAR work? *Lidar UK: How does LiDAR work?* [online]. London, 2016 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://www.lidar-uk.com/how-lidar-works/>
- [3] ArcGIS for Desktop: What is a LAS Dataset? *ArcGIS for Desktop: What is a LAS Dataset?* [online]. 380 New York Street, Redlands, CA 92373: ESRI. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/las-dataset/what-is-a-las-dataset-htm>
- [4] MATTHEWS, N. A. *Aerial and Close-Range Photogrammetric Technology: Providing Resource Documentation, Interpretation, and Preservation.: Technical Note 428* [online]. Bureau of Land Management, National Operations Center, Denver, Colorado: U.S. Department of the Interior [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://www.blm.gov/nstc/library/pdf/TN428.pdf>
- [4] LOIDOLD, M. Three-dimensional gis. In: *Encyclopedia of geographic information science (pp. 471-474)* [online]. Thousand Oaks, CA: SAGE Publications Ltd, 2008 [cit. 2016-05-13].
- [5] SONDHEIM, M., K. GARDELS a K. BUEHLER. *Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications: 24. GIS Interoperability*. 2. Wiley, 2005. ISBN 978-0-471-73545-8.
- [6] *Open Geospatial Consortium* [online]. 2016 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://www.opengeospatial.org/>
- [7] ESRI Shapefile Technical Description: An ESRI White Paper. *ESRI Shapefile Technical Description: An ESRI White Paper* [online]. 380 New York Street, Redlands, CA, 1998 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <https://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/shapefile.pdf>
- [8] ArcGIS 9.2 Desktop Help: Shapefile file extensions. *ArcGIS 9.2 Desktop Help: Shapefile file extensions* [online]. ESRI, 2008 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=Shapefile_file_extensions

- [9] Google Developers: Keyhole Markup Language. *Google Developers: Keyhole Markup Language* [online]. Google, 2016 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <https://developers.google.com/kml/documentation/>
- [10] Open Geospatial Consortium: OGC KML 2.3. *Open Geospatial Consortium: OGC KML 2.3* [online]. 35 Main Street, Suite 5, Wayland, MA, 01778, USA: Open Geospatial Consortium, 2015 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://docs.opengeospatial.org/is/12-007r2/12-007r2.html>
- [11] Open Geospatial Consortium. *OpenGIS Geography Markup Language (GML) : Encoding Standard*[online]. 3.2.1. Wayland, USA : Open Geospatial Consortium, Inc., 27.8.2007 [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://www.opengeospatial.org/standards/gml>
- [12] Open Geospatial Consortium. *OpenGIS Geography Markup Language (GML) : Encoding Standard*[online]: Open Geospatial Consortium, Inc.,[cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://www.ogcnetwork.net/gml>
- [13] BUTLER, Howard, Martin DALY, Allan DOYLE, Sean GILLIES, Tim SCHaub a Christopher SCHMIDT. The GeoJSON Format Specification. In: *The GeoJSON Format Specification* [online]. 2008 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://geojson.org/geojson-spec.html>
- [14] Školení Open Source GIS: Vektorové formáty. *Školení Open Source GIS: Vektorové formáty* [online]. GIS Mentors [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://training.gismentors.eu/open-source-gis/formaty/vektor.html>
- [16] Web3D Consortium: The Virtual Reality Modeling Language. *Virtual Reality Modeling Language* [online]. 2002 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://www.web3d.org/documents/specifications/14772-1/V2.1/index.html>
- [17] Web3D Consortium: GeoVRML 1.1 Specification. *Web3D Consortium: GeoVRML 1.1 Specification* [online]. 2002 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://www.ai.sri.com/geovrml/1.1/doc/introduction.html>
- [18] Khronos Group: Collada. *Khronos Group: Collada* [online]. Beverton, USA [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <https://www.khronos.org/collada/>
- [19] Khronos Group: glTF - Efficient, Interoperable Transmission of 3D Scenes and Models. *Khronos Group: glTF - Efficient, Interoperable Transmission of 3D Scenes and Models* [online]. Beverton, USA [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <https://www.khronos.org/gltf>

