



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV GEODÉZIE
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF GEODESY

GIS ANALÝZY V PROSTŘEDÍ INFORMAČNÍCH MODELŮ STAVEB

GIS ANALYSIS IN BUILDING INFORMATION MODELS

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE
DISSERTATION THESIS

VĚDNÍ OBOR

3646V003 – Geodézie a kartografie

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. MARTIN ČERNÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. RNDr. LUBOMIL POSPÍŠIL, CSc.

BRNO 2013

Poděkování

Děkuji svému školiteli panu doc. RNDr. Lubomilu Pospíšilovi, CSc. za podporu a ochotné konzultace během vypracovávání disertační práce a během celého doktorského studia. Také děkuji panu profesoru Stephenovi Lockleymu z Northumbria University za inspiraci a odborné konzultace týkající se problematiky BIM. Dále bych chtěl touto cestou poděkovat mé rodině a především rodičům a mé manželce Veronice za hmotnou i morální podporu po celou dobu mého studia a vůbec dosavadního života.

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Současný stav.....	2
3	Postup a metodika řešení.....	3
4	Geografické informační systémy (GIS).....	4
4.1	Data pro GIS.....	4
4.2	Datové standardy pro GIS.....	5
4.2.1	Geography Markup Language (GML).....	5
4.2.2	City Geography Markup Language (CityGML).....	5
4.2.3	Keyhole Markup Language (KML).....	6
4.2.4	Simple Features.....	6
4.2.5	ESRI Shapefile®	6
5	Informační modelování staveb.....	7
5.1	Zdroje dat pro BIM.....	7
5.2	Standard Industrial Foundation Classes (IFC).....	8
5.3	Model View Definition (MVD).....	8
6	Porovnání standardů GIS a BIM.....	9
6.1	Geometrie.....	9
6.2	Vícenásobné geometrické reprezentace.....	9
6.3	Sémantické informace.....	9
6.4	Analytické možnosti	10
6.5	Souřadné systémy.....	11
6.6	Informační modelování.....	11
6.7	Shrnutí srovnání datových standardů.....	12
7	Úvodní studie využití analytických možností GIS.....	12
7.1	Vývoj nástroje pro extrakci dat z modelu ve formátu IFC.....	13
7.1.1	IFC-SHP Extractor.....	13
7.1.2	Transformace souřadného systému.....	13
7.1.3	Transformace výšek.....	14
7.2	Rozmístění azbestu v budovách univerzitního kampusu.....	14
7.2.1	Cíl pilotního projektu.....	15
7.2.2	Výchozí informační model budovy.....	15
7.2.3	Výsledek převodu.....	15
7.3	Převod modelu města do GIS.....	16
7.3.1	Cíl projektu.....	16
7.3.2	Výchozí model VNG.....	16
7.3.3	Výsledek převodu.....	16
7.4	Výsledek úvodní studie.....	17
8	Prostorové analýzy v prostředí BIM.....	19
8.1	Prostorové vztahy a funkce.....	19
8.2	Úroveň detailu při analýzách.....	20
8.3	Analýzy s využitím existující geometrie.....	21
8.4	Analýzy s využitím sémantické topologie objektů.....	22
8.5	Analýzy s využitím atributů s prostorovým významem.....	24
9	Závěr.....	26
10	Přínos práce pro praxi a rozvoj oboru.....	27
11	Budoucí výzkum.....	28
	Seznam zkratk.....	i
	Seznam literatury.....	ii

1 Úvod

Cílem této práce je zjistit možnosti využití geografických informačních systémů (GIS) a metod pro práci s prostorovými daty pro analýzy informačních modelů staveb (BIM). Geografické informační systémy mají dlouhou tradici, která se datuje do 60. let 20. století [11]. Jedná se o multidisciplinární obor, který se významně rozvíjí a stává se samostatnou disciplínou, která čerpá z matematiky, informatiky, geodézie, fotogrammetrie, digitálního zpracování obrazu a dalších souvisejících oborů. Předností geografických informačních systémů jsou prostorové analýzy, které mohou být zároveň kombinovány s analýzou atributových dat.

BIM vychází ze systémů pro tvorbu návrhů s podporou počítačů (CAD – Computer Aided Design). CAD se používá prakticky ve všech oblastech návrhu konstrukcí, tedy nejen ve stavebnictví, ale i ve strojírenství a v dalších oborech. Pokud budu dále v této práci používat tento termín, bude tím myšleno použití pro navrhování a projektování staveb. BIM na tento obor navazuje a rozšiřuje geometrický CAD model o bohaté sémantické informace a vztahy. Důležitým rysem BIM je, že se jedná o objektový model, kde jsou jednotlivé elementy modelu propojené vazbami. V souvislosti s BIM mluvíme téměř vždy o trojrozměrném modelu (3D), i když obecně nemusí obsahovat geometrii. Díky těmto uvedeným vlastnostem se BIM v současnosti začíná stále více uplatňovat při navrhování budov v celém procesu od počátečního architektonického návrhu, až po udržovací práce v průběhu existence stavby a případně až k její demolici.

BIM je tedy velmi silným nástrojem pro tvorbu a správu modelu budovy. V současnosti však není běžné provádět s daty tohoto informačně bohatého modelu prostorové analýzy, jaké bývají prováděny v prostředí GIS. Také není snadné tato data kombinovat s množstvím dalších informačních zdrojů, které by mohly být potenciálně užitečné při návrhu stavby. Mým cílem v této práci je tedy prozkoumat možnosti využití GIS přístupu a analýz pro modely BIM. To implikuje zabývat se i GIS s ohledem na 3D analýzy, protože, jak uvádí například Borrman [65], s rostoucím množstvím kvalitních 3D dat vzrůstá i potřeba tato data analyzovat.

V následujících kapitolách 4 a 5 uvedu podrobnější informace o GIS a BIM a uvedu nejdůležitější standardy pro oba obory. Pro GIS to budou především standardy Open Geospatial Consortium (OGC), pro BIM to bude především standard Industrial Foundation Classes (IFC) publikovaný buildingSMART Alliance (bsa). V následující kapitole provedu porovnání na základě uvedených vlastností v oblasti geometrie i popisných informací. Následně bude popsán pilotní projekt pro otestování možností interoperability na datové úrovni. Na základě výsledků pilotního projektu navrhu řešení pro některé druhy analýz s důrazem na maximální využití potenciálu informací obsažených v modelu stavby.

V rámci práce budu kombinovat přístup analytický a aplikační. V analytické části budu vycházet ze současné literatury zabývající se BIM a GIS, především zaměřené na interoperabilitu a využití dat napříč systémy. V aplikační části provedu praktickou implementaci, kterou následně vyhodnotím. Na základě analýzy výhod a nevýhod aplikovaného příkladu navrhu lepší postup pro využití analytických možností GIS v prostředí informačních modelů staveb (BIM).

2 Současný stav

Jak uvádí ve svém článku Borrman a Rank [65], pro architekty a inženýry, kteří se podílejí na návrhu stavby, jsou geometrické a prostorové vztahy a vlastnosti stavebních objektů velmi podstatné. Přesto nejsou dostupné softwarové nástroje pro takové pokročilé analýzy. Existují i případy, kdy jsou 3D modely převáděny do 2D výkresů reprezentujících jednotlivá podlaží staveb a následně analyzována v prostředí GIS. Ani servery používané pro koordinaci modelů BIM nejsou schopné interpretovat geometrické vlastnosti přímo obsažené v popisných atributech objektů. Přesto i Borrman se ve své práci [65][55][34] zabýval v souvislosti s prostorovými analýzami a dotazy pouze analýzami geometrických reprezentací objektů a jejich prostorových vztahů.

BIM a GIS se překrývají v oblasti zájmu, jíž jsou stavby a stavební objekty. Pokud však je třeba provádět s daty operace, které jsou běžné v jednom prostředí, avšak nedostupné ve druhém, je třeba řešit interoperabilitu systémů používaných pro BIM a GIS. Isikdag a Zlatanova [29] navrhli jako nejvhodnější cestu pro interoperabilitu mezi BIM a GIS vyvinutí harmonizované sémantiky, která by umožnila mapování objektů mezi systémy pro práci s daty BIM a GIS. Přestože bylo v oboru GIS vyvinuto velké množství různých datových modelů, pouze málo z nich lze označit za sémantické modely. Jistou sémantickou strukturu pro GIS nabízí CityGML [26] a datové modely INSPIRE [19], které v oblasti modelování budov vycházejí právě ze specifikace CityGML a dále ji rozvíjejí a upřesňují. Bohužel jsou tyto formáty a datové specifikace v současnosti stále málo využívané a jejich použití se nejčastěji omezuje na transfer dat z jednoho systému do druhého. V takovém případě však není zdaleka využito možného potenciálu těchto datových modelů pro analytické zpracování obsažených dat, která jsou pro kompletní převod do relačních databází příliš komplexní.

Během posledních let byly vyvinuty v podstatě dva směry zabývající se použitím GIS analýz pro modely BIM. Jedním z nich je uvedené mapování mezi objektovými daty BIM (zpravidla ve formátu IFC), druhým pak převod do jednodušší formy analogické datům podle standardu Simple Feature Access (OGC [28]). Projekt IFC for GIS (IFG) [48] byl jedním z prvních projektů zabývajících se interoperabilitou BIM a GIS. Hlavní motivací pro tento projekt bylo využití dat BIM v norské státní správě, která pro své potřeby využívá ve velké míře GIS. Ehlers a spol. [37] poukazují na objektový datový model QUASY vytvořený Bennerem a spol. v roce 2004 a dále rozšířený v roce 2005 [50]. Právě neobjektová povaha běžně používaných GIS datových formátů je jednou ze zjevných překážek pro uvedené sémantické mapování mezi systémy. Model QUASY je strukturou podobný modelu CityGML.

Jak jsem již uvedl, jednou z možných cest pro využití GIS analýz je převod dat do formátu použitelného v GIS systémech. Takovým formátem je například široce používaný formát ESRI Shapefile [30]. Příkladem může být převod realizovaný pomocí Interoperability Extension od firmy FME [49]. Jinou možností je převod dat do formátu CityGML (Ehlers, Hijazi, Zlatanova [37]). Takové převodníky jsou v současnosti vyvíjeny v komerční oblasti. Open Geospatial Consortium (OGC) úspěšně demonstrovalo integraci dat IFC a CityGML v rámci projektu OWS-4 testbed. (Umit Isikdag, Sisi Zlatanova [9]). Ve všech uvedených případech jsou konstatovány některé rozdílnosti IFC a GIS. V rámci již zmíněného projektu IFG jsou zároveň identifikovány některé nedostatky specifikace IFC 2x2.

Tyto připomínky byly v zásadě zapracovány do poslední verze specifikace IFC4. Jedná se o datovou infrastrukturu použitelnou pro georeferencování stavebních objektů. Tato stránka specifikace je až do verze 4 nedostatečná. IFC4 bylo oficiálně zveřejněno 12.3.2013. Proto není zatím podporováno softwarovými nástroji pracujícími s modely BIM (k datu 14.3.2012).

3 Postup a metodika řešení

V předchozí kapitole číslo 2 jsem shrnul současný stav interoperability mezi GIS systémy a BIM modely. Tato problematika je velmi aktuální s rostoucím množstvím aplikací BIM ve stavební praxi celosvětově. Tento růst je umocněn požadavky některých států, aby všechny veřejné stavební zakázky byly zpracovány metodami a nástroji BIM. Proto roste i množství kvalitních a podrobných dat o budovách, jejichž potenciál však není ani zdaleka využit. Jednak jsou to vazby na okolí, které je v případě měst zpravidla popsáno v existujících geografických informačních systémech a dále potom samotné prostorové vztahy uvnitř staveb a vztahy mezi nimi. V současnosti jsou snahy o interoperabilitu omezeny zpravidla pouze na výměnu dat mezi těmito systémy, ale neberou ohled na degradaci dat při tomto procesu.

V této práci jsem si stanovil několik dílčích cílů, které vyplývají z uvedeného stavu poznání a ze specifické situace v České republice, kde je BIM používán zatím zcela výjimečně. Proto je tato práce jednou z prvních akademických publikací zabývajících se BIM vůbec a měla by být zdrojem informací pro další výzkum v oblasti BIM a jeho aplikace v českém prostředí. V tomto směru poskytne práce obecné informace o BIM a GIS a jejich porovnání v oblasti standardů a přístupu k modelování. Pokud jde o problematiku využití dat z modelů BIM pro prostorové analýzy, budu se v práci zabývat nejprve samotnou tematikou GIS v kapitole 4 se zaměřením na hlavní otevřené standardy v této oblasti. Použití otevřených veřejných standardů považuji za nezbytné, pokud má být dosaženo maximální interoperability a použitelnosti výstupů. Dále se budu v kapitole 5 zabývat obecně problematikou BIM opět se zaměřením na otevřené standardy v této oblasti.

V následující kapitole 6 porovnáám GIS a BIM z několika hledisek na základě porovnání relevantních standardů. Na základě tohoto porovnání a se zřetelem na cílovou problematiku možnosti využití prostorových analýz pro BIM navrhuji možné řešení a ověřím jej na pilotním projektu, kde se budu zabývat aspekty převodu dat mezi BIM a GIS. Výsledky a závěry z pilotního projektu pro transformaci dat použiji k navržení optimálnějšího řešení se zaměřením na analýzy uvnitř samotného modelu, bez vazeb na okolní prostředí. Takové analýzy by měly umožnit architektům a projektantům lépe pochopit vztahy v jejich návrhu, případně mohou sloužit k automatickému ověření požadavků na stavbu.

V kapitole 8 se budu zabývat specifickým aspektem sémantických vazeb v modelu BIM se zaměřením na datový formát IFC, kdy některé sémantické vazby, specifikované explicitně v modelu, mohou být použity pro reprezentaci geometrických a prostorových vztahů analogických těm, které jsou v GIS tradičně určovány pomocí analýzy geometrie objektů. Tyto vztahy mají své důležité místo v modelech BIM a jejich význam je zatím podceňován. Tato práce by tak měla přispět i k větší informovanosti o efektech, které přináší BIM ve smyslu zachycení a následné analýzy těchto vztahů.

V závěru práce naznačím směr, kterým by se mohl ubírat další vývoj v této oblasti, především ve smyslu dotazovacího prostředí sloužícího architektům a projektantům k získávání potřebných informací z modelů, které vytvářejí.

4 Geografické informační systémy (GIS)

Na GIS je možné se dívat z většího množství úhlů a také zkratka GIS se používá pro různé výklady kromě uvedeného. Pro účely této práce však pod zkratkou GIS vždy rozumím geografický informační systém. GIS je v současnosti používán také jako nástroj pro digitální vytváření map, jako součást běžného života (mapové portály) a někdy je považován i za samostatnou vědní disciplínu [11]. Nejpodstatnější však je v kontextu této práce používání GIS jako analytického nástroje pro práci s prostorovými daty. Prostorová data a schopnost práce s nimi jsou také základním znakem, který odlišuje GIS od prostého informačního systému. GIS je v tomto kontextu nástrojem, který nám může pomoci získat z dat a databází informace.

4.1 Data pro GIS

Data pro GIS jsou často drahá na pořízení a pokud jde o data proměnlivá v čase, stojí udržování dat v aktuální podobě další nemalé úsilí a peníze. Nejlevnější jsou samozřejmě data, která se nemusí vytvářet. Znamená to využít existující data, pokud jsou taková k dispozici a použít je přímo, nebo z nich vytvořit data odvozená, která budou vhodná pro naši práci. Významným a informačně bohatým zdrojem 3D dat o budovách jsou nesporně informační modely budov (BIM). Pojmy a teorii týkající se BIM uvedu dále v této práci v kapitole 5.

Donedávna byla většina GIS založena na 2D objektech a informacích k nim připojených a tomu byly přizpůsobeny analytické a vizualizační nástroje a postupy [29]. Jak však uvádí Arens, Stoter a Oosterom [56] i Ellul a Haklay [59], vzrůstá zájem o modelování světa ve třech dimenzích a vzrůstá i počet aplikací, které využívají 3D data. Nejčastěji se v této souvislosti uvádějí aplikace pro 3D katastr a městské modelování. To znamená výzvu pro tvůrce analytických i vizualizačních nástrojů a SW, protože je třeba přenést existující 2D prostorové predikáty [29] do 3D a v tom případě se mnoho výpočtů stává podstatně složitějšími [34] [60].

Třetím rozměrem v GIS se rozsáhle zabývá publikace Spatial Data Modelling for 3D GIS [46] (2008). Důležitým závěrem autorů je, že běžně používaný GIS v současnosti nenabízí nástroje pro vytváření modelů s použitím složitějších modelů jako je B-REP a CSG. Odůvodňují to tím, že takové modely jsou potenciálně komplikované a mají jiný původ než data používaná v GIS. S tímto však nesouhlasím a jedním z výstupů této práce je právě návrh analýz takových modelů s využitím nejen jejich geometrické struktury. Obdobně identifikovali problémy s nasazením 3D GIS Ellul a Haklay [59]. Jako hlavní problémy zde uvádějí, že současné 3D GIS jsou zpravidla zaměřené spíše na vizualizaci než na analýzy. Podle mých znalostí však problémy identifikované v [46] a [59] přetrvávají.