- [20] GitHub: KhronosGroup/glTF. *GitHub: KhronosGroup/glTF* [online]. GitHub, 2016 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <https://github.com/KhronosGroup/glTF/blob/master/specification/README.md#motivation>
- [21] GitHub: Cesium Language (CZML) Guide. *GitHub: Cesium Language (CZML) Guide* [online]. GitHub, 2013 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <https://github.com/AnalyticalGraphicsInc/cesium/wiki/CZML-Guide>
- [22] SHIODE, Narushige. 3D urban models: Recent developments in the digital modelling of urban environments in three-dimensions. *GeoJournal* [online]. London: Springer Netherlands, 2000, **3**(Volume 52), 263-269 [cit. 2016-05-13]. DOI: 10.1023/A:1014276309416. ISSN 0343-2521. Dostupné z: <http://link.springer.com/article/10.1023%2FA%3A1014276309416>
- [23] BILJECKI, Filip, Jantien STOTER, Hugo LEDOUX, Sisi ZLATANOVA a A. ÇÖLTEKIN. Applications of 3D City Models: State of the Art Review. *International journal of Geo-Information* [online]. 3D geoinformation, Delft University of Technology, 2628 BL Delft, The Netherlands, 2015, (4) [cit. 2016-05-13]. DOI: 10.3390/ijgi4042842. ISSN 2842-2889. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2220-9964/4/4/2842>
- [24] Open Geospatial Consortium: Berlin 3D Portal provides CityGML data for 550,000 buildings. *Open Geospatial Consortium: Berlin 3D Portal provides CityGML data for 550,000 buildings* [online]. 2015 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://www.opengeospatial.org/blog/2196>
- [25] The Bartlett Centre for Advanced Spatial Analysis: Virtual London: Online Participation. *The Bartlett Centre for Advanced Spatial Analysis: Virtual London: Online Participation* [online]. London, 2009 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <https://www.bartlett.ucl.ac.uk/casa/research/past-projects/virtual-london-online-participation>
- [26] Technische Universität München: 3D City Model of New York City. *Technische Universität München: 3D City Model of New York City* [online]. Muünich, Germany: Technische Universität München, 2015 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <https://www.gis.bgu.tum.de/en/projects/new-york-city-3d/>

- [27] Geoportál Praha: 3D model Prahy. *Geoportál Praha: 3D model Prahy* [online]. Praha, 2015 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://www.geoportalpraha.cz/cs/clanek/269/3d-model-prahy#.VzWu6BNE5Uc>
- [28] Open Geospatial Consortium. *OpenGIS City Geography Markup Language (CityGML) : Encoding Standard* [online]. 2.0.0. Wayland, USA : Open Geospatial Consortium, Inc., 04.04.2012 [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://www.opengeospatial.org/standards/citygml>
- [29] GROÖGER, Gerhard a Lutz PLÜMER. : CityGML – Interoperable semantic 3D city models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing: CityGML – Interoperable semantic 3D city models* [online]. 2012(71), 12-33 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/257346534_CityGML_-_Interoperable_semantic_3D_city_models
- [30] CityGML Wiki: CityGML Tunnel ADE. *CityGML Wiki: CityGML Tunnel ADE* [online]. 2010 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: http://www.citygmlwiki.org/index.php?title=CityGML_Tunnel_ADE
- [31] NAGEL, C. a KOLBE, T. H. : CityGML: International Standard for 3D City Models. 2009. Dostupné z WWW: http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=36848.
- [32] SCHULTE, C. a COORS, V. : Development of a CityGML ADE for dynamic 3D flood information. Joint ISCRAM-CHINA and GI4DM Conference od Information Systems for Crisis Management 2008. Dostupné z WWW: <http://www.appliedgeoinformatics.org/index.php/agse/conference2009/paper/view/File/6/26>.
- [33] LinkedIn SlideShare: CityGML Extension fro BIM/IFC Information. *LinkedIn SlideShare: CityGML Extension fro BIM/IFC Information* [online]. 2010 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://www.slideshare.net/berlotti/citygml-extension-for-bim-and-ifc>
- [34] BAHU, Jean - Marie a Romain NOUVEL. *Development of the CityGML ADE Energy* [online]. In: . Lisbon, 2015 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: http://geospatialworldforum.org/speaker/SpeakersImages/Romain_Nouvel.pdf
- [35] INSPIRE - Infrastructure for Spatial Information in the European Community: About INSPIRE. *INSPIRE - Infrastructure for Spatial Information in the European*

- Community: About INSPIRE* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://inspire.ec.europa.eu/index.cfm/pageid/48>
- [36] INSPIRE – Infrastructure for Spatial Information in the European Community: Data Specifications. *INSPIRE – Infrastructure for Spatial Information in the European Community: Data Specifications* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://inspire.ec.europa.eu/index.cfm/pageid/2>
- [37] INSPIRE - Infrastructure for Spatial Information in Europe: Data Specification on Buildings – Technical Guidelines. *INSPIRE Infrastructure for Spatial Information in Europe: Data Specification on Buildings – Technical Guidelines* [online]. European Commission Joint Research Centre, 2013 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: http://inspire.ec.europa.eu/documents/Data_Specifications/INSPIRE_DataSpecification_BU_v3.0.pdf
- [38] ČÚZK - Český úřad zeměměřický a katastrální: Atributy stavebního objektu. *ČÚZK - Český úřad zeměměřický a katastrální: Atributy stavebního objektu* [online]. Praha, 2016 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://www.cuzk.cz/Uvod/Produkty-a-sluzby/RUIAN/2-Poskytovani-udaju-RUIAN-ISUI-VDP/Ciselniky-ISUI/Atributy-stavebniho-objektu.aspx>

ZOZNAM SKRATIEK

ADE	Application Domain Extension
AdMas	Advanced Materials and Structures
BIM	Building Information System
B-Rep	Boundary Representation
CAD	Computer-aided Design
CASA	Centre for Advanced Spatial Analyses
CityGML	City Geography Markup Language
COLLADA	COLLABorative Design Activity
ČUZK	Český úřad zeměměřický a katastrální
CZML	Cesium Language
DPZ	Diaľkový prieskum Zeme
DGN	DesiGN
DWG	DraWinG
FME	Feature Manipulation Engine
GIS	Geographic Information System
glTF	GL Transmission Format
GML	Geography Markup Language
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GPS	Global Positioning System
JSON	JavaScript Object Notation
KML	Keyhole Markup Language
LoD	Level of Details
LiDAR	Light Detection and Ranging
NYC	New York City
OGC	Open Geospatial Consortium
OpenGL	Open Graphics Library
RGB	Red-Green-Blue
RUIAN	Register územní identifikace, adres a nemovitostí
TIC	Terrain Intersection Curve
TIN	Triangular Irregular Network
UML	Unified Modelling Language

VRML	Virtual Reality Modelling Language
XML	eXtensible Markup Language
XSD	XML Schema Definition

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 6.1 Tabuľka početnosti polygónov	57
--	-----------

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1.1 Zobrazenie mesta Brna na mape (Google Maps)	13
Obr. 2.1 Grafické zobrazenie LiDARu [3]	14
Obr. 2.2 Schematické znázornenie merania v čase [3]	15
Obr. 2.3 Bodové mračno – klasifikácia podľa počtu návratov	15
Obr. 2.4 Bodové mračno – klasifikácia podľa intenzity	16
Obr. 3.1 Špecifikácia bodu vo formáte KML na podklade Google Earth	20
Obr. 3.2 Špecifikácia bodu vo formáte GML	20
Obr. 3.3 Definícia bodu s atribútmi vo formáte GeoJSON.....	21
Obr. 3.4 Špecifikácia objektu (valca) vo formáte VRML	22
Obr. 3.5 Obsahová štruktúra formátu glTF.....	23
Obr. 3.6 Model mesta Berlín zobrazený pomocou webovej platformy CesiumJS a formátu glTF (Zdroj: virtualcitySYSTEMS).....	23
Obr. 3.7 Ukážka zápisu objektu vo formáte CZML	24
Obr. 4.1 Ukážka panoramatickej snímky z portálu Google Street View (miesto: Brno – Líšeň) (Zdroj: Google StreetView).....	25
Obr. 4.2 Ukážka vizuálnej analýzy šírenia signálu.....	28
Obr. 4.3 Grafická reprezentácia tepelných strát [23].....	29
Obr. 4.4 Odhad solárnej radiácie budovy [23].....	29
Obr. 4.5 Problém 2D reprezentácie v katastri [23]	30
Obr. 4.6 Ukážka CityGML modelu mesta Berlín.....	30
Obr. 4.7 Ukážka modelu Virtual London	31
Obr. 4.8 Ukážka modelu mesta New York City [26]	31
Obr. 4.9 Ukážka modelu hlavného mesta Prahy [27]	32
Obr. 5.1 Grafické znázornenie LoD0 modelu [23]	33