Pro ukázkou implementací GIS funkcionality považuji za užitečné zmínit se o implementacích na úrovni databázových systémů, které jsou velmi často používány pro uchovávání a analýzy dat a obsahují samy o sobě mnoho nástrojů pro práci s daty i když nenabízejí pohodlné uživatelské rozhraní a grafické vizualizace. Takové systémy se často označují jako Geo-DBMS. Většina z nich využívá implementace Simple Feature Specification for SQL [29] [56]. Proto jejich podpora pro 3D data je poměrně omezená a představuje rozšíření oproti standardu [47]. Jak uvádí například Zlatanov [60] v roce 2004, většina systémů dokáže zobrazit 2D datové typy ve 3D, ale jejich analýzy jsou stále pouze 2D. To částečně platí dodnes, kdy pokud je pro analýzy použito standardních funkcí podle SFA, je výsledek určen pouze na základě průmětu objektu do roviny XY. Výjimkou je systém PostGIS, který je oproti standardu SFA rozšířen a podporuje většinu prostorových funkcí.

4.2 Datové standardy pro GIS

Současná společnost se někdy označuje za „informační společnost“ [58]. To vyjadřuje, jak jsou pro nás informace důležité, že hrají stěžejní roli ve fungování společnosti a že jsme na informacích prakticky závislí. Čím více jsou pro nás však informace a data důležité, tím více je kritická výměna dat mezi jednotlivými lidmi a systémy. Pro úspěšnou výměnu informací jsou potřeba standardy. V oblasti prostorových dat je nejvýznamnější organizace Open Geospatial Consortium (OGC), která vytváří a spravuje sadu veřejně dostupných standardů. Nejdůležitější z nich v oblasti prostorových dat jsou uvedeny v následujících podkapitolách. Poslední z následujících podkapitol bude popisovat formát ESRI Shapefile®. Ten sice není otevřeným standardem jako je tomu v případě OGC, ale jedná se o formát v oblasti GIS klasický. Firma ESRI v roce 1996 zveřejnila jeho strukturu, díky čemuž se stal na dlouhou dobu dominujícím formátem pro výměnu dat mezi různými systémy.

4.2.1 Geography Markup Language (GML)

GML je zaznamenán pomocí XML (Extensible Markup Language), jehož struktura je dána XSD (XML Schema Document) schématem a UML (Unified Modeling Language) schématem. GML je použito jako základ pro množství dalších standardů, jako je CityGML, webové služby, sensorové sítě a další. Jedná se o základní standard OGC.

GML umožňuje ukládat geometrii i topologii objektů a to i pomocí složitějších útvarů jako jsou kruhové oblouky a kružnice, spline křivky, parametrické a Beziérovky křivky, klotoida a další v oblasti elementárních 2D objektů, Solid Geometry a Shell Geometry v oblasti 3D elementárních objektů. Dále jsou definovány složené objekty, které se skládají z kolekcí elementárních geometrií. V GML je definována 2D a 3D topologie, ale také časová topologie, která vychází z geometrické topologie a umožňuje tak zachytit vývoj objektů v čase. Zvláštním typem geometrie je ještě „Coverage“, který umožňuje uložit 2,5D mřížku bodů. Pro ty je dána orientace, rozstup a další parametry nutné pro uložení a zobrazení. Pomocí GML je možné zaznamenat i zobrazení prvků. Tato část není ve standardu GML rozpracována příliš podrobně. Pro definici zobrazení se tak používá spíše KML, který popíše v podkapitole 4.2.3.

4.2.2 City Geography Markup Language (CityGML)

CityGML je určen pro ukládání, reprezentaci a výměnu virtuálních modelů měst a krajiny s cílem zachytit v modelu objekty, jejich atributy a vztahy. CityGML je aplikačním schématem pro GML. Geometrie CityGML vychází z geometrie definované GML a pouze ji v některých oblastech rozšiřuje. Formátem pro uložení modelu je XML. Definice modelu vychází ze standardů OGC, ISO 191xx, W3C Consortium, Web 3D Consortium a OASIS [26].

Model CityGML je navržen pro ukládání 3D prostorových vektorových informací a sémantických informací navázaných na tato data. Ve specifických oblastech poskytuje CityGML možnost pro rozšíření v rámci interoperability s dalšími datovými zdroji. V souvislosti se CityGML je definováno pět úrovní detailu (Level Of Detail – LOD). Tohoto rozdělení se často používá i v souvislosti s jinými standardy a při práci s daty. Rozdělení vychází z přirozené posloupnosti, v jaké přibývají podrobnosti a detaily (viz tabulka 1).

LOD0	oblast, krajina (2.5D, letecké snímky)
LOD1	město, menší region (krabicový model s plochými střechami)
LOD2	městský okrsek, projekt (struktury střech, tématicky odlišené povrchy)
LOD3	architektonický model (exteriér – struktury střech, zdí a balkonů), významné a orientační body, textury, vegetace, ...
LOD4	architektonický model interiérů (místnosti, vybavení budov, ...)

Tabulka 1: Úrovně detailu (LOD) modelu CityGML [26]

4.2.3 Keyhole Markup Language (KML)

KML je zaměřený na reprezentaci dat v prohlížeči. Tím je zpravidla virtuální 3D glóbus jako je Google Earth nebo i 2D prohlížeč zemského povrchu. Standard KML definuje data, která mají být zobrazena a způsob, jakým mají být zobrazena, včetně stylů zobrazení, stylu a obsahu HTML popisů, úhlů pohledu kamery, umístění a orientace textur objektů a obnovy KML dokumentů z lokálního nebo vzdáleného zdroje. Každý objekt v KML je definován zeměpisnou šířkou a délkou ve WGS 84 a ortometrickou výškou nad modelem geoidu EGM96. Jiný souřadný systém není povolen. Geometrie je složena z bodů, linií, řetězců a uzavřených řetězců linií a polygonů.

4.2.4 Simple Features

Tento standard se skládá ze dvou částí. První je zaměřena na obecnou architekturu, druhá na implementaci v jazyce SQL. Část standardu je zároveň schválena jako ISO 19107 a popisuje jednoduchou architekturu pro popis geometrie nezávisle na platformě. Model je proto vytvořen v UML. Základní typy geometrie jsou bod, křivka, plocha a kolekce geometrie. Každý prvek je povinně spojen s referenčním systémem, který popisuje souřadný systém, ve kterém je prvek definován. Rozšířený geometrický model pak obsahuje ještě objekty jako je MultiPoint, MultiLineString a MultiPolygon pro vyjádření odpovídajících objektů [28]. Geometrie definovaná ve standardu je omezena na 0D, 1D a 2D geometrické objekty, které existují v 2D ($[x, y]$), 3D ($[x, y, z]$ nebo $[x, y, m]$) nebo 4D prostoru ($[x, y, z, m]$).

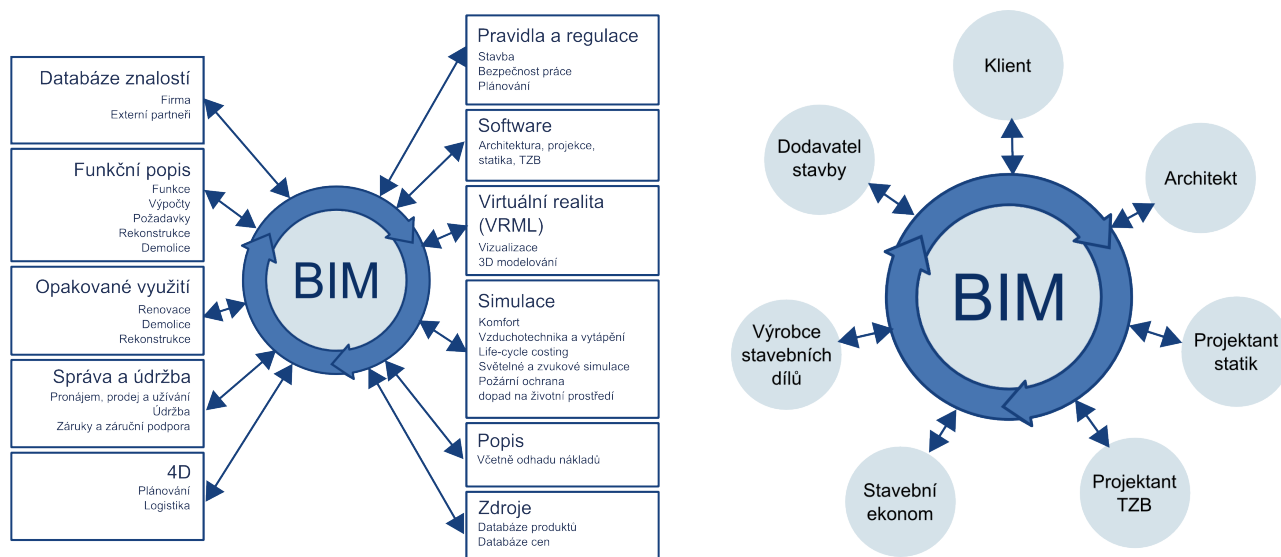
Standard definuje i funkce pro manipulaci s geometrií a základní prostorové dotazy a analýzy. Pro ukládání 3D prostorových objektů, jako je například dům, je definována geometrie PolyhedralSurface. Standard definuje topologické vztahy mezi objekty, především ve 2D prostoru s možným rozšířením na 3D vztahy, které budou předmětem upřesnění v další verzi standardu analogicky 2D vztahům.

4.2.5 ESRI Shapefile®

ESRI Shapefile® není standardem v pravém slova smyslu, jedná se o formát pro ukládání geografických dat v jednoduché formě. Jak z názvu vyplývá, jedná se o formát firmy ESRI. Ta začala formát používat ve svých produktech od počátku 90. let minulého století a v roce 1998 uvolnila dokumentaci formátu. Ve formátu SHP není možné ukládat topologii. Je možné ukládat pouze základní geometrii – body, linie a polygony a jejich varianty se souřadnicí z a se souřadnicí m . Jejich význam je stejný jako v předchozí podkapitole o Simple Features. Formát SHP je v porovnání s předchozím standardem celkově velmi podobný.

5 Informační modelování staveb

Informační modelování staveb (BIM) znamená nový, komplexnější přístup k navrhování a realizaci staveb. Pojem *Building Information Modeling* (BIM) se začal obecně používat v roce 2002 [3]. Na obrázku 1 jsou znázorněny oblasti, které se mohou podílet na vytváření a využívání modelů BIM a jednotliví účastníci procesu návrhu a užívání stavby. BIM navazuje na dnes standardní navrhování staveb s využitím počítačů známé jako CAD. Zatímco v případě CAD se jedná o jednotlivé výkresy zpracované s podporou počítačů, BIM je rozšiřuje o množství dalších informací a objektové modelování. Místo shluku čar, kterým dává smysl pouze konvence značení, mluvíme o objektech jako je stěna, strop, podlaha a všechny další objekty, které tvoří stavbu, její zařizovací předměty atd. Z toho vyplývá, že se zpravidla pohybujeme ve 3D prostoru.



Obrázek 1: Obory a činnosti, které mohou využívat BIM při spolupráci na projektu (vlevo) a okruh účastníků na návrhu stavby (vpravo) [7]

Kromě objektové geometrie BIM obsahuje, nebo lépe řečeno může obsahovat, velké, prakticky neomezené množství dalších popisných a mezioborových informací. Stává se tak komunikačním nástrojem pro výměnu informací mezi jednotlivými obory a odborníky podílejícími se na procesu navrhování stavby. V zásadě může existovat i informační model budovy, který neobsahuje žádnou geometrii, ale pouze organizační a popisné informace o stavbě.

5.1 Zdroje dat pro BIM

V ideálním případě vzniknou data přirozenou cestou tak, jak prochází model od návrhu stavby k realizaci a konečné správě. Pokud všichni účastníci tohoto procesu budou používat jeden model, do kterého budou zaznamenávat informace týkající se aktuální činnosti a odbornosti, bude na konci pro potřeby údržby k dispozici aktuální, přesný a informačně velmi bohatý model. Z toho samozřejmě vyplývá, že by měl být i nadále udržován tak, jak je používán pro údržbu budovy. Druhou možností je tvorba BIM modelu existující budovy. Potom přichází pro vytvoření geometrie v úvahu v zásadě geodetické zaměření dokumentace nebo ověření, přepracování a transformace existující dokumentace, pokud je tato k dispozici. V obou případech půjde o proces náročný na čas a lidské zdroje. V prvním případě však model vzniká v podstatě jako vedlejší efekt spolupráce odborníků.

5.2 Standard Industrial Foundation Classes (IFC)

Autorem tohoto standardu je International Association for Interoperability (IAI). V současnosti je používána verze 2x3 TC1. Zveřejněna je již i nová verze IFC4, ale software používaný pro tvorbu a zpracování modelů zatím tuto verzi nepodporuje. Standard IFC 2x3 byl vydán v únoru 2006 a je registrován jako ISO16739. Specifikace standardu je dána HTML dokumentací, schématem EXPRESS (definován v ISO10303-11) a schématem XSD. Obě uvedená schémata jsou zcela rovnocenná. Jako původní schéma pro vývoj IFC je používáno schéma EXPRESS. Schéma XSD definuje reprezentaci IFC formou XML dokumentu ifcXML a je od EXPRESS schématu odvozeno. Struktura fyzické reprezentace souboru podle schématu EXPRESS je STEP (definováno v ISO10303-21). Veškerá uvedená dokumentace je volně dostupná na webových stránkách buildingSMART [1].

Důležitou vlastností IFC je, že umožňuje zachytit všechny aspekty stavebního procesu. Veškeré objekty jsou definovány od základu. Pokud tedy chceme například definovat zeď, musí soubor IFC obsahovat definici jednotlivých materiálů, strukturu a tloušťky vrstev, definici souřadného systému, definici jednotlivých bodů, definici linií těchto bodů, definici ploch tvořených spojnicemi a definici, že se jedná o zeď. Zároveň je podstatné, že se jedná o veřejně dostupný standard. Tím je zajištěna dlouhodobá udržitelnost a použitelnost dat oproti uzavřeným systémům jednotlivých dodavatelů SW.

Schéma je rozděleno na jednotlivé části podle odborné tematiky. Základní část je popsána jako jádro schématu a obsahuje obecně používané objekty. Na jádro z jedné strany navazují definice elementárních objektů pro popis geometrie, vzhledu, jednotek, měr a vah, materiálů, omezení, základních geometrických primitiv a dalších. Z druhé strany pak navazují části pro popis procesů, celých produktů a kontroly modelu. Na tyto části navazují části specifické pro jednotlivé specializace, jako je architektura, TZB, statika, požární ochrana a další.

5.3 Model View Definition (MVD)

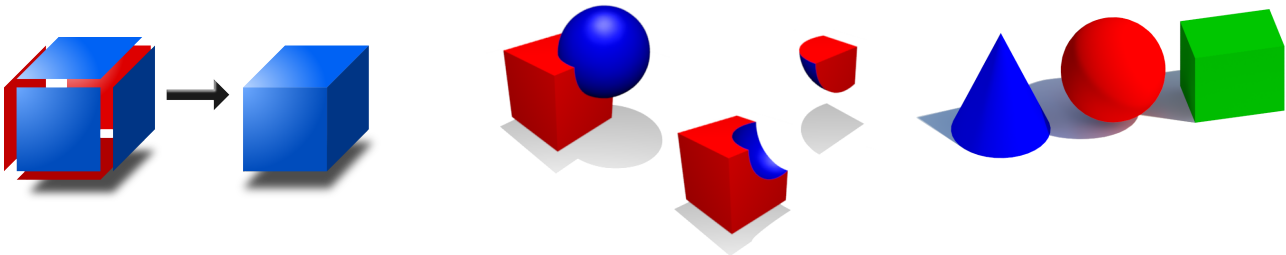
Množství typů informací v modelu IFC může být potenciálně mnohem větší než objem dat produkovaný současnými SW jako je ArchiCAD nebo Autodesk Revit. To je přirozené, protože jednotlivé systémy podílející se na návrhu a organizaci stavby jsou specializované na dílčí odborné zaměření. Tuto problematiku řeší právě MVD. Pohled na model (*Model View Definition*) popisuje podmnožinu informací obsaženou v informačním modelu, která je podporována aplikacemi, které se na pohledu shodly [74]. Prvním a obecně nejrozšířenějším pohledem je *Coordination View 1.0 (CV1.0)*, který vznikl přímo v rámci aktivit buildingSMART a je podporovaný prakticky ve všech SW pro navrhování budov postupy informačního modelování. Jak název napovídá, je tento pohled určen především pro koordinaci projektů, jako například kontroly návazností jednotlivých disciplín nebo jednotlivých stavebních částí.

6 Porovnání standardů GIS a BIM

V této kapitole provedu na základě standardů srovnání z hlediska přístupu ke geometrii, sémantickým informacím, analytickým možnostem, vizualizačním možnostem, práci se souřadnými systémy a v závěru tato porovnání shrnu. Výsledkem bude základ pro volbu přístupu pro použití GIS analýz pro modely BIM.

6.1 Geometrie

V souvislosti s BIM mluvíme převážně o 3D modelech, protože zde je možné plně využít možnosti, které tento přístup k navrhování budov nabízí. Základní definice těchto prvků je dána normou ISO 10303-42. Z definic v této normě vychází i definice geometrie ve standardu IFC [1]. Zásadním rozdílem v tomto směru je, že v GIS se 3D geometrické reprezentace zatím nevyužívá příliš často, a tak ani analytická funkcionalita nad těmito geometrickými reprezentacemi není ustálená. Z hlediska typů geometrické reprezentace lze rozlišovat geometrii typu B-Rep (Boundary Representation), CSG (Compound Solid Geometry) a geometrická primitiva. Jejich ukázky jsou znázorněny na obrázku 2. Obrázky zároveň postihují základní rozdíly mezi těmito reprezentacemi.



Obrázek 2: Geometrie typu B-Rep (vlevo), CSG (uprostřed) a 3D geometrická primitiva (vpravo)

Zatímco v modelech BIM je možné reprezentovat geometrii objektů všemi uvedenými způsoby, v GIS modelech je obvyklá pouze reprezentace typu B-Rep. Přitom i z hlediska 2D reprezentace má většina BIM modelů bohatší vyjadřovací možnosti (oblouky, Beziérovky, eliptické oblouky a další) oproti GIS modelům, které jsou obvykle složené pouze z přímých úseček. Celkové shrnutí porovnání možností geometrické reprezentace je uvedeno v tabulce 2. Z tabulky vyplývá, že BIM modely mohou obsahovat výrazněji podrobnější geometrickou reprezentaci objektů.

6.2 Vícenásobné geometrické reprezentace

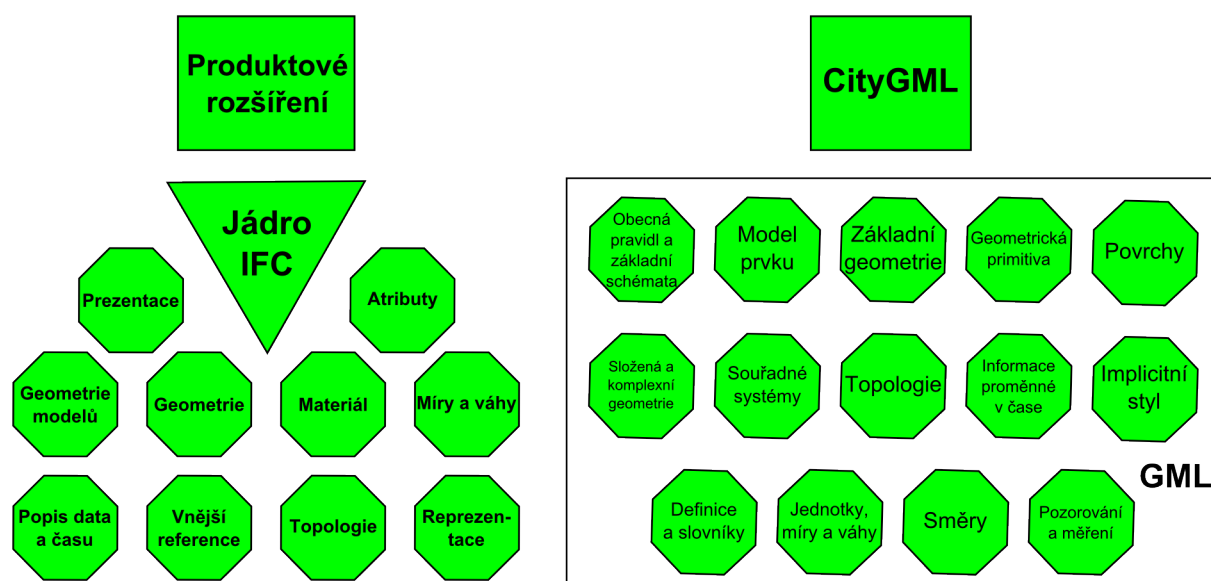
V modelech BIM podle standardu IFC je možné definovat libovolné množství geometrických reprezentací pro jeden objekt. Může tak být zároveň například reprezentován bodem, ohraničujícím kvádrem, podrobnou 3D geometrií, 2D reprezentací, případně i různými variantami reprezentace. V tomto ohledu se projevuje odlišné modelovací paradigma BIM a GIS. V GIS je geometrie základní a další informace se na geometrickou reprezentaci váží. Koncept vícenásobné reprezentace existuje v oblasti GIS standardů pouze v CityGML, ale i zde je počet reprezentací omezen na konkrétní úroveň podrobnosti (LOD). V některých případech to potom není vyloučeno a je možné využít datové struktury či pomocné vazby pro vyjádření tohoto konceptu, ale tento není součástí samotné definice a zpravidla se nepoužívá. Shrnutí porovnání standardů z hlediska možností vícenásobné reprezentace je uvedeno ve shrnující tabulce 2.

6.3 Sémantické informace

BIM i GIS modely jsou ze své podstaty schopné pojmout velké množství sémantických dat. Standard IFC, jakožto reprezentativní standard pro BIM, definuje konkrétní datový model pro

sémantické informace o budově, jejích elementech i procesech souvisejících s návrhem, realizací a udržováním stavby. Datový model je modulární a již samotná struktura dat má svoji vypovídající hodnotu. Data v modelu IFC mohou, ale nemusí, obsahovat geometrii. Model IFC tedy může být čistě sémantický.

GIS je oproti BIM zaměřený na geometrickou reprezentaci objektů a informace na ně navázané. Bez geometrické informace nebudeme hovořit o GIS, ale o jiném informačním systému. Zásadním rozdílem pak je, že BIM je ze své podstaty objektovým modelem, zatímco tradiční GIS systémy jsou postaveny především podle standardu OGC SF a používají relační organizaci dat a relační databáze. V oblasti GIS jsou objektivě definovanými standardy GML a CityGML. Při jejich praktickém použití se však naráží právě na složitější práci s plně objektovými daty [61]. CityGML je v přístupu k sémantické struktuře modelu podobné jako IFC. Proto na následujícím schématu na obrázku 3 uvádím do srovnání část IFC a celé CityGML v analogickém znázornění.



Obrázek 3: Porovnání části schématu IFC s modelem GML/CityGML

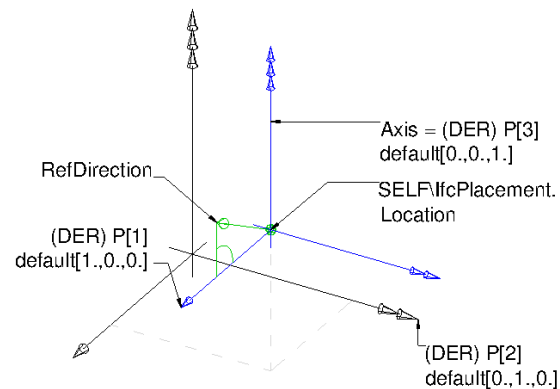
6.4 Analytické možnosti

Jediný ze standardů, který popisuje konkrétní analýzy nad daty je standard Simple Features. Pro všechny ostatní standardy jsou analýzy předmětem jednotlivých SW nástrojů. Přesto však se domnívám, že je to právě současná definice datových struktur a funkcí nad těmito strukturami, která stojí za značným rozšířením implementací standardu Simple Features v běžně používaných GIS nástrojích. Zajímavé přitom je, že i v původních člancích Egenhofera [63][64] je model DE-9IM pro analýzu vztahů mezi objekty doporučován nejen pro GIS, ale také pro CAD/CAM systémy. Významným výzkumem v této oblasti se zabývá Borrman [65][55][34], který se zaměřil na rozšíření konceptů použitých v modelu DE-9IM.

Výsledky analýz někdy také nazýváme topologickými vztahy mezi objekty [59]. V tomto směru byla již vytvořena celá řada pracovních rámců, které jsou rozebrány například v publikacích [59] a [60]. Tyto pracovní rámce musí v případě 3D dat vzít v úvahu nejen nové vztahy mezi 3D objekty, ale také mezi 3D a 2D, 1D a 0D objekty [59]. Tím samozřejmě komplexita takového prostředí významně vzrůstá. Schopnost provádět tyto druhy analýz je hlavním důvodem, proč se zabývat interoperabilitou BIM a GIS a analýzami v těchto prostředích. Můžeme tak najít odpovědi na množství otázek týkající se budovy a prostorových vztahů mezi jednotlivými objekty v rámci budovy i mezi různými budovami.

6.5 Souřadné systémy

V oblasti BIM je situace se souřadnými systémy poměrně jednoduchá. V zásadě se používá pouze World Coordinate System (WCS). Tento název je poněkud zavádějící, protože ve skutečnosti se jedná o lokální pravoúhlý kartézský souřadný systém výkresu, kdy počátek souřadnic je zpravidla v blízkosti modelu nebo uvnitř něj. Souřadnicové systémy se skládají, jak je znázorněno na obrázku 4. Projekt má souřadný systém, k němu



Obrázek 4: Skládání souřadných systémů v modelu IFC [1]

je relativně definován souřadný systém budovy, k němu souřadný systém stavebního elementu a vzhledem k němu například teprve definice profilu stavebního elementu. Pokud chceme tedy získat absolutní souřadnice, musíme všechny tyto relativní systémy složit a souřadnice postupně transformovat. Pokud jde o vazbu na geodetické a kartografické souřadné systémy, tak ve verzi IFC 2x3 je možné definovat pouze souřadnice počátku projektu a jeho azimut v souřadnicích WGS-84. Situace je lepší v nejnovější verzi IFC4, kde je definována celá nová infrastruktura pro georeferencování modelu stavby. Tato verze však zatím není rozšířená.

V oblasti GIS pracujeme běžně s velkým množstvím souřadných systémů a pro integraci dat a jejich analýzy je pak nutné data transformovat. Data v GIS modelu bývají zpravidla definována absolutně a definice souřadného systému je pak spíše součástí metadat o modelu, která mohou být fyzicky součástí modelu, nebo existují samostatně. Příkladem jsou soubory *.prj, které definují souřadnicový systém pro modely ve formátu SHP. Souhrnné porovnání možností georeferencování je uvedeno v tabulce 2.

6.6 Informační modelování

GIS i BIM představují informační modely určitých datových struktur, případně i jejich chování. GIS je zaměřený více na obecné prostorové informace, kdežto BIM je úzce zaměřen na informace o budově a procesy související s výstavbou. Model je vždy do jisté míry zjednodušenou formou modelovaného objektu či prostředí. Právě toto zjednodušení nám umožňuje na modelech provádět analýzy a simulace. Informační modelování je možné rozdělit na hypoteticko-deduktivní a induktivní. Podle tohoto rozdělení je první modelování vedeno snahou vytvořit velmi komplexní model pro simulaci komplexních podmínek experimentu. Přitom tvůrce modelu vychází z vědeckých poznatků a vlastní zkušenosti. Induktivní modelování je takové, kdy vycházíme pouze z dat získaných z experimentu a snažíme se naopak vytvořit co nejjednodušší model pro analýzu dat (Young, Ratto [42]).

BIM je spíše hypoteticko-deduktivním modelem, kdy se snažíme vytvořit poměrně komplexní model, který odpovídá realitě a je tak možné jej použít pro analýzy a plánování realizace projektu. Na druhou stranu je třeba vzít v úvahu, že přílišná podrobnost modelu nemusí být vždy užitečná a zpravidla ani užitečná není. Geografické informační systémy jsou naopak spíše povahy induktivních modelů, kdy vycházíme z existujících dat z různých zdrojů a provádíme pak analýzy na modelu, jehož jádrem jsou existující data o prostředí a prostorové a sémantické vztahy objektů v tomto prostředí.

6.7 Shrnutí srovnání datových standardů

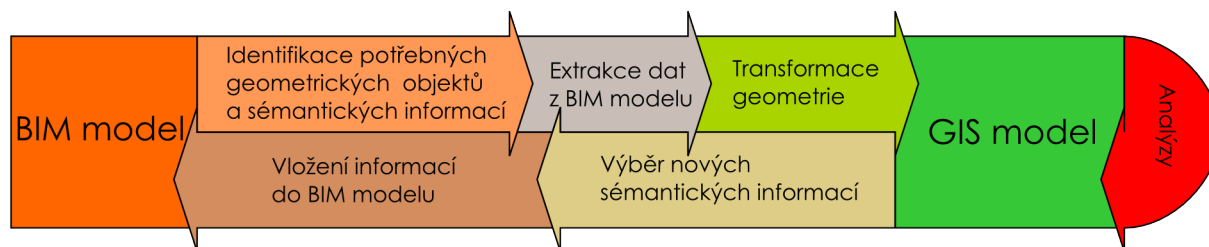
V následující tabulce je shrnuta většina poznatků uvedených v předcházejících podkapitolách:

	GML/CityGML	GML	Simple Features	KML	SHP	IFC 2x3
Možnosti 2D reprezentace objektů						
Přímá linie	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano
Kruhový oblouk	Ano	Ano	Ne	Ne	Ne	Ano
Komplexnější křivky	Ano	Ano	Ne	Ne	Ne	Ano
Možnosti 3D reprezentace objektů						
2D objekty ve 3D	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano
B-Rep	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano
Geometrická primitiva	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ano
CSG	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ano
Násobnost reprezentací objektu ve standardech						
Definováno ve standardu	Ano	Ne	Ne	Ne	Ne	Ano
Možné	Ano	Ano	Ano	Ne	Ne	Ano
Možnosti georeferencování podle jednotlivých standardů						
Lokální	Ano	Ano	Ano	Ne	Ano	Ano
WGS 84	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano
Libovolný systém	Ano	Ano	Ano	Ne	Ano	Ne

Tabulka 2: Shrnutí porovnání BIM a GIS datových standardů

7 Úvodní studie využití analytických možností GIS

Na základě porovnání datových standardů pro GIS a BIM a rešerše v oblasti existujících řešení interoperability jsem navrhl postup znázorněný na diagramu na obrázku 5. Postup sestává z identifikace potřebných geometrických objektů a jejich sémantických informací, extrakce dat z modelu BIM a transformace na geometrii použitelnou v systému GIS. Model v prostředí GIS může být analyzován a v další fázi mohou být vybrané výsledky vloženy zpět do původního modelu. Oproti stávajícím postupům by tak byly výsledné informace k dispozici stavebním odborníkům jako součást modelu BIM.



Obrázek 5: Diagram datových toků navrhovaného postupu

V rámci pilotního projektu jsem implementoval první část popsaného postupu a aplikoval jej na dvou ukázkových modelech. Prvním je model univerzitní budovy s vysokou úrovní detailu na úrovni jednotlivých stavebních elementů (LOD4), druhým je model města s podrobností na úrovni fasád budov a některých detailů na střeších (LOD2). V závěru této kapitoly zhodnotím závěry z této pilotní studie, které povedou k návrhu řešení v další kapitole.

7.1 Vývoj nástroje pro extrakci dat z modelu ve formátu IFC

V rámci pilotního projektu bylo cílem integrovat data BIM ve formátu IFC do prostředí ArcGIS, které je používáno jak na Northumbria University, tak i na magistrátech měst Newcastle a Gateshead, kteří jsou partnery na projektu VNG (Virtual Newcastle-Gateshead). Pro toto prostředí je přirozeným formátem ESRI Shapefile® (SHP), který je velmi blízký formátu Simple Features. Pro software ArcGIS existuje nástroj firmy Safe Software – FME DataInteroperability extension pro import modelů ve formátu IFC, ale nástroj není flexibilní pro výběr konkrétního druhu objektů a sémantických informací [8]. Rozhodl jsem se proto pro vytvoření vlastního nástroje pro extrakci dat.

7.1.1 IFC-SHP Extractor

Vývoj nástroje IFC-SHP Extractor jsem založil na softwarových knihovnách xBIM a Shapelib. xBIM je vyvíjen týmem profesora Lockleyho na Northumbria University a slouží pro libovolnou manipulaci a zpracování modelů ve formátu IFC. Shapelib je knihovna pro načítání a zápis dat ESRI Shapefile®. IFC-SHP Extractor umožňuje vybrat pro export ze dvou základních druhů geometrických objektů, které mohou být definovány v modelu IFC a to buď elementy prostorové struktury budovy (budova, patro, místnost), nebo stavební elementy (zdi, okna, dveře, ...). Nástroj umožňuje extrahovat pouze elementy, které mají geometrii, a mohou tedy vystupovat jako objekty v systému GIS. Nástroj zároveň umožňuje vybrat popisné atributy, které jsou pro export a následné analýzy relevantní.