Obr. 5.2 Grafické znázornenie LoD1 modelu [23].....	34
Obr. 5.3 Grafické znázornenie LoD2 modelu [23].....	34
Obr. 5.4 Grafické znázornenie LoD3 modelu [28].....	35
Obr.5.5 Grafické znázornenie LoD4 modelu [29].....	35
Obr. 5.6 Schematické znázornenie postavenia geometrickej a sémantickej časti [28].....	36
Obr. 5.7 Príklady využitia povrchu <i>ClosureSurface</i> [28].....	37
Obr. 5.8 UML diagram CityGML geometrického modelu [28].....	38
Obr. 5.9 Geometricko-topologický model [28].....	39
Obr. 5.10 Ilustrácia triedy <i>WaterBody</i> [28].....	40
Obr. 5.11 Vizuálna reprezentácia podtried <i>TransportationComplex</i> [28].....	41
Obr. 5.12 Znázornenie cesty na jednotlivých úrovniach LoD [28].....	41
Obr. 5.13 Grafické znázornenie prvkov triedy <i>VegetationObject</i> [28].....	42
Obr. 5.14 Grafické znázornenie objektov triedy <i>CityFurniture</i> [28].....	42
Obr. 5.15 UML diagram pre <i>TunnelADE</i> [30].....	43
Obr. 5.16 Grafické znázornenie použitia <i>EnergyADE</i> na zobrazenie emisií CO2 a zobrazenie solárneho potenciálu.....	45
Obr. 6.1 Diagram postupu konverzie do formátu CityGML.....	48
Obr. 6.2 Grafické rozhranie FME Desktop (vľavo). Dialógové okno s nastavením parametru prevodu (vpravo).....	49
Obr. 6.3 Použitie transformerov (vľavo). Nastavenie parametrov transformera <i>StringConcatenator</i> (vpravo).....	49
Obr. 6.4 Grafické znázornenie označovania objektov pomocou ID.....	50
Obr. 6.5 Prostredie CityEngine (vľavo). Pravidlo pre klasifikáciu (vpravo).....	50
Obr. 6.6 Konfigurácia transformera <i>Chopper</i> pri delení polylinií na samostatné línie.....	51
Obr. 6.8 Tvorba polygónov <i>GroundSurface</i> z línií pomocou nástroja <i>Feature to Polygon</i>	52
Obr. 6.9 Grafické znázornenie jednotlivých častí procesu konverzie v prostredí FME Workbench.....	53

Obr. 6.10 Architektúra konceptu nášho modelu	53
Obr. 6.11 Proces tvorby hlavnej triedy <i>CityModel</i>	53
Obr. 6.12 Proces tvorby abstraktnej triedy <i>Building</i>	54
Obr. 6.13 Schéma prevodu geometrických častí – <i>RoofSurface</i> , <i>WallSurface</i> , <i>GroundSurface</i>	55
Obr. 6.14 Schéma prevodu stien – <i>WallSurface</i>	56
Obr. 6.15 Konfigurácia nástroja <i>Tester</i>	56
Obr. 6.16 Konfigurácia pre splnenie podmienky orientácie polygónov	57
Obr. 6.17 Nástroj <i>CityGMLGeometrySetter</i>	57
Obr. 6.18 Záverečná časť postupu spracovania a zápis pomocou <i>CityGML Writeru</i>	58
Obr. 6.19 Ukážka modelu – <i>RoofSurface</i> a <i>WallSurface</i>	58
Obr. 6.20 Ukážka modelu – <i>GroundSurface</i> a <i>WallSurface</i>	59
Obr. 6.21 Ukážka modelu – <i>RoofSurface</i> a <i>GroundSurface</i>	59
Obr. 6.19 Vľavo – databázová schéma <i>citydb</i> . Vpravo – Tabuľka <i>address</i> , v ktorej sa nachádzajú adresy jednotlivých budov.	61
Obr. 6.20 Tabuľka <i>quantity</i>	62
Obr. 6.21 Tabuľka <i>sensor</i>	62
Obr. 6.22 Tabuľka <i>measure</i>	62
Obr.6.33 Grafické zobrazenie spotreby energie – Nový Lískovec – ústredné kúrenie (rok 2001- pred zateplením)	63
Obr.6.34 Grafické zobrazenie spotreby energie- Nový Lískovec – ústredné kúrenie (rok 2007- po zateplení)	63
Obr.6.35 Grafické zobrazenie spotreby energie- Nový Lískovec – ústredné kúrenie (rok 2013- po zateplení)	64