Při extrakci je geometrie převedena z původní reprezentace na B-Rep složený z rovinných ploch (Faceted Boundary Representation), který může být uložen podle specifikace SHP. Zároveň jsou jednotky převedeny na metry, protože praktická zkušenost ukázala, že ArcGIS 10 ignoruje nastavení jednotek na milimetry a zobrazení v ArcGlobe je potom chybné. Výsledkem převodu je kompletní SHP (*.shp+*.shx+*.dbf+*.prj).

7.1.2 Transformace souřadného systému

Jak již bylo řečeno dříve, jsou data ve formátu IFC relativní k počátku o souřadnicích [0, 0, 0]. V terminologii CAD je tento souřadný systém označován jako WCS. Souřadnice středu WCS a orientace WCS vzhledem ke geografickému systému může být definován v modelu IFC jako atribut stavby (IfcSite), ale není povinným atributem a není nijak specifikována jeho přesnost. Jednotlivé použitelné atributy jsou uvedeny v tabulce 3. Pokud je počátek definován, je řečeno, že se má jednat o souřadnice v systému WGS 84. Pro řadu aplikací stačí tato hodnota velmi přibližně a standard nestanovuje přesnost této hodnoty.

IfcSite		Popis
Referenční šířka	RefLatitude	Nepovinný atribut, hodnota definována v šedesátinné míře s přesností na vteřiny, případně miliontiny vteřin vzhledem k systému WGS 84. Nabývá hodnot od -90 do +90.
Referenční délka	RefLongitude	Nepovinný atribut, hodnota definována v šedesátinné míře s přesností na vteřiny, případně miliontiny vteřin vzhledem k systému WGS 84. Nabývá hodnot od -180 do +180.
Referenční výška	RefElevation	Nepovinný atribut, hodnota vztažená k hladině moře.

Tabulka 3: Atributy použitelné pro georeferencování objektu v IFC 2x3

Pro vytvoření georeferencovaného GIS modelu existují v zásadě dvě možnosti:

- Fyzická transformace souřadnic
- Definice lokálního systému definovaného vzhledem ke geografickému systému

Pokud použijeme první přístup, budeme muset transformovat každý jeden bod a výsledné souřadnice budou mít pravděpodobně velmi velké hodnoty v porovnání s relativně malými hodnotami souřadnice vzhledem k lokálnímu počátku souřadnic. Nejjednodušším přístupem k transformaci by byl následující přístup:

$$\begin{pmatrix} \varphi \\ \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi_0 \\ \lambda_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1/(N+h) & 0 \\ 0 & 1/(M+h) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

Vzorec 1: Zjednodušený převod lokálních souřadnic do WGS-84

kde Φ a λ jsou šířka a délka v systému WGS 84, Φ_0 a λ_0 jsou souřadnice počátku lokálního systému a reprezentují tedy translaci. Další matice reprezentuje změnu měřítka, kterou převádíme délky v lokálním systému na úhlovou míru systému WGS 84. N je příčný poloměr křivosti, M je meridiánový poloměr křivosti. Předposlední člen představuje rotaci systému danou azimutem, tedy orientaci lokálního systému vůči WGS 84. Posledním členem jsou originální souřadnice lokálního systému. Tento vztah je použitelný pouze pro malé lokální objekty. Modely používají běžně přesnost geometrie 10^{-9} , což při použití milimetru jako jednotek dává přesnost 10^{-12} metru vnitřní přesnosti dat modelu. Pokud bychom chtěli tuto integritu modelu zachovat i po transformaci do systému WGS 84, musely by souřadnice být uchovány s přesností řádově 10^{-17} . Takové číslo je na hranici přesnosti, s jakou pracují běžné SW.

```
PROJCS["Local_system",
  GEOGCS["GCS_WGS_1984",
    DATUM["D_WGS_1984",
      SPHEROID["WGS_1984", 6378137.0, 298.257223563]],
    PRIMEM["Greenwich", 0.0],
    UNIT["Degree", 0.0174532925199433]],
  PROJECTION["Local"],
  PARAMETER["False_Easting", 0.0],
  PARAMETER["False_Northing", 0.0],
  PARAMETER["Scale_Factor", 1.0],
  PARAMETER["Azimuth", -0.261799387799156],
  PARAMETER["Longitude_Of_Center", -0.177999999722222],
  PARAMETER["Latitude_Of_Center", 51.4879],
  UNIT["Meter", 1.0]]
```

Text 1: Definice lokálního systému založeného na WGS 84 ve formátu WKT

Pro transformaci jsem proto zvolil druhý postup a to zachování stávajících souřadnic a definování lokálního souřadnicového systému založeného na WGS 84. Výsledná definice určuje počátek WCS v systému WGS 84 a orientaci lokálního modelu. Ukázka takového projekčního souboru je v textu 1.

7.1.3 Transformace výšek

Pro transformaci výšek platí obdobné informace jako pro transformaci polohovou. Výšky bodů jsou relativní k lokálnímu počátku souřadnic. Referenční výška je nepovinným atributem stavby stejně jako referenční šířka a délka. Referenční výška je přitom podle standardu definována vzhledem k hladině moře, ale není již určeno kterého. V tomto případě jsem použil fyzické transformace souřadnic prostým přičtením referenční výšky k souřadnici z , neboť program ArcGIS 10 nebral uvedený výškový referenční systém v úvahu.

7.2 Rozmístění azbestu v budovách univerzitního kampusu

Motivací pro extrakci dat univerzitního kampusu je incident z roku 2010, kdy vlivem nedostatečného přístupu k informacím nebyla stavební firma provádějící stavební úpravy v jedné z budov kampusu varována, že pracuje s materiálem obsahujícím azbest. Práce s azbestem i jeho

likvidace podléhají speciálnímu režimu, protože se jedná o karcinogenní materiál, který je nebezpečný právě především při manipulaci jakou jsou stavební úpravy.

7.2.1 Cíl pilotního projektu

Cílem pilotního projektu bylo extrahovat z existujícího modelu univerzitního kampusu data, která by byla relevantní pro určení místností, které obsahují stavební prvky obsahující azbest nebo které jsou třeba i v blízkosti. Jako relevantní data byly identifikovány geometrické reprezentace místností a geometrické reprezentace jednotlivých stavebních prvků a materiálové složení stavebních elementů nebo aspoň identifikace prvků obsahujících azbest (pouze ve formě obsahuje/neobsahuje).

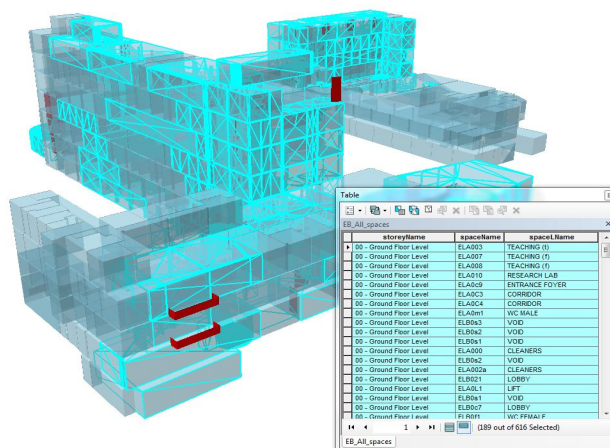
7.2.2 Výchozí informační model budovy

Stávající model budov kampusu vznikl modelováním z existující 2D dokumentace spravované v systémech CAD. Tyto výkresy jsou v současnosti hlavním zdrojem dat pro práci správy a údržby budov kampusu. Snahou je, aby byly tyto výkresy nahrazeny právě modelem BIM, který by poskytl možnost spravovat i veškerá data o budovách v konzistentní podobě spolu s grafickým modelem. BIM model nyní obsahuje jednotlivé stavební elementy tak, jak byly identifikovány z aktuální výkresové dokumentace a místnosti s kódovou identifikací odpovídající kódům skutečných místností v kampusu. Modely jednotlivých budov kampusu (přibližně 20 budov) byly vzájemně polohově referencovány na základě 3D modelu města (projekt VNG – viz kapitola 7.3.2). Pro ukázkovou extrakci dat byla použita budova Ellison Building ve střední části kampusu.

7.2.3 Výsledek převodu

Výsledkem extrakce jsou dva geometrické modely ve formátu ESRI Shapefile® s geometrií typu *Multipatch*. Je to model místností a model všech stavebních elementů. Místnosti mají atribut „Name“, který obsahuje identifikaci místnosti ve formě kódu, pod kterým je místnost vedena v systému správy budov. Také obsahují atribut specifikující podlaží a budovu.

Na obrázku 6 je znázorněn výsledek jednoduché analýzy vzdáleností, kde jsou vybrány všechny místnosti v těsné blízkosti elementů, které reprezentují elementy potenciálně obsahující azbest. Zhotovení tabulkového reportu obsahujícího tyto místnosti a grafické znázornění je pak již otázkou využití vizualizačních možností daného SW.



Obrázek 6: Northumbria University, Ellison Building: Místnosti v kontaktu s vybraným typem elementu

7.3 Převod modelu města do GIS

Newcastle upon Tyne a Gateshead jsou města v severovýchodní Anglii. Newcastle je metropolí pro oblast Tyne and Wear a má přibližně 260 tisíc obyvatel. Gateshead je sousedící město, které je oddělené pouze řekou Tyne a má přibližně 190 tisíc obyvatel. Projekt Virtual Newcastle-Gateshead (VNG) je projektem obou měst a Northumbria University. Cílem projektu VNG je prozkoumat možnosti a vytvořit geometricky přesný třírozměrný digitální model těchto dvou měst. V současnosti vizualizační centrum při univerzitě poskytuje vizualizační služby pro investiční záměry v obou městech, kdy je model využit pro posouzení vizuálního vlivu nových staveb na architekturu měst. Realizace převodu popsána v této části práce byla součástí projektu VNG a především jeho pracovní skupiny VNG-GIS.

7.3.1 Cíl projektu

VNG-GIS Working Group je jednou z pracovních skupin projektu VNG a zabývá se integrací modelu VNG se stávajícími systémy GIS provozovanými oběma městy. Cílem je především podpora územního plánování v podobě 3D modelu. Svoji práci jsem se podílel na práci této skupiny s využitím postupu a nástroje uvedeného v předchozí kapitole. Výsledkem měl být první ukázkou integrace městských 3D dat a existujících GIS dat z městských databází.

7.3.2 Výchozí model VNG

Model VNG v současnosti pokrývá plochu 11,5 km² a v blízké budoucnosti bude aktualizován a rozšířen na plochu přibližně 40 km². Hlavní metodou pro sběr dat je letecká fotogrammetrie a pozemní laserové skenování pro některé objekty. Parametry modelu jsou shrnuty v tabulce 4.

Details of VNG Model	
Currency	Data captured in 2009 (soon to be updated)
Data capture	Aerial photogrammetry and laser scanning survey techniques (with the view of model to be based upon a database structure to facilitate regular update procedures and efficient management).
Terrain accuracy	0cm-25cm for 70% of points
Terrain	Presenting small and large grassy areas, wooded areas, main and minor roads, railway pathways, bridges, car parks, rivers, water bodies, trees, vertical embankments
Building detail	Initially high detail with features (roof structures, chimneys, pitched roofs, flat roofs, parapets, dormer windows, separation of individual buildings, etc.). Facades, textures added to achieve LODs when needed.
Format	Initially .dwg for the context model, 3dsMax and VR4Max formats used for detailing and interactive presentation purposes. Other formats such SketchUp etc, provided for the councils when they require.

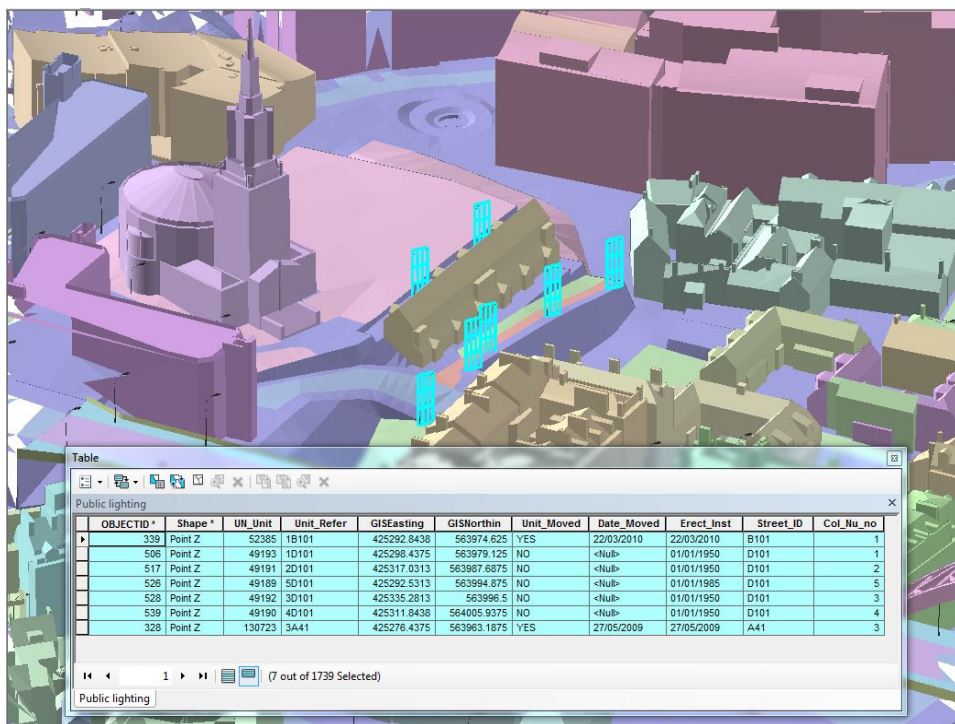
Tabulka 4: Parametry modelu VNG [40]

7.3.3 Výsledek převodu

Výsledný model se skládá ze tří částí. Každou z částí představuje jeden soubor SHP (dva typu Multipatch a jeden bodový). První částí je terén a tělesa komunikací, druhou jsou budovy, kdy jedna budova odpovídá jednomu objektu a třetí reprezentuje stromy jako bodové objekty. Pokud bychom použili hodnocení úrovně detailu podle standardu OGC CityGML, jednalo by se o model s podrobností LOD3 (viz tabulka 4).

Model, který jsem vytvořil extrakcí dat z modelu VNG je první formou modelu VNG, která je použitelná pro práci v prostředí GIS a stává se tak spojnicí pro obohacení dat pro územní plánování na jedné straně a obohacením původního modelu VNG na straně druhé. Na obrázku 7 je pohled na část modelu, kde městské osvětlení je vrstvou z GIS databáze města Newcastle. Na obrázku jsou

zvýrazněně prostorovým dotazem vybrané stožáry osvětlení, které jsou do 20 metrů od jedné z budov. Stožáry jsou součástí datových sad magistrátu města Newcastle.



Obrázek 7: Analýza vzdálenosti - veřejné osvětlení do 20m od budovy

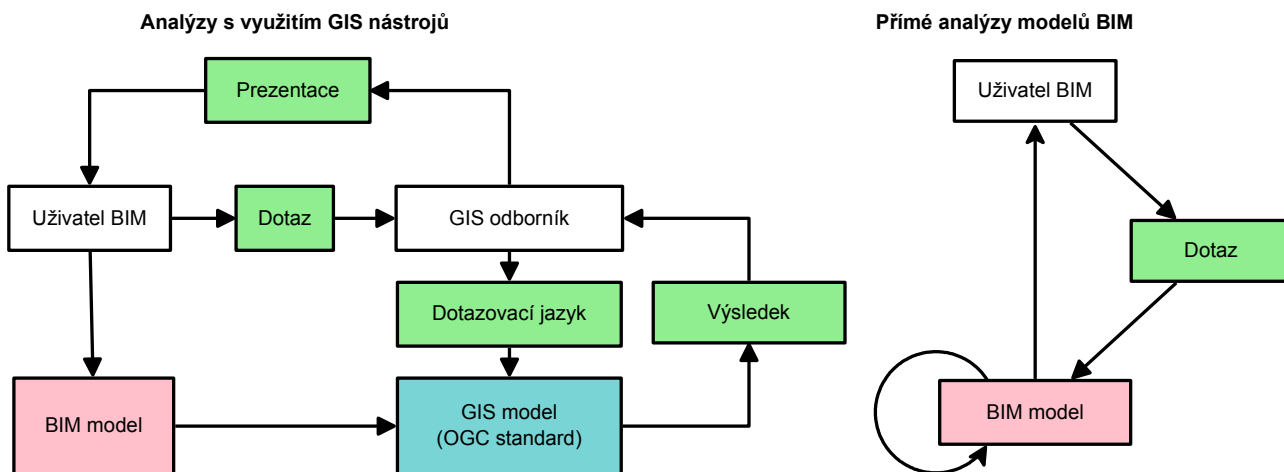
7.4 Výsledek úvodní studie

Postup naznačený v diagramu na obrázku 5 je podrobněji znázorněn na obrázku 8 vlevo. Z obrázku je zřejmé, že se nejedná o příliš přímočarý postup. Takový postup je zcela oprávněný a nevyhnutelný v případě, kdy je třeba pro nalezení odpovědi na počáteční otázku použít i další externí data z prostředí GIS. Takovým případem mohou být data na úrovni městské části či regionu jako v kapitole 7.3 Významnou otázkou, kterou jsem se v souvislosti s tímto postupem zabýval bylo, zda je skutečně nutné provádět tento postup pro analýzy týkající se pouze budovy samotné, kdy všechna potřebná data jsou již obsažena v originálním modelu. Příkladem je model v kapitole 7.2, kde jsou analyzována data z jediné budovy. V takovém případě je použití nástroje jako je ArcGIS zbytečně komplikované a dochází k neúměrným ztrátám informací. Již od začátku je třeba specifikovat druhy dat, která nás zajímají a tato mapovat a převádět do jiného prostředí. Ideální by byl pro tento případ postup naznačený v diagramu 8 vpravo.

Hlavní problémy identifikované během práce na této studii zahrnují především:

- Nutná degradace geometrie na B-Rep
- ArcGIS není schopen provádět prostorové analýzy na objektech s komplexní geometrií
- Obtížná propagace výsledků do původního modelu

Geometrie v modelech BIM je zpravidla velmi detailní a při jejím převodu na B-Rep dochází k velkému nárůstu objemu zpracovávaných dat a tím i zvyšování nároků na systémové zdroje. S geometrickou reprezentací souvisí i další problém a to je neschopnost SW ArcGIS 10 provádět analýzy s objekty, jejichž reprezentace sestává z více jednotlivých na sebe navazujících celistvých těles. Typickým příkladem takového objektu je okno nebo dveře, které se skládají z rámu, okenní tabule, parapetu, prahu, desky dveří a podobně. Takové objekty není možné pro analýzy použít, což samozřejmě značně omezuje použitelnost SW jako je ArcGIS pro analýzy modelů budov, které zpravidla obsahují velké množství podobných objektů.



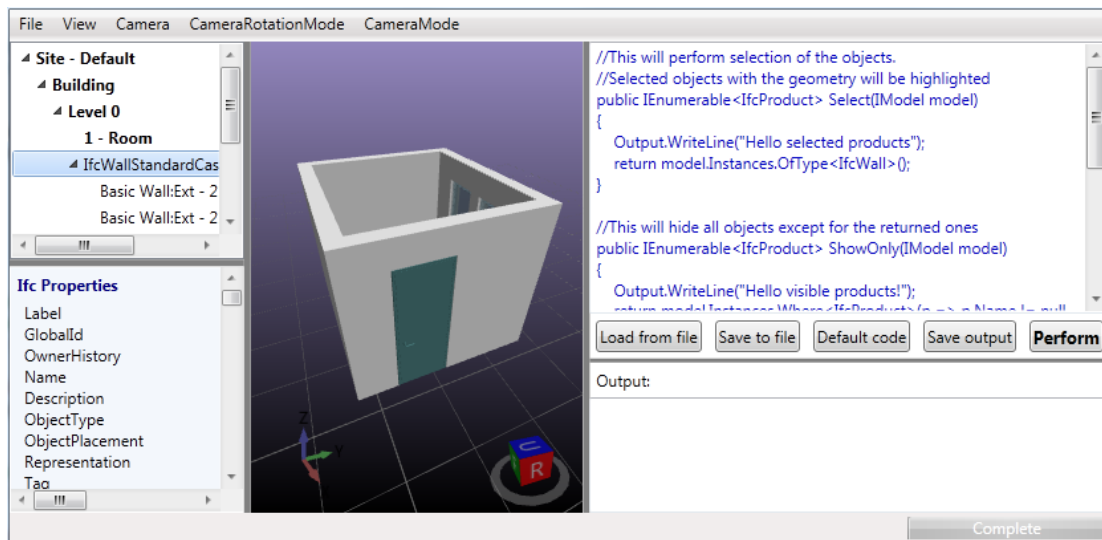
Obrázek 8: Analýzy s využitím GIS nástrojů (vlevo) a přímá analýza modelů (vpravo)

Propagace výsledků analýz zpět do původního modelu představuje druhou část naznačeného postupu z diagramu 5. Tato část nebyla v této studii realizována, protože nástroje tento postup nepodporují a muselo by být vyvinuto větší množství podpůrných nástrojů. Výsledky analýz by musely být identifikovány s původními objekty, přeneseny do modelu IFC ve struktuře, která je výrazně komplexnější, než zjednodušený model použitý v ArcGIS. Tento poznatek je jedním z důležitých výsledků úvodní studie, protože opět vede spíše k řešení naznačenému na diagramu 8, kdy veškeré informace zůstávají v původním prostředí a není je tak třeba transformovat.

Na základě identifikovaných problémů jsem navrhl přístup pro analýzy uvnitř modelu, to znamená bez souvislostí s externími daty (diagram na obrázku 8 vpravo). Tento přístup umožňuje provádět analýzy v modelu samotném a poskytovat tak možnost práce s modelem přímo uživateli BIM. Zároveň zůstávají výsledky analýz součástí modelu a je možné tak obohacovat původní model o nové informace a souvislosti. Obzvláště v případě těchto vnitřních analýz modelu je právě uživatel tím, komu by měly být informace nejdostupnější ve chvíli, kdy s nimi pracuje. Tímto směrem se budu zabývat ve zbývající části této práce.

8 Prostorové analýzy v prostředí BIM

Tato kapitola je stěžejní kapitolou této práce. V následujících podkapitolách uvedu základní prostorové vztahy a funkce a dále možnosti analýz v modelech BIM s využitím geometrie (8.3), poté s využitím sémantických vazeb (8.4) a nakonec s využitím atributových dat (8.5) v modelu. Každá z těchto oblastí má svá specifika a v porovnání proti klasickému prostředí nástrojů BIM nabízí další možnosti, které se pokusím vyzvednout. Hlavní motivací pro tuto část práce je poskytnout základ pro kvalitní analýzy modelů BIM s maximálním využitím potenciálu informací, které se v takovém modelu mohou nacházet. Ve všech následujících podkapitolách vycházím z předpokladu, že hlavním cílem je provádět analýzy uvnitř jednoho modelu, nikoli integrace s okolními daty.



Obrázek 9: Rozhraní upraveného prohlížeče Xplorer s panelem pro zadávání kódu vpravo

Pro ověřování ukázkových dotazů jsem upravil prohlížeč Xplorer (obrázek 9), který je součástí SW knihovny xBIM (viz kapitola 7.1). K jeho standardní funkcionalitě jsem doplnil panel pro zadávání zdrojového kódu v jazyce C#. Tento kód může být za běhu zkompilován a pokud obsahuje předdefinované funkce, jsou tyto funkce pomocí reflexe vykonány. Pro jednoduché dotazy je nejčitelnější využití lambda výrazů [71], které poskytuje jazyk C#. Tento jazykový konstrukt je možné použít ve funkcích jako je `model.Instances.Where<T>(Func<T, Bool> expression)`, kde výraz *expression* může být vyjádřen právě jako lambda výraz.

8.1 Prostorové vztahy a funkce

Jak jsem již uvedl v kapitole 4.2, nejběžněji používaným standardem pro geografická data a analýzy je standard Simple Features [28]. Tento standard popisuje také základní prostorové vztahy a funkce, které jsou matematicky definované a popsány v rámci standardu. Základem pro geometrické vztahy je práce Egenhofera a Clementiniho [63][64], kteří definovali vztahy pomocí matice průniků DE-9IM. Matice je rozměru 3x3 a obsahuje průniky vnějších prostor, vnitřních prostor a hranic dvou geometrických objektů. Jednotlivé pojmenované stavy této matice jsou *Equals*, *Disjoint*, *Intersects*, *Touches*, *Crosses*, *Within*, *Contains*, *Overlaps* a *Relate*. Funkce definované v SF jsou uvedené v následující tabulce 5. Jak je však uvedeno i ve standardu, vztahují se uvedené funkce a vztahy především na dvourozměrnou geometrii. Analýzy a vztahy ve 3D modelech jsou o poznání komplexnější a není pro ně v současnosti žádný obecně uznávaný standard. Významnou je v tomto směru práce André Borrmana [34] [55]. Jeho práce je zaměřena na definici formálního jazyka pro geometrické analýzy 3D modelů budov.

Prostorové funkce	Popis
<i>Distance</i>	The shortest distance between any two Points in the two geometric objects as calculated in the spatial reference system of this geometric object. Because the geometries are closed, it is possible to find a point on each geometric object involved, such that the distance between these 2 points is the returned distance between their geometric objects.
<i>Buffer</i>	Geometric object that represents all Points whose distance from this geometric object is less than or equal to distance. Calculations are in the spatial reference system of this geometric object. Because of the limitations of linear interpolation, there will often be some relatively small error in this distance, but it should be near the resolution of the coordinates used.
<i>Convex Hull</i>	Geometric object that represents the convex hull of this geometric object. Convex hulls, being dependent on straight lines, can be accurately represented in linear interpolations for any geometry restricted to linear interpolations.
<i>Intersection</i>	Geometric object that represents the Point set intersection of this geometric object with another Geometry.
<i>Union</i>	Geometric object that represents the Point set union of this geometric object with another Geometry.
<i>Difference</i>	Geometric object that represents the Point set difference of this geometric object with another geometry.
<i>Symmetric Difference</i>	Geometric object that represents the Point set symmetric difference of this geometric object with another geometry. (XOR)

Tabulka 5: Prostorové funkce podle OGC Simple Features [28]

Prostorové funkce tak, jak jsou uvedené podle standardu OGC SF [28] v tabulce 5, jsou v zásadě dvojího druhu podle typu výsledku. Prvním druhem je funkce pro získání vzdálenosti mezi dvěma geometrickými objekty. Jejím výsledkem je skalární hodnota vyjadřující nejkratší vzdálenost. Druhým typem jsou ostatní funkce, kdy výsledkem je nový geometrický objekt. Tento přístup je poměrně přirozený v prostředí GIS, kdy geometrická reprezentace je prvotním popisným údajem o objektu, ale je komplikovanější v prostředí BIM, kde samotná geometrická reprezentace nemá význam a může existovat pouze jako jakýsi přechodný stav. Geometrická reprezentace má význam pouze v kontextu reprezentace určitého objektu.

Navíc Borrmann rozšiřuje tradiční vztahy definované pomocí modelu DE-9IM na 3D objekty a přidává dva nové pojmenované vztahy *Surround* a *Encompass*, které mají ve 3D podstatně větší význam než ve 2D. Tento způsob provádění analýz se jeví jako vhodný, protože navazuje na existující prostorové funkce a predikáty a rozšiřuje je dále do oblasti 3D a to včetně matematického odvození. V současnosti pracuje Borrmann na praktické ukázkové implementaci navržených vztahů.

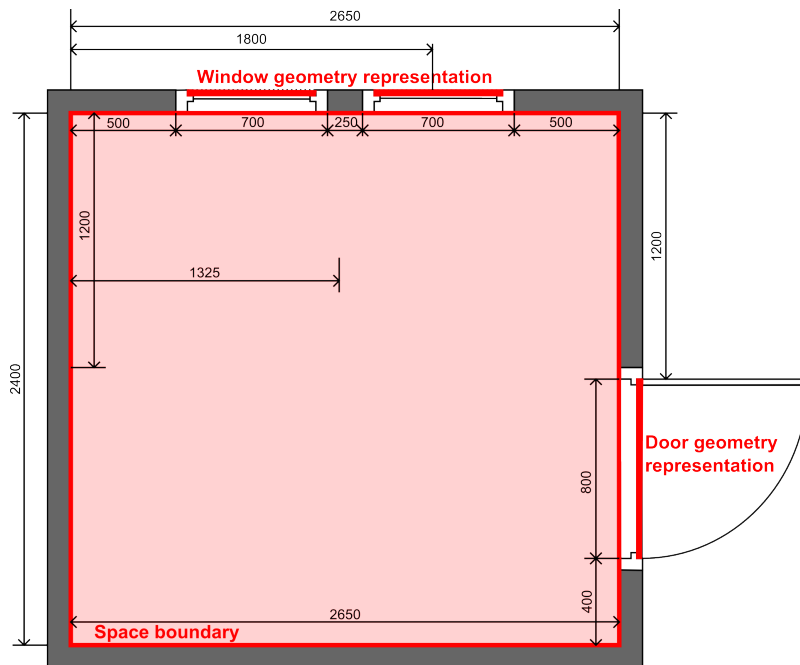
8.2 Úroveň detailu při analýzách

V kapitole 4.2.2 jsem se již zmínil o úrovni detailu (Level of Detail - LOD) definovaném ve standardu CityGML. Úroveň detailu je velmi podstatná pro provádění prostorových analýz informačních modelů budovy. V prostředí stavebního průmyslu je zavedený pojem „Level of Development“ se stejnou zkratkou (LOD). V dalším textu budu používat zkratku LOD(GIS) pro „Level of Detail“ a LOD(BIM) pro „Level of Development“.

LOD(BIM) byl popsán v dokumentu E202TM-2008 amerického institutu architektů a popisuje úroveň rozpracovanosti projektu v pěti úrovních od LOD 100 do LOD 500. Vysoké číslo v násobcích sta je použito záměrně, aby bylo možné odhadovat hodnotu LOD poměrně podrobně i mezi jednotlivými milníky. Jednotlivé etapy jsou popsány z hlediska množství a podrobnosti informací v modelu, kde geometrie je pouze jednou z částí modelu. Také je popsáno, jaké druhy analýz je možné v dané úrovni provádět a jaké soupisky je možné vytvářet. Oproti tomu LOD(GIS) popisuje pouze prostorový rozsah a geometrickou podrobnost objektů. Přesto mají oba pojmy

podobný význam v tom smyslu, že do jisté míry definují podrobnost geometrie. Mezi LOD(BIM) a LOD(GIS) je možné najít jisté mapování, kdy LOD(GIS) pokrývá v úrovních 0 a 1 podrobnost, pro kterou se BIM modely zpravidla nepoužívají (existují ale výjimky, jako je VNG uvedený v kapitole 7.3.2). Naopak LOD(BIM) 450 až 500 popisují geometrii, která svojí mírou detailu přesahuje podrobnost obvyklou v GIS modelech.

Tyto rozdíly jsou dobrou reprezentací rozdílné koncepce pojetí detailu a zaměření mezi GIS a BIM. Přitom je úroveň detailu pro prostorové analýzy modelů staveb podstatná a je třeba jí vzít v úvahu. Pro příklad použijí obrázek 10 a jeho 3D reprezentaci na obrázku 11, na kterém je znázorněna místnost s okny a dveřmi. Řekněme, že předmětem analýzy bude otázka: „Kolik dveří je v místnosti?“. Pokud budeme používat klasické geometrické a prostorové analýzy, převedeme pravděpodobně analýzu na dotaz: „Kolik dveří je uvnitř místnosti?“, formulovaný ve strojově zpracovatelné formě.



Obrázek 10: Geometrická reprezentace objektů

Výsledkem však bude 0, protože geometrie dveří nemá žádnou geometrickou vazbu na geometrii místnosti, která je definována vnitřním obvodem zdí, podlahy a stropu. Podobně tomu bude, pokud budeme geometrii testovat na průnik a dotek. Výsledky a formy dotazu jsou znázorněny v tabulce 6. Důvodem, proč nejsou výsledky dotazu takové, jaké bychom očekávali, je právě v úrovni detailu modelu a jeho uspořádání. Řešením této problematiky se budu zabývat v následujících dvou kapitolách 8.3 a 8.4.