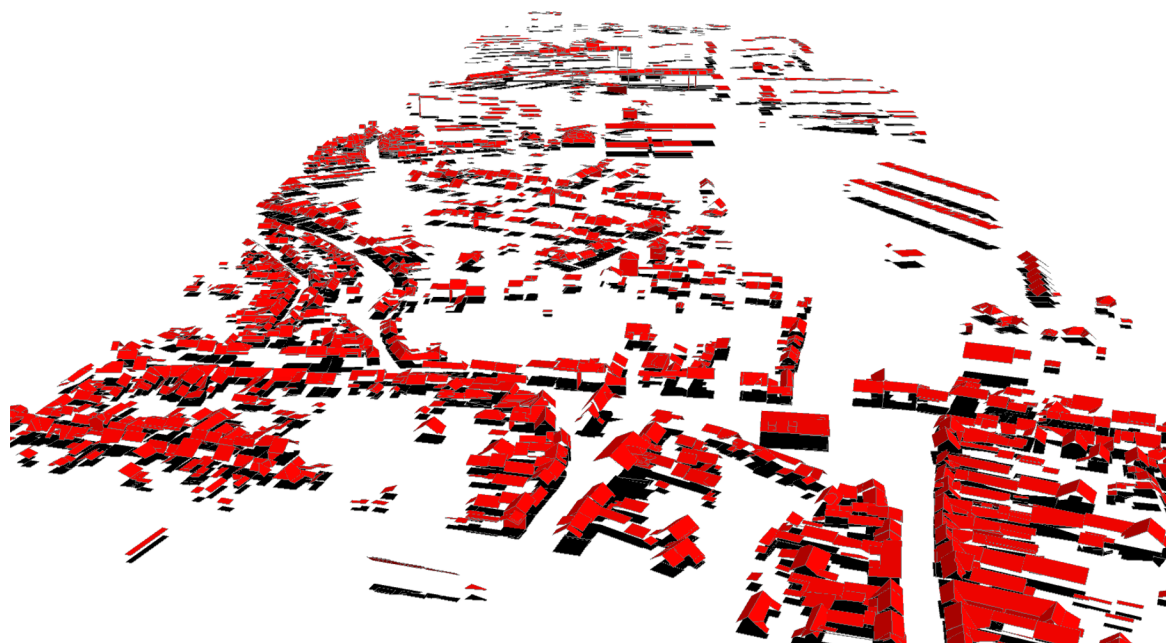
ZOZNAM PRÍLOH

Viazané prílohy

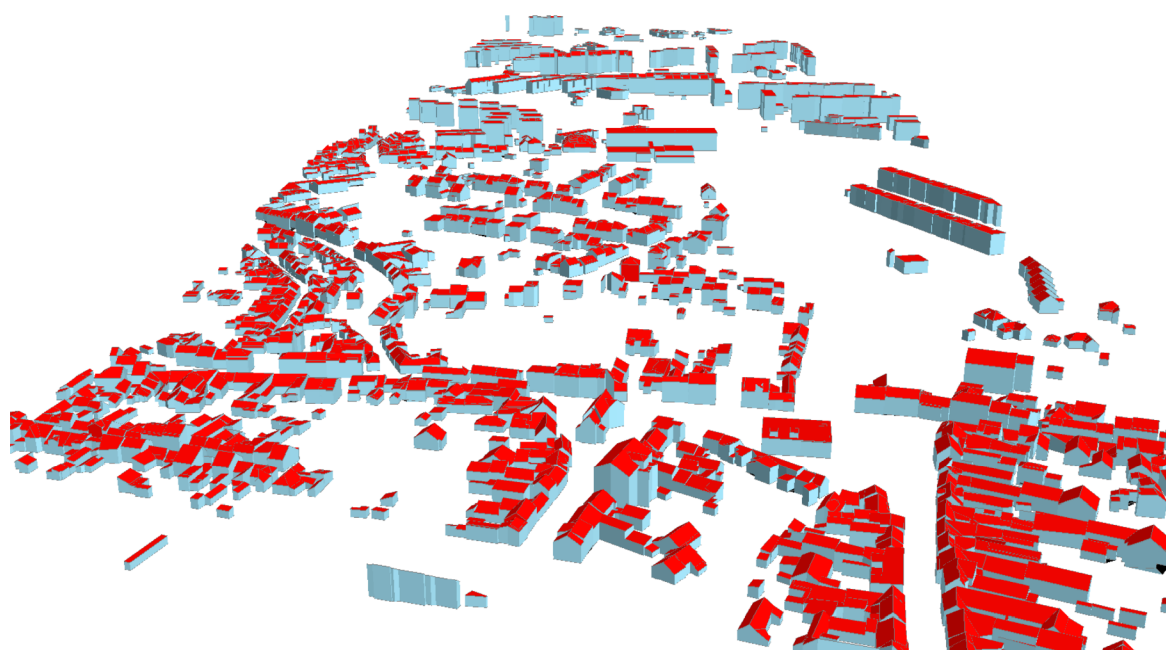
- Príloha č.1 3D model mestskej časti Líšeň
- Príloha č.2 3D model mestskej časti Nový Lískovec
- Príloha č.3 Vizualizácia spotrieb energie v mestskej časti Nový Lískovec