Typ dotazu	Dotaz	Výsledek
Přirozený jazyk	Kolik dveří má místnost 103?	1
SQL rozšířený o geometrické a prostorové analýzy (pseudosyntaxe inspirována OGC SFA)	SELECT count(door.id) FROM door WHERE CONTAINS ((SELECT room.geometry FROM room WHERE room.id = 103), door.geometry)	0
	SELECT count(door.id) FROM door WHERE TOUCHES ((SELECT room.geometry FROM room WHERE room.id = 103), door.geometry)	0
	SELECT count(door.id) FROM door WHERE INTERSECTS ((SELECT room.geometry FROM room WHERE room.id = 103), door.geometry)	0

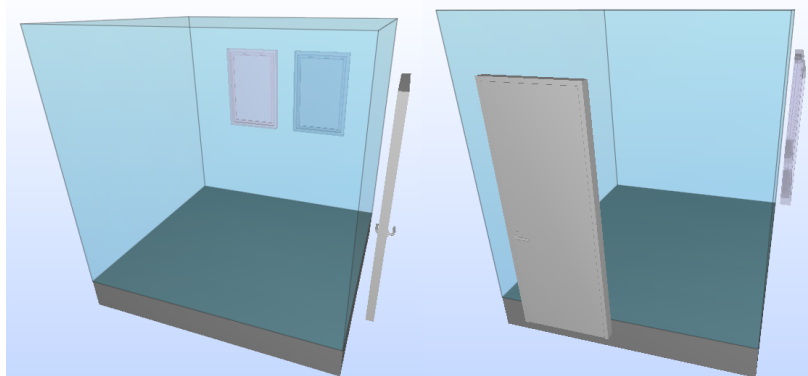
Tabulka 6: Výsledky různě položených prostorových dotazů

8.3 Analýzy s využitím existující geometrie

Na uvedených obrázcích dále rozvádím příklad z předchozí kapitoly 8.2 o úrovni detailu při provádění prostorových analýz. Jedná se právě o čistě geometrický přístup, který může dávat neočekávané výsledky při použití na přesných a komplexních modelech staveb. Zde uvedený příklad byl vytvořen v prostředí Autoresk REVIT Architecture, následně exportován do formátu IFC a poté importován do prostředí ArcGIS 10 pomocí rozšíření FME. Jak je zřejmé z obrázku 11,

je geometrická reprezentace oken a dveří zcela oddělená od reprezentace místnosti. To již intuitivně odpovídá na otázku výsledku analýz.

Při testování v prostředí ArcGIS 10 jsem navíc zjistil, že ani nejnovější verze SW od firmy ESRI nedokáže provádět analýzy s komplexními objekty, jakými jsou v tomto případě okna a dveře z modelu BIM. Zde narážíme tedy kromě problému s úrovní detailu z hlediska významového i na problém s prací s komplexními geometrickými reprezentacemi, které jsou v BIM běžné a jsou nutné pro vytváření kvalitních modelů návrhu staveb. Proto je výhodnější provádět analýzy přímo v modelu BIM, jak jsem uvedl v úvodu této části práce. Například při použití SW knihovny xBIM uvedené dříve je možné využít jádra OpenCASCADE pro práci s geometrií a její analýzy.



Obrázek 11: Dveře a okna prostorově izolovaná od geometrie místnosti

Ačkoli jsem se již na mnoha místech této práce zmínil o tom, že obecně nemusí model obsahovat žádnou geometrickou reprezentaci popisovaných objektů, jsou objekty, o které se zajímáme zpravidla takové povahy, že v reálném světě svojí geometrickou reprezentaci mají. Ve schématu IFC [1] jsou proto relevantní všechny produkty, tedy objekty, které jsou podtřídami třídy *IfcProduct*, jako jsou zdi, okna, dveře, nábytek a další, celkem 86 typů.

8.4 Analýzy s využitím sémantické topologie objektů

Jak uvádí Benner a Geiger [69], je sémantická složka modelu budovy či města velmi podstatná a může vést ke zcela novým způsobům využití modelů. Sémantická topologie objektů BIM vzniká při tvorbě modelu a je dána logickými vazbami mezi objekty. Jak již bylo uvedeno dříve v kapitole 6.6, je pro modely BIM používáno modelovací paradigma, kdy na počátku je myšlenka a znalost funkčních vlastností objektu a vztahů mezi objektem a jeho okolím. Proto jsou tyto sémantické informace zpravidla již součástí modelu a vznikají jako vedlejší produkt při navrhování stavby. V modelu IFC jsou takové vazby reprezentovány samostatnými datovými objekty. Vztahy v modelu IFC mohou být základních typů: Rozložení (Decomposes), Přiřazení (Assigns), Definující (Defines), Spojující (Connects), Asociující (Associates).

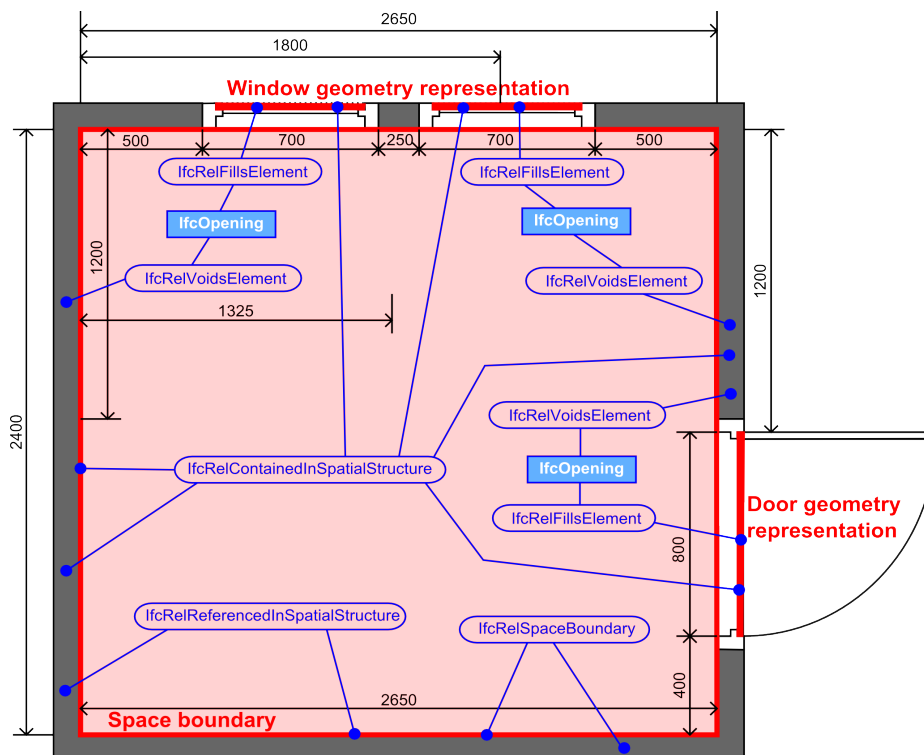
V této práci se zabývám především možností využití GIS analýz v modelu BIM. Z tohoto hlediska považuji právě tyto vztahy za velmi podceňované, neboť při současných snahách o využití dat BIM v GIS jsou opomíjené. Při převodech dat se zaměřením na geometrickou reprezentaci objektů jsou sémantické vztahy vynechány jako nepodstatné. Přitom, jak jsem již uvedl v kapitole 8.2, je velmi dobře možné, že právě tyto sémantické vazby obsahují informaci, o kterou stojíme. Přitom se stává, že geometrická analýza neposkytne očekávaný výsledek. Množství vztahů v modelu IFC je možné přitom interpretovat s prostorovým významem, především pokud jde o vztahy *contains*, *touches* a *within*. Na obrázku 12 je znázorněna ukázková místnost z kapitoly 8.2 se znázorněnými sémantickými vazbami, které taková místnost může obsahovat. Jak je z obrázku patrné, jedná se o velké množství vztahů, které jsou někdy složené a mají různou násobnost. Pokud se tedy vrátíme k ukázkovému případu s otázkou „Kolik dveří je v místnosti?“ z kapitoly 8.2, zjistíme, že k jejímu

zodpovězení stačí jednoduchá analýza, kdy v modelu najdeme vztah typu *IfcRelContainedInSpatialStructure*, který spojuje místnost s dveřmi. Ukázka kódu pro takovou analýzu je v textu 2.

```
IfcRelContainedInSpatialStructure relation = model.
    Instances.Where<IfcRelContainedInSpatialStructure>
        (r => r.RelatingStructure.Name == "311" )FirstOrDefault();
IEnumerable<IfcDoor> doors = relation.RelatedElements.OfType<IfcDoor>();
doorCount = doors.Count();
```

Text 2: Dotaz v jazyce C# s využitím sémantických vztahů

Stejného výsledku bychom dosáhli i s následujícím dotazem, který by využil vztahu *IfcRelContainedInSpatialElement* pro získání všech zdí obklopujících místnost a dále pak vztahu *IfcRelVoidsElement* pro získání otvorů v těchto zdech určených pro okna a dveře. Nakonec bychom pomocí vztahu *IfcRelFillsElement* získali dveře v těchto zdech. Tento druh dotazu je komplikovanější, ale je dobrou alternativou pro první dotaz. Zároveň reprezentuje příklad, kdy jsou geometrické topologické vztahy zachyceny v modelu čistě nezávisle na geometrii objektů (dveří a dveřního otvoru).



Obrázek 12: Definované vztahy v modelu IFC

Ze všech vztahů, které jsou ve schématu IFC definovány, jsem vybral ty, které mohou mít význam pro prostorové analýzy analogické těm definovaným ve standardu OGC SF. V tabulce č.7 jsou uvedeny tyto vztahy spolu s jejich analogickým prostorovým vztahem a jeho inverzním významem. Jak je zřejmé, jsou sémantické vztahy použitelné především pro vztahy *contains*, *within* a *touches*, tedy „obsahuje“, „je obsažen v“ a „dotýká se“. Pro tyto vztahy jsem implementoval novou knihovnu *Xbim.Spatial.dll* jako součást SW knihovny xBIM.

Relation	Spatial relation	Inverse spatial relation	Condition, note
Aggregates	<i>Contains</i>	<i>Within</i>	
Connects Elements	<i>Touches</i>	<i>Touches</i>	relation connection geometry can be provided
Connects Path Elements	<i>Touches</i>	<i>Touches</i>	
Connects Port To Element	<i>Touches</i>	<i>Touches</i>	combined with “Connects Ports” provides topological system of ports and connected Elements
Connects Ports	<i>Touches</i>	<i>Touches</i>	combined with “Connects Ports” provides topological system of ports and connected Elements
Connects Structural Element	<i>Touches</i>	<i>Touches</i>	combined with the “Connects Structural Member” relation it can serve as “Connects Ports”
Connects Structural Member	<i>Touches</i>	<i>Touches</i>	applicable on connected physical Elements
Connects With Eccentricity	<i>Touches</i>	<i>Touches</i>	subtype of “Connects Structural Member”
Connects With Realizing Elements	<i>Touches</i>	<i>Touches</i>	subtype of “Connects Elements”
Contained In Spatial Structure	<i>Within</i>	<i>Contains</i>	must be resolved recursively (elements in space are in the storey at the same time)
Covers Building Elements	<i>Touches</i>	<i>Touches</i>	everything what can cover building element (like finish or some kinds of ceilings, tiles etc.)
Covers Spaces	<i>Touches</i>	<i>Touches</i>	specialized form of “Covers Building Elements”
Fills Element	<i>Within</i>	<i>Contains</i>	can exist only between opening and Element (like wall, floor etc.). Cannot be defined between space and opening. Must be combined with “Opening” and “Voids” relation to get full relation like relation between Wall and Door for example.
Interaction Requirements	<i>Relate</i>	<i>Relate</i>	this has spatial meaning just if this is used between spatial elements (those with potential geometry)
Nests	<i>Within</i>	<i>Contains</i>	all parts must be of the same type. This has spatial meaning just if all elements have potentially geometric representation
Projects Element	<i>Relate</i>	<i>Relate</i>	this can be potentially even <i>Overlap</i> or <i>Touches</i>
Referenced In Spatial Structure	<i>Within</i>	<i>Contains</i>	like “Contained In Spatial Structure” but less strict (one element can be referenced in more than one spatial structure)
Services Buildings	<i>Relate</i>	<i>Relate</i>	relate is minimal spatial relation as it is not possible to service building with no spatial relation
Space Boundary	<i>Touches</i>	<i>Touches</i>	this can be interpreted as <i>Contains</i> / <i>Within</i> or <i>Overlaps</i> at the same time
Voids Element	<i>Within</i>	<i>Contains</i>	must be combined with “Fills” to get sensible results

Tabulka 7: Vztahy v modelu IFC s potenciálním prostorovým významem

8.5 Analýzy s využitím atributů s prostorovým významem

V modelu IFC je možné definovat pro všechny potomky objektu *IfcObject* libovolné atributy pomocí objektu *IfcProperty*. To se tedy vztahuje i na všechny již uvedené objekty, které mohou mít geometrickou reprezentaci. Atributy mohou být ve formě jednoduchých hodnot, listu hodnot, tabulky, nebo výčtu hodnot. Tyto jsou seskupeny pomocí *IfcPropertySet* do pojmenovaných skupin. Na první pohled se tedy jedná o obecné informace analogické libovolným záznamům pro GIS entity v databázi. Ve skutečnosti je zde však několik podstatných odlišností, které jsou opět způsobeny objektovým návrhem schématu. První z nich je, že hodnoty mohou mít definované jednotky.

Již ve schématu IFC jsou uvedené některé doporučené sady atributů, které mohou být definovány pro specifické objekty. Například pro objekt zdi *IfcWall* je předdefinována sada atributů *Pset_WallCommon*, z níž je část uvedena v tabulce 8. Takto předdefinované atributy znamenají, že se na ně můžeme do jisté míry spolehnout nebo že přinejmenším mohou být přítomny. Dalším případem pak jsou sady atributů definované mimo standard IFC, ale také formou otevřených

standardů. Takovým příkladem je projekt COBie (Construction Operations Building Information Exchange).

Name	Property Type	Data Type	Definition
Reference	IfcPropertySingleValue	Identifier	Reference ID for this specified type in this project (e.g. type 'A-1')
IsExternal	IfcPropertySingleValue	Boolean	Indication whether the element is designed for use in the exterior or not. If it is an external element and faces the outside of the building.
ExtendTo Structure	IfcPropertySingleValue	Boolean	Indicates whether the object extend to the structure above (TRUE) or not (FALSE).

Tabulka 8: Část atributů ze sady Pset_WallCommon

Stejně jako v případě vztahů v modelu IFC, i některé atributy mohou mít prostorový nebo geometrický význam. Jedním z nich je například atribut *IsExternal*. Pokud je tento atribut nastaven pro všechny zdi v modelu správně, je možné vytvořit jednoduchým dotazem skupinu zdí, které v podstatě reprezentují obálku budovy. To je v podstatě obdobou funkce ConvexHull z tabulky 5 a může být výhodné pro mnohé aplikace, kdy potřebujeme pouze představu o vnějším plášti budovy a nezajímají nás vnitřní objekty. V textu číslo 3 je uvedena ukázka kódu v jazyce C#, kterým bychom takové zdi obdrželi z modelu při použití nástroje xBIM. Postup by potom byl takový, že pro instanci zdi nalezneme všechny vztahy, které pro ni definují sady atributů. Z těchto sad atributů potom vybereme atribut, jehož název je „*IsExternal*“ a porovnáme, zda je nastaven na hodnotu TRUE.

```
//Select walls where property like "external" is TRUE.
IEnumerable<IfcWall> externalWalls =
model.InstancesWhere<IfcWall>(w => HasPropertyLikeExternalTrue(w));

private static bool HasPropertyLikeExternalTrue(IfcWall wall) {
    //get relations property
    IEnumerable<IfcRelDefinesByProperties> rels = wall.IsDefinedByProperties;
    foreach (var rel in rels){
        //get property set
        IfcPropertySet pSet = rel.RelatingPropertyDefinition as IfcPropertySet;
        if (pSet == null) continue;
        foreach (IfcProperty prop in pSet.HasProperties) {
            //get properties
            IfcPropertySingleValue singleVal = prop as IfcPropertySingleValue;
            if (singleVal == null) continue;
            if (singleVal.Name == "IsExternal") {
                //check value of the property
                IfcValue val = singleVal.NominalValue;
                if (val.Value is bool) {
                    if ((bool)val.Value == true) return true;
                }
                else if (val.Value is bool?) {
                    if ((bool?)val.Value == true) return true;
                }
            }
        }
    }
    return false;
}
```

Text 3: Ukázka dotazovací funkce v jazyce C# s využitím toolkitu xBIM

9 Závěr

V rámci této práce byly popsány koncepty, na kterých je postaveno modelování dat v geografických informačních systémech a v informačních modelech staveb, aby následně byla popsána specifika, ve kterých se od sebe GIS a BIM liší v přístupu k modelování, v reprezentaci a prezentaci dat a jejich využití. Pro obě domény byly představeny stěžejní mezinárodně uznávané datové standardy. Jsou to standardy zveřejňované konsorciem OGC (především SFA, GML a CityGML) pro GIS a standard IFC spravovaný asociací buildingSMART pro BIM.

Jedním z cílů této práce bylo nalézt rozdíly mezi BIM a GIS a poté především identifikovat oblasti, ve kterých je vhodné použít postupy, metody a analýzy z oblasti GIS v modelech BIM. Zároveň jsem během práce našel oblasti, ve kterých je nevyužitý potenciál na straně GIS systémů a bylo by dobré inspirovat se postupy a přístupy z oblasti BIM pro vylepšení manipulace s daty a jejich analýzy v prostředí GIS.

Prostorová data jsou součástí téměř každého projektu stavby. Při použití BIM pro postup návrhu stavby a práce s informacemi jsou navíc geometrická data doplněna cennými sémantickými vazbami definovanými při vzniku modelu a sémantickým významem jednotlivých objektů. Tyto informace jsou cenné a měly by být více používány. Za tím účelem je vhodné použít analytických přístupů běžných v GIS aplikacích. Na využití sémantické složky dat byla zaměřena i část této práce.

V oblasti GIS struktura nejběžněji používaných dat odpovídá struktuře definované ve standardu Simple Feature Access. Nespornou výhodou těchto dat je jednoduchost analýz a zpracování dat. Je však škoda, že nejsou rozšířeny systémy, které by pracovaly plnohodnotně s daty podle standardu GML a jeho aplikačních rozšíření, jako je CityGML. Použití takových objektových datových modelů by umožnilo obsáhnout v datech mnohem více ze sémantického významu modelovaných objektů. Datové struktury s takto vysokým informačním potenciálem jsou v současnosti používány spíše pro výměnu dat mezi různými systémy, ale využívají přitom pouze poměrně malé části informační kapacity datového modelu.

Vzhledem k řadě odlišností nepředpokládám, že by se časem ze všech systémů stal jeden jediný systém s jakousi totální funkcionalitou, který by dokázal automaticky odpovědět na všechny možné analytické otázky, dokázal by vyprojektovat ideální budovu podle vstupních požadavků v souladu s územním plánem a s využitím všech dostupných dat a technologií. Je pravda, že existující systémy nabírají na nové funkcionalitě, ale jak se již přesvědčili mnozí dodavatelé komplexních SW řešení, v jistém bodu dosáhne systém hranice, kdy už není udržovatelný po stránce vývoje a není ani obsluhovatelný a spravovatelný po stránce uživatelské. Totéž bude platit i pro BIM a GIS. Vždy bude třeba lidského posouzení a zkušeností.

Proto cílem této práce nebylo navrhnout systém ani jeho část, ale zaměřit se na použitelnost prostorových analýz dat, která existují a která ve stále větší míře vznikají. Modely staveb, které jsou vytvářeny s použitím nástrojů dostupných v současnosti na trhu v sobě obsahují mnohem více informací než je využíváno.

V závěru práce jsem se soustředil pouze na případ, kdy jsou analýzy prováděny uvnitř modelu budovy a není požadována integrace s dalšími druhy dat. To je sice typickým případem pro GIS aplikace, ale tyto vnitřní analýzy mohou poskytnout projektantům a architektům cenné informace o jejich práci a o vztazích mezi jednotlivými objekty.

10 Přínos práce pro praxi a rozvoj oboru

Hlavním z přínosů této práce je analýza použití sémantických vztahů, atributů a dalších informací obsažených v datovém modelu IFC pro analýzy odpovídající prostorovým analýzám stávající geometrie. Tento přístup je ojedinělý a může v mnoha případech vést k lepším výsledkům než samotné geometrické analýzy. Je tak možné analyzovat i modely, které například neobsahují žádnou geometrickou reprezentaci objektů, ale pouze topologickou strukturu modelu stavby vyjádřenou pomocí vazeb. Problematika věrnosti výsledku úzce souvisí s podrobností modelu, neboli úrovní detailu. Tímto jsem se v práci také zabýval a dospěl jsem k názoru, že sémantické vazby budou lépe odpovídat na dotazy o budově, protože vychází z úmyslů autora modelu, nikoli z prosté geometrické reprezentace objektů. Přesto ani analýzy založené na geometrické reprezentaci objektů nelze zanedbat, protože ne pro všechny vztahy existují sémantické vazby a také tyto vazby nemusí být v modelu vůbec použity. To je však především problémem konkrétních implementací v konkrétních software, nikoli problémem konceptu samotného.

Přínosem pro oblast GIS je poukázání na fakt, že existují bohaté informační zdroje o budovách, které obsahují více než geometrii a které mají o poznání složitější strukturu. Znalosti z oblasti GIS mohou být aplikovány na modely budov BIM, což může přispět ke kvalitnějšímu návrhu stavby a její optimalizaci. BIM navíc oproti GIS ukazuje, že geometrická složka informace nemusí být ta nejdůležitější a že je praktičtější navazovat popisné informace spíše na objekt jako takový, než na jeho geometrickou reprezentaci. V tom případě je pak jednoduché uchovat více různých reprezentací v závislosti na kontextu.

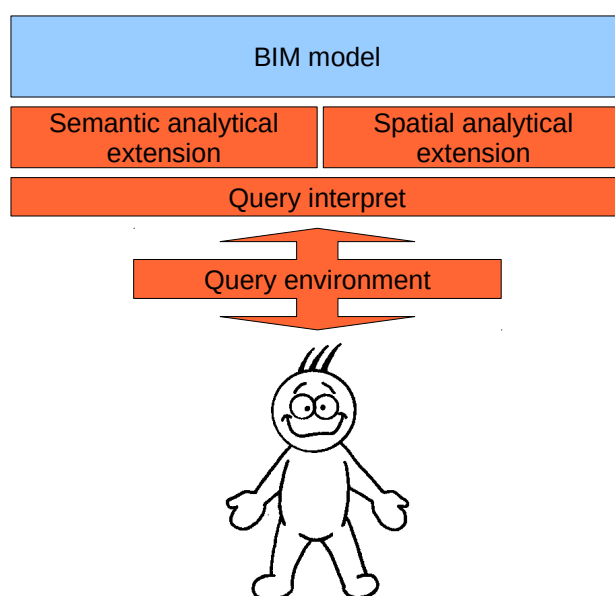
Nezanedbatelným přínosem této práce také je, že se jedná podle mých znalostí o první rozsáhlejší práci zabývající se informačním modelováním staveb v ČR. Navíc jsou zde podrobně rozebrány návaznosti na GIS, které umožní analyzovat BIM modely způsobem, který se ve stavební praxi nepoužívá, přestože by jejich použití mohlo přinést lepší pochopení prostorových i jiných vztahů v budovách a stavbách obecně. Potenciál existujících dat tak zůstává do značné míry zatím nevyužit, zvláště pak v oblasti prostorových vztahů a analýz.

Pokud jde o konkrétní produkty, tak jako výstupy této práce vznikly následující:

- Nástroj pro transformaci IFC do ESRI Shapefile®
- Transformovaný model měst Newcastle a Gateshead
- Transformovaný model některých budov kampusu Northumbria University
- Nástroj pro dotazování modelu BIM s využitím runtime kompilace
- Teoretický základ pro tvorbu dotazovacího jazyka využívajícího sémantické vztahy pro odpověď na prostorové dotazy

11 Budoucí výzkum

Na základě zkušeností z této práce bych se chtěl dále věnovat problematice analýz modelů BIM. V této práci byl položen základ pro analýzy modelů, ale pro praktické širší využití ze strany architektů a projektantů bude nutné vytvořit prostředky a prostředí pro realizaci těchto analýz. Jak uvádí Borrman v článku [65], je vhodné použít dotazovací jazyk jako formu rozhraní pro uživatele i vývojáře aplikací. Takový jazyk umožňuje sestavovat deklarativní dotazy a nezabývat se technickými podrobnostmi implementace. Prostorové dotazovací jazyky mají dlouhou tradici v oblasti GIS, ale jsou zpravidla omezené na 2D modely. Takový jazyk lze považovat za prostorový dotazovací jazyk a mimo jiné umožňuje prostorové analýzy informačních modelů BIM a extrakci jejich částí na základě specifikovaných omezení. Na obrázku 13 je znázorněn diagram jednotlivých částí systému pro poskytování analytických možností odborníkům ve stavebnictví.



Obrázek 13: Architektura vrstev pro GIS analýzy integrované do prostředí BIM

Jak je z obrázku patrné, skládal by se takový systém z dotazovacího prostředí, interpretačního článku, sémantického a prostorového rozšíření a BIM nástroje pro manipulaci s modelem. Jako dotazovací prostředí může stejně dobře sloužit grafický editor pro vytváření dotazů nebo i textový editor pro formalizovaný dotazovací jazyk.

Základním by v tomto směru byl formalizovaný deklarativní jazyk s pevně danou strukturou (jako je například SQL). Objekty použitelné v tomto dotazovacím jazyku by vycházely z datového modelu IFC, který je mezinárodním standardem v této oblasti. V první verzi by byl jazyk omezen pouze na dotazovací část (nebylo by možné data vytvářet a modifikovat). Dotazovací konstrukty pro prostorové analýzy by vycházely ze standardů OGC. Sémantické dotazy by byly zjednodušeny na úroveň, kdy je zaměnitelný atribut definovaný ve schématu IFC a atribut definovaný pomocí *IfcProperty*. Výsledkem dotazu by mohla být jednoduchá hodnota (text, číslo nebo logická hodnota), IFC objekt nebo kolekce uvedených.

Aplikační rozšíření pro sémantické analýzy by bylo použito přednostně i pro prostorové dotazy, pokud by to bylo vzhledem k povaze objektu možné, protože na komplikovaných modelech budov může být výrazně efektivnější než prostorové analýzy geometrických objektů a může často poskytnout relevantnější výsledky.

Seznam zkratek

AEC	Architecture / Engineering / Construction
API	Application Program Interface
B-Rep	Boundary Representation (geometrická reprezentace pomocí hranice)
bSA	buildingSMART Alliance
bSI	buildingSMART International
CAAD	Computer Aided Architectural Design
CAD	Computer Aided Design (navrhování s podporou počítačů)
CAM	Computer Aided Mapping
CGIS	Canadian Geographic Information System
CityGML	Geography Markup Language for City models
CSG	Constructive (Compound) Solid Geometry
DE-9IM	dimensionally extended nine-intersection model
DIME	Dual Independent Map Encoding
DDL	Data Definition Language
DML	Data Manipulation Language
ECU	Experimental Cartography Unit
GIS	Geographic Information System (geografický informační systém)
GML	Geography Markup Language
GPL	General Public License
HTML	Hypertext Markup Language
HW	hardware (fyzické vybavení počítače)
IAI	International Alliance for Interoperability
IFC	Industrial Foundation Classes
ifcXML	XML form of IFC
ISO	International Organization for Standardization
LGPL	Library General Public License
LOD	Level Of Detail
MIT	Massachusetts Institute of Technology
OGC	Open Geospatial Consortium
OGC SF	Standard Open Geospatial Consortium Simple Features
OQL	Object Query Language
SQL	Structured Query Language
SW	software (programové vybavení, počítačový program)
SF	Simple Features
TIN	Triangulated Irregular Network
UML	Unified Modeling Language
WCS	Web Coverage Service
WCS	World Coordinate System (používaný v systémech CAD)
WFS	Web Feature Service
WKB	Well Known Binary
WKT	Well Known Text
WMS	Web Map Service
WPS	Web Processing Service
xBIM	eXtensible Building Information Modelling Toolkit
XML	Extensible Markup Language
XSD	XML Schema Document

Seznam literatury

- [1] buildingSMART International Ltd. . Building SMART : International home of OpenBIM [online]. 2x3. 2006 [cit. 2011-04-24]. IFC2x3 - Final Documentation. Dostupné z WWW: <<http://buildingsmart-tech.org/ifc/IFC2x3/TC1/html/index.htm>>
- [2] Revit Architecture 2010 : Uživatelská příručka [online]. 1. United States : Autodesk, Inc., 2009 [cit. 2011-04-25]. Dostupné z WWW: <<http://usa.autodesk.com/adsk/servlet/item?siteID=123112&id=13080461>>.
- [3] Building information model based energy/exergy performance assessment in early design stages . Automation in Construction . 2009, 18, s. 153-163. [článek]
- [4] Cooperative Research Centre for Construction Innovation Level 9, L Block, QUT Gardens Point . National Guidelines for Digital Modelling . Brisbane, Australia : Cooperative Research Centre for Construction Innovation, 2009. 78 s. ISBN 978-0-9803503-0-2. [kniha]
- [5] Leadwerks Software. Leadwerks [online]. Leadwerks Corporation 3675 S Rainbow Ste 107-104 Las Vegas, NV 89103 United States : 2006 [cit. 2011-04-24]. What is Constructive Solid Geometry?. Dostupné z WWW: <<http://www.leadwerks.com/files/csg.pdf>>.
- [6] WIX , Jeffrey; CONOVER, David. Capturing and using knowledge with Building Information Modelling. -. 2009
- [7] NISBET , Nick; DINESEN, Betzy; THOMPSON, Jane. *Thinking about BIM : executive guide to building information modelling*. 1. Great Britain : British Standards Institute, 2010. 20 s.
- [8] How can GIS and BIM be integrated?. In JOHANSSON, Mikael; ROUPÉ, Mattias. *CAADRIA2010 : New Frontiers* [online]. Hong Kong : Chinese University of Hong Kong, 2010 [cit. 2011-05-08]. Dostupné z WWW: <<http://www.caadria2010.org/papers/posters/johansson.pdf>>.
- [9] ISIKDAG, Umit; ZLATANOVA, Sisi. *3D Geo-Information Sciences : Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*. Berlin : Springer-Verlag, 2009. Towards Defining a Framework for Automatic Generation of Buildings in CityGML Using Building Information Models , s. 79-96. Dostupné z WWW: <<http://www.springerlink.com>>. ISBN :978-3-540-87395-2. [část knihy]
- [10] SONG, Yonghui; WANG, Hongxia; HAMILTON, Andy. *3D Geo-Information Sciences : Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*. Berlin : Springer-Verlag, 2009. Producing 3D Applications for Urban Planning by Integrating 3D Scanned Building Data with Geo-spatial Data , s. 397-412. Dostupné z WWW: <<http://www.springerlink.com>>. ISBN 978-3-540-87395-2. [část knihy]
- [11] LONGLEY, Paul A.; GOODCHILD, Michael F.; MAGUIRE, David J. *Geographic Information Systems & Science*. 3. United States of America : Jonh Wiley & Sons, Inc., 2011. 539 s. ISBN 978-0-470-72144-5.
- [12] STEEL, Jim; DROGEMULLER, Robin; TOTH, Bianca. Model interoperability in building information modelling. *Industrialized Software : enabling sustainable software evolution* [online]. 2009, -, [cit. 2011-05-08]. Dostupný z WWW: <<http://eprints.qut.edu.au/19419/>>.
- [13] Building Information Mo National Institute of Building Sciences. *National Building Information Modeling Standard™*. USA : Facilities Information Council, 2007. 183 s.
- [14] IFC 2x3. *Industrial Foundation Classes : version 2x3*. - : BuildingSMART International, 2006. - s. Dostupné z WWW: <<http://www.iai-tech.org/ifc/IFC2x3/TC1/>>.
- [15] SMITH, Dana K. Message from the buildingSMART alliance. *Journal of Building Information Modeling*. 2010, Fall 2010, s. 9.
- [16] PRZYBYLA, John. The Next Frontier for BIM: : Interoperability With GIS. In *Journal of Building Information Modeling*. - : National Institute of Building Sciences, 2010. s. 14-18.
- [17] LAROSE, Daniel T. *Discovering Knowledge in Data : An Introduction to Data Mining*. 1. United States of America : Jonh Wiley & Sons, Inc., 2005. 222 s. ISBN 0-471-66657-2.
- [18] AGYEMAN, Julian. Just Sustainability : Lecture at Northumbria University. *-not published-*. 2011, -, s. -.