Elektronické prílohy

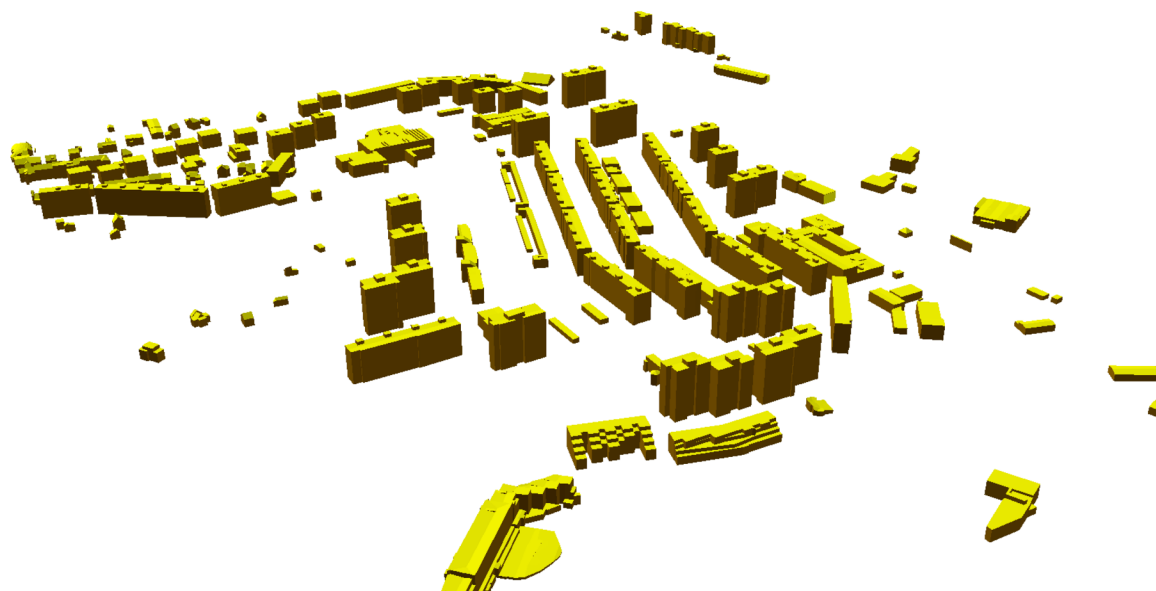
- Príloha č.1 Postup tvorby CityGML modelu mestskej časti Líšeň
(01_lisen_workflow.fmw)
- Príloha č.2 CityGML model mestskej časti Líšeň (02_lisen_CityGML.gml)
- Príloha č.3 Postup tvorby CityGML modelu mestskej časti Nový Lískovec
(03_NovyLiskovec_workflow.fmw)
- Príloha č.4 CityGML model mestskej časti Nový Lískovec
(04_NovyLiskovec_CityGML.gml)



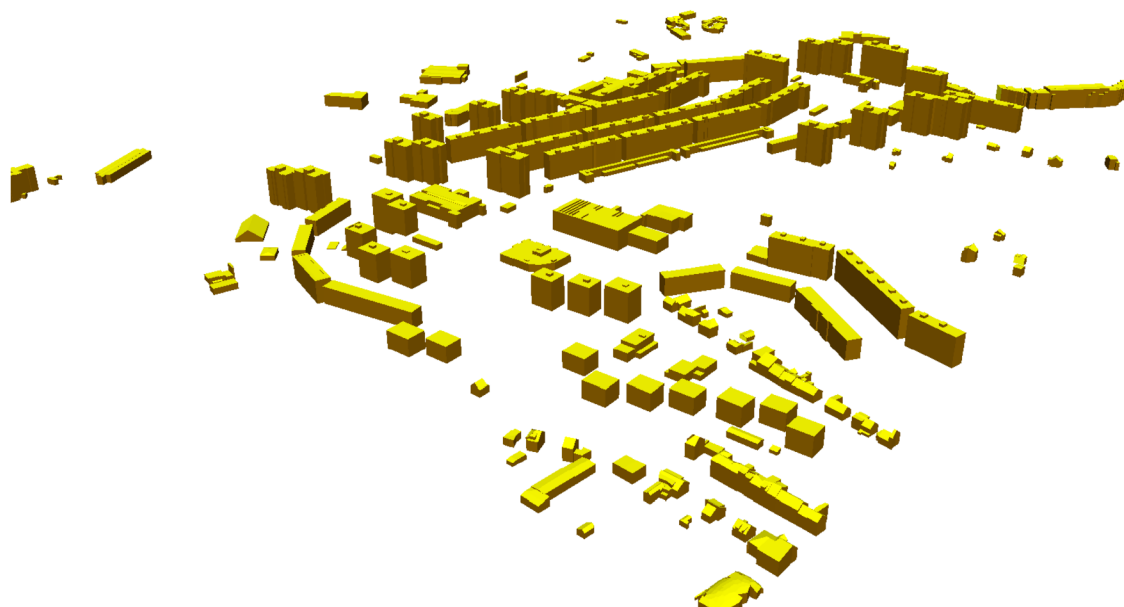
3D model mestskej časti Líšeň – triedy RoofSurface a GroundSurface



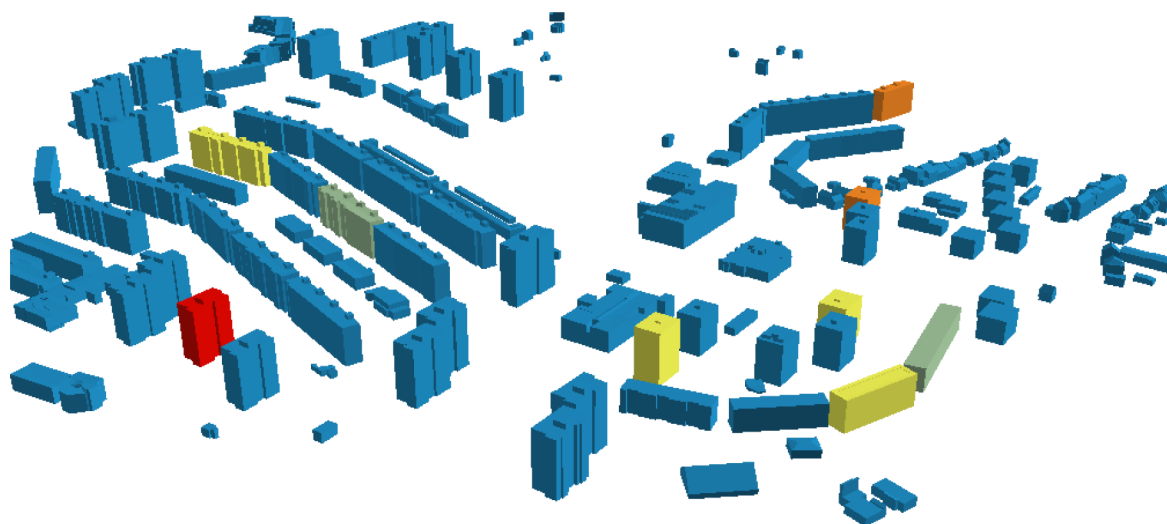
3D model mestskej časti Líšeň – triedy RoofSurface a WallSurface