- [19] Evropská Unie. SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2007/2/ES : o zřízení Infrastruktury pro prostorové informace v Evropském společenství (INSPIRE). In *Úřední věstník Evropské unie*. 2007, L 108, s. 1-14. Dostupný také z WWW: <<http://inspire.gov.cz/dokumenty/smernice>>.
- [20] Česká Republika. úplné znění zákona č. 123/1998 Sb. : o právu na informace o životním prostředí. In *Sbírka zákonů*. 2010, 6, s. 21-30. Dostupný také z WWW: <<http://inspire.gov.cz/dokumenty/novela>>.
- [21] Česká republika. Vyhláška ze dne 30. března 2010 : o provedení některých ustanovení zákona o právu na informace o životním prostředí. In *Sbírka zákonů*. 2010, 37, 103, s. 1142 - 1154. Dostupný také z WWW: <<http://inspire.gov.cz/dokumenty/novela>>.
- [22] ESRI. File Geodatabase API - Beta. *GISCaFé* [online]. 2011, -, [cit. 2011-05-14]. Dostupný z WWW: <<http://www10.giscafe.com/goto.php?http://resources.arcgis.com/content/geodatabases/10.0/file-gdb-api>>.
- [23] Environmental Systems Research Institute, Inc. (Esri). *ArcGIS Desktop Help 9.3* [online]. Redlands, California : 2009 [cit. 2011-05-15]. Dostupné z WWW: <<http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm>>
- [24] Open Geospatial Consortium. *OGC : Making Location Count* [online]. 2011 [cit. 2011-05-16]. Dostupné z WWW: <<http://www.opengeospatial.org/ogc>>.
- [25] Open Geospatial Consortium. *OpenGIS® Geography Markup Language (GML) : Encoding Standard* [online]. 3.2.1. Wayland, USA : Open Geospatial Consortium, Inc., 27.8.2007 [cit. 2011-05-16]. Dostupné z WWW: <<http://www.opengeospatial.org/standards/gml>>.
- [26] *OpenGIS® City Geography Markup Language (CityGML) : Encoding Standard*. Wayland, USA : Open Geospatial Consortium, Inc., 2008. 218 s. Dostupné z WWW: <<http://www.opengeospatial.org/standards/citygml>>.
- [27] *OGC® KML*. Wayland, USA : Open Geospatial Consortium, Inc., 2008. 233 s. Dostupné z WWW: <<http://www.opengeospatial.org/standards/kml>>.
- [28] *OpenGIS® Implementation Standard for Geographic information - Simple feature access : Part 1: Common architecture*. Wayland, USA : Open Geospatial Consortium, Inc., 2010. 92 s. Dostupné z WWW: <<http://www.opengeospatial.org/standards/sfa>>.
- [29] *OpenGIS® Implementation Specification for Geographic information - Simple feature access : Part 2: SQL option*. Wayland, USA : Open Geospatial Consortium, Inc., 2005. 73 s. Dostupné z WWW: <<http://www.opengeospatial.org/standards/sfs>>.
- [30] *ESRI Shapefile Technical Description : An ESRI White Paper—July 1998*. Redlands, California : Environmental Systems Research Institute, Inc., 1998. 34 s. Dostupné z WWW: <www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/shapefile.pdf >.
- [31] RÁČEK, Jaroslav. *Strukturovaná analýza systémů*. 1. Brno : Masarykova univerzita, 2006. 103 s. ISBN 80-210-4190-0.
- [32] BUCKSCH, Alexander; LINDENBERGH, Roderik. CAMPINO — A skeletonization method for point cloud processing. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*. 2008, 68, s. 115-127. Dostupný také z WWW: <www.elsevier.com/locate/isprsjprs>.
- [33] WEIPING, XU, et al. Design and Implementation of 3D Model Database for General-Purpose 3D GIS. *Geo-spatial Information Science*. 2010, 13, 3, s. 210-215. ISSN 1009-5020(2010)03-210-06.
- [34] BORRMANN, A. From GIS to BIM and back abain : a spatial query language for 3Dbuilding models and 3D city models. In International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Berlin : ISPRS Commission IV – Working Group 8, 2010. s. 19-26. ISSN 1682-1750.
- [35] FURIERI, Alessandro. *Spatialite : a complete Spatial DBMS in a nutshell* [online]. 2.3.1. 2011 [cit. 2011-05-23]. Spatialite Download Page. Dostupné z WWW: <<http://www.gaia-gis.it/spatialite/>>.
- [36] Environmental Systems Research Institute, Inc. (Esri). *GIS Topology : An ESRI White Paper—July 2005*. 1. Redlands, California : ESRI, 2005. 14 s.

- [37] MANFRED EHLERS, Ihab Hijazi; UMIT ISIKDAG, Sisi Zlatanova. IFC to CityGML Transformation Framework for Geo- Analysis : A Water Utility Network Case. *Proceedings of the 4th International Workshop on 3D Geo-Information*. November 2009, -, s. 123-127. Dostupný také z WWW: <http://www.gdmc.nl/publications/2009/IFC_to_CityGML.pdf>.
- [38] HIJAZI, I. ; EHLERS, M.; ZLATANOVA, S. BIM FOR GEO-ANALYSIS (BIM4GEOA) : SET UP OF 3D INFORMATION SYSTEM WITH OPEN SOURCE SOFTWARE AND OPEN SPECIFICATION (OS).. In International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Berlin, Germany : ISPRS Commission IV – Working Group 8, 2010. s. 45-50.
- [39] OPEN CASCADE S.A.S. *Open CASCADE : Technology, 3D modeling & numerical simulation* [online]. France : 2011 [cit. 2011-05-29]. Dostupné z WWW: <<http://www.opencascade.org/>>.
- [40] THOMPSON, Emine Mine; HORNE, Margaret ; LOCKLEY, Steve ; CERNY, Martin. Towards an Information Rich 3D City Model : Virtual NewcastleGateshead GIS Integration. In *CUPUM 2011*. Kanada : CUPUM, 2011. s. ?.
- [41] WARMERDAM, Frank. *Shapelib* [online]. 2010 [cit. 2011-05-29]. Shapefile C Library V1.2. Dostupné z WWW: <<http://shapelib.maptools.org/>>.
- [42] YOUNG , P. C.; RATTO, Marco. A unified approach to environmental systems modeling. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* [online]. 2008, 23, 7, [cit. 2011-09-24]. Dostupný z WWW: <<http://www.springerlink.com/index/e0606854033344m3.pdf>>. ISSN 10.1007/s00477-008-0271-1.
- [43] SSEBUGGWAWO, Denis; HOPPENBROUWERS, Stijn; PROPER, Erik. Assessing Collaborative Modeling Quality Based on Modeling Artifacts : . In Springer. *Proceedings of the Third IFIP WG 81 Working Conference on the Practice of Enterprise Modelling PoEM 2010 Delft The Netherlands* . Berlin : Springer, 2010. s. 76-90. Dostupné z WWW: <<http://www.springer.com/business+%26+management/business+information+systems/book/978-3-642-16781-2>>. ISBN 9783642167812.
- [44] ORCHESTRA Consortium. *Orchestra : an open service architecture for risk management*. 1. EU : -, 2008. 128 s. Dostupné z WWW: <<http://www.eu-orchestra.org/docs/ORCHESTRA-Book.pdf>>.
- [45] EDWARDS, Geoffrey. Geocognostics : A new framework for spatial information theory . In HIRTLE, Stephen C.; FRANK, Andrew U. *Spatial Information Theory A Theoretical Basis for GIS*. Pennsylvania, USA : Springer, 1997. s. 455-471. Dostupné z WWW: <<http://www.springerlink.com/content/38x8q125k24u4754/>>. DOI: 10.1007/3-540-63623-4_67.
- [46] ABDUL-RAHMAN, Alias a Morakot PILOUK. *Spatial data modelling for 3D GIS*. New York: Springer, c2008, xi, 289 p. ISBN 35-407-4166-6.
- [47] Paul RAMSEY, Kevin NEUFELD a Regina OBE. *PostGIS 1.5.1 Manual* [elektronický dokument]. 1. vyd. Victoria, British Columbia, Canada, 2010, 330 s. [cit. 17.9.2012]. Dostupné z: <http://www.postgis.org>
- [48] Norwegian Strate Planning Authority. *BuildingSMART* [online]. 2006 [cit. 2011-12-07]. IFC for GIS. Dostupné z WWW: <http://www.iai.no/ifg/Content/ifg_index.htm>.
- [49] ESRI. *ESRI : Understanding our world* [online]. 2011 [cit. 2011-11-27]. ArcGIS Data Interoperability. Dostupné z WWW: <<http://www.esri.com/software/arcgis/extensions/datainteroperability/index.html>>.
- [50] BENNER, J., A. GEIGER a K. LEINEMANN. FLEXIBLE GENERATION OF SEMANTIC 3D BUILDING MODELS: 17. *Proc of the 1st Intern. Workshop on Next Generation 3D City Models* [online]. 2005, č. 1, s. 22 [cit. 2012-12-06]. Dostupné z: http://iai-typo3.iai.fzk.de/www-extern/fileadmin/Image_Archive/Bauwerke/Geo-Informationssysteme/Veroeffentlichungen/NextGeneration3DCityModels.pdf
- [51] *IEEE standard computer dictionary: a compilation of IEEE standard computer glossaries, 610*. New York, NY, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, c1990, 217 p. ISBN 15-593-7079-3. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=182763>

- [52] VLÁDA ČR. *Rada vlády pro konkurenceschopnost a informační společnost* [online]. 2012 [cit. 2013-01-06]. Dostupné z: <http://www.vlada.cz/cz/ppov/rvis/rada-vlady-pro-konkurenceschopnost-a-informacni-spolecnost-73372/>
- [53] 1037C. *Telecommunications: Glossary of Telecommunication Terms*. USA: National Communications System, 1996. Dostupné z: <http://www.its.bldrdoc.gov/fs-1037/fs-1037c.htm>
- [54] Ozel, Filiz (2000) Spatial Databases and the Analysis of Dynamic Processes in Buildings, CAADRIA 2000 [Proceedings of the Fifth Conference on Computer Aided Architectural Design Research in Asia / ISBN 981-04-2491-4] Singapore 18-19 May 2000, pp. 97-106 <http://cumincad.scix.net/cgi-bin/works/Show?1743>
- [55] BORRMANN, André; VAN TREECK, Christoph; RANK, Ernst. Towards a 3D Spatial Query Language for Building Information Models : -. In *Proc. Joint Int. Conf. of Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering* . 1. Montreal : -, 2006. s. -. Dostupné z WWW: <http://www.inf.bv.tum.de/papers/uploads/paper_0522.pdf> .
- [56] ARENS, CÄÄÄ, Jantien STOTER a Peter VAN OOSTEROM. Modelling 3D spatial objects in a geo-DBMS using a 3D primitive. *Computers*. 2005, roč. 31, č. 2, s. 165-177. ISSN 00983004. DOI: 10.1016/j.cageo.2004.05.013. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S009830040400192X>
- [57] MICROSOFT. *Microsoft Developer Network* [online]. 1. vyd. 2012 [cit. 2013-01-06]. Dostupné z: <http://msdn.microsoft.com/en-us>
- [58] VLÁDA ČR. *Rada vlády pro konkurenceschopnost a informační společnost* [online]. 2012 [cit. 2013-01-06]. Dostupné z: <http://www.vlada.cz/cz/ppov/rvis/rada-vlady-pro-konkurenceschopnost-a-informacni-spolecnost-73372/>
- [59] ELLUL, Claire a Muki HAKLAY. Requirements for Topology in 3D GIS. *Transactions in GIS*. 2006, roč. 10, č. 2, s. 157-175. ISSN 1361-1682. DOI: 10.1111/j.1467-9671.2006.00251.x. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1467-9671.2006.00251.x>
- [60] ZLATANOVA, Siyka, Alias Abdul RAHMAN a Wenzhong SHI. Topological models and frameworks for 3D spatial objects. *Computers*. 2004, roč. 30, č. 4, s. 419-428. ISSN 00983004. DOI: 10.1016/j.cageo.2003.06.004. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0098300404000202>
- [61] HUANG, Chia-Hsin, Tyng-Ruey CHUANG, Dong-Po DENG a Hahn-Ming LEE. Efficient GML-native Processors for Web-based GIS: Techniques and Tools. In: GENERAL CHAIRS, Rolf A a ACM Special Interest Group on Information Retrieval [SPONSOR. *Proceedings of the 14th annual ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems Arlington (Virginia), November 10-11, 2006*. New York, N.Y: ACM, 2006, 91 - 98. ISBN 1-59593-529-0. DOI: 10.1145/1183471.1183488. Dostupné z: <http://www.iis.sinica.edu.tw/~trc/public/publications/ACM-GIS06/ACM-GIS06HuangChuangDengLee.pdf>
- [62] SHRESTHA. *XML Database Technology and its use for GML*. Enschede, Netherlands, 2004. Dostupné z: http://www.itc.eu/library/Papers_2004/msc/gfm/shrestha.pdf. Master of Science Thesis. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede, Netherlands. Vedoucí práce Dr.Ir. R. A. de By.
- [63] EGENHOFER, MAX J. a ROBERT D. FRANZOSA. Point-set topological spatial relations. *International journal of geographical information systems*. 1991, roč. 5, č. 2, s. 161-174. ISSN 0269-3798. DOI: 10.1080/02693799108927841. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02693799108927841>
- [64] CLEMENTINI, Eliseo, Jayant SHARMA a Max J. EGENHOFER. Modelling topological spatial relations: Strategies for query processing. *Computers*. 1994, roč. 18, č. 6, s. 815-822. ISSN 00978493. DOI: 10.1016/0097-8493(94)90007-8. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0097849394900078>
- [65] BORRMANN, André a Ernst RANK. Specification and implementation of directional operators in a 3D spatial query language for building information models. *Advanced Engineering Informatics*. 2009, roč.

- 23, č. 1, s. 32-44. ISSN 14740346. DOI: 10.1016/j.aei.2008.06.005. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1474034608000542>
- [66] STOTER, Jantien a Martin SALZMANN. Towards a 3D cadastre: where do cadastral needs and technical possibilities meet?. *Computers, Environment and Urban Systems*. 2003, roč. 27, č. 4, s. 395-410. ISSN 01989715. DOI: 10.1016/S0198-9715(02)00039-X. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S019897150200039X>
- [67] BILLEN, Roland, Siyka ZLATANOVA, Pierre MATHONET a Fabien BONIVER. The Dimensional Model: a framework to distinguish spatial relationships. In: RICHARDSON, D a Peter van OOSTEROM. *Advances in spatial data handling: 10th International Symposium on Spatial Data Handling*. New York: Springer, c2002, s. 285-298. ISBN 978-3-540-43802-1. Dostupné z: http://extras.springer.com/2000/978-3-540-43802-5/Chapter_21.pdf
- [68] RANZINGER, Monika a Günther GLEIXNER. GIS datasets for 3D urban planning. *Computers, Environment and Urban Systems*. 1997, roč. 21, č. 2, s. 159-173. ISSN 01989715. DOI: 10.1016/S0198-9715(97)10005-9. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0198971597100059>
- [69] BENNER, J., A. GEIGER a K. LEINEMANN. Flexible generation of semantic 3D building models. In: *Proc of the 1st Intern. Workshop on Next Generation 3D City Models*. Bonn: Gröget/Kolbe (Eds.), 2005, s. 17-22. Dostupné z: http://iai-typo3.iai.fzk.de/www-extern-kit/fileadmin/Image_Archive/Bauwerke/Geo-Informationssysteme/Veroeffentlichungen/NextGeneration3DCityModels.pdf
- [70] MUTIS, Ivan a Raja R. A. ISSA. Framework for semantic reconciliation of construction project information. *Journal of information technology in construction*. 2012, č. 17, s. 1-24. ISSN 1874-4753. Dostupné z: http://www.itcon.org/data/works/att/2012_1.content.01683.pdf
- [71] Lambda Expressions: C# Programming Guide. MICROSOFT. *Microsoft Developer Network* [online]. 1. vyd. 2012 [cit. 2013-01-06]. Dostupné z: <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/bb397687%28v=vs.100%29.aspx>
- [72] STOTER a VAN OOSTEROM. Incorporating 3D geo-objects into a 2D geo-DBMS. In: *Proceedings of XXII FIG International Congress and the ACSM-ASPRS Conference and Technology Exhibition, April 19-26 2002*. Washington D.C., USA: -, 2002, 12 str.
- [73] D2.8.III.2_v3.0rc3. *D2.8.III.2 INSPIRE Data Specification on Buildings: Draft Technical Guidelines*. 3.0. JRC: INSPIRE Thematic Working Group Buildings, 2013. Dostupné z: http://inspire.jrc.ec.europa.eu/documents/Data_Specifications/INSPIRE_DataSpecification_BU_v3.0rc3.pdf
- [74] IDMC 004. *Information Delivery Manual: Guide to Components and Development Methods*. 1.2. -: buildingSMART International, 2010. Dostupné z: http://iug.buildingsmart.org/idms/development/IDMC_004_1_2.pdf/at_download/file
- [75] KOZEL, Jiří. <i>Kontextová mapová služba</i> [online]. 2009 [cit. 2013-07-12]. Disertační práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce Milan Konečný. Dostupné z: http://is.muni.cz/th/52087/prif_d/.
- [76] ČERNÝ, Martin. Digitální kartografi e ve Spojeném království. *Geodetický a kartografický obzor*. 2011, 57/99, č. 8, s. 207-211. DOI: (0410)371.673:528.9.
- [77] NISBETH, Nicholas, Stephen LOCKLEY, Martin ČERNÝ, Jane MATTHEWS a Graham CAPPER. Rule driven enhancement of BIM models. *EWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction: ECPPM 2012*. Europe: CRC Press, 2012, s. 297-303. ISBN 978-0415621281.
- [78] ČERNÝ, Martin, Štěpánka TOMANOVÁ, Barbora POSPÍŠILOVÁ a Rudolf VYHNÁLEK. *BIM Příručka* [CD]. Praha: Odborná rada pro BIM, 2013 [cit. 2013-11-04]. ISBN 978-80-260-5297-5. Dostupné z: www.czbim.org