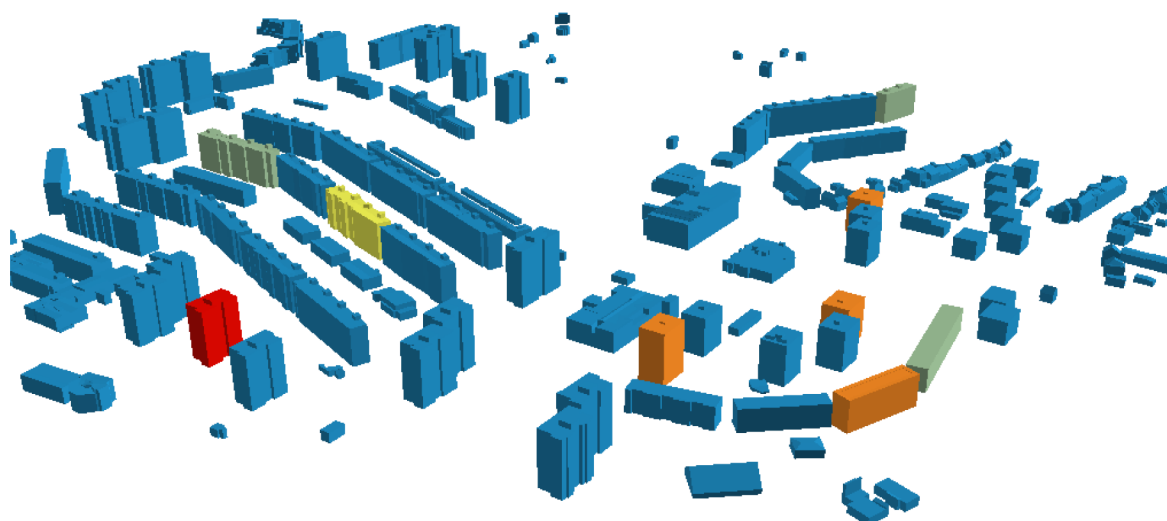
3D model mestskej časti Nový Lískovec



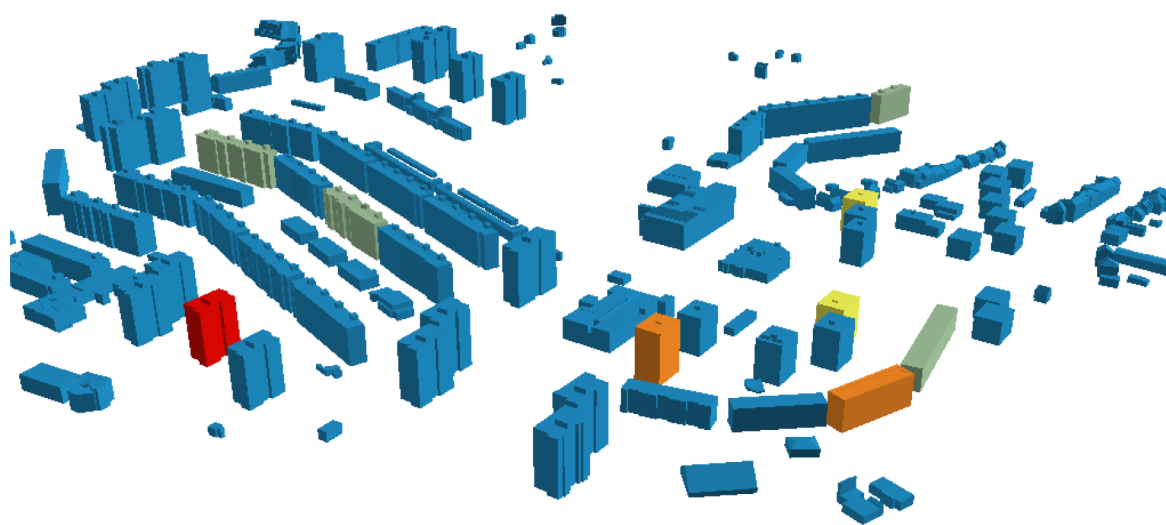
3D model mestskej časti Nový Lískovec



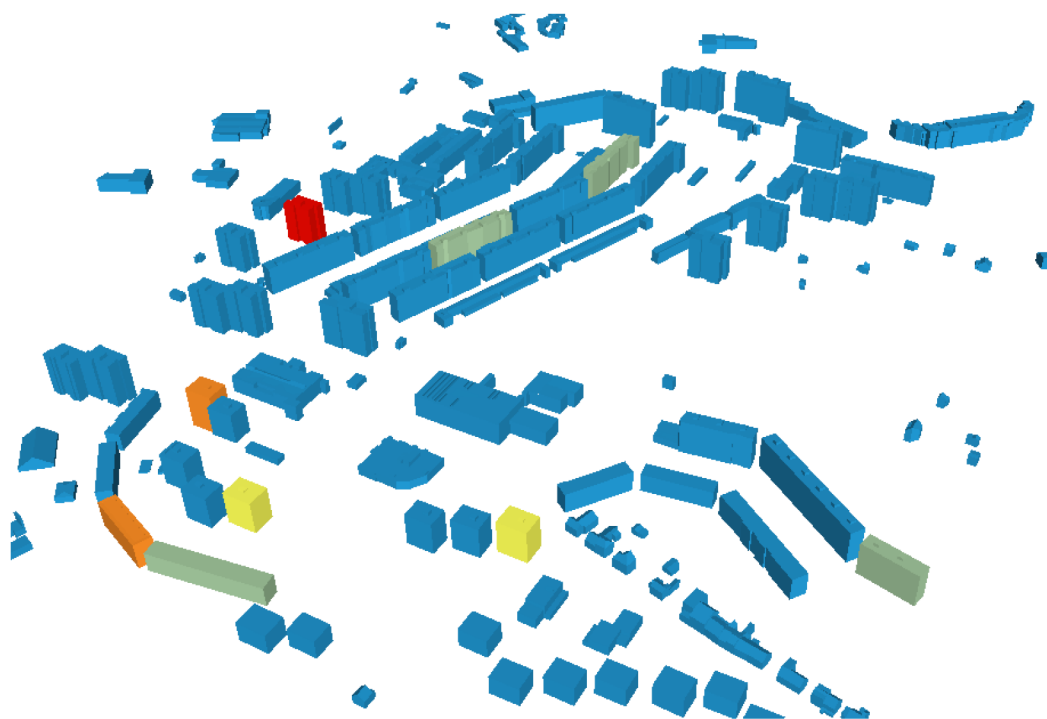
Vizualizácia spotrieb teplej vody bytových domov v mestskej časti Nový Lískovec – rok 2001



Vizualizácia spotrieb teplej vody bytových domov v mestskej časti Nový Lískovec – rok 2007



Vizualizácia spotrieb teplej vody bytových domov v mestskej časti Nový Lískovec – rok 2007



Vizualizácia spotrieb – Nový Lískovec