



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta stavební
Katedra geomatiky**

**Využití BIM a GIS nástrojů pro informační
modelování historických budov**

**Utilisation of BIM and GIS Tools for Historic
Building Information Modelling**

DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Pavel Tobiáš

Doktorský studijní program: Geodézie a kartografie
Studijní obor: Geodézie a kartografie

Školitel: prof. Ing. Jiří Cajthaml, Ph.D.

Praha, 2021



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

PROHLÁŠENÍ

Jméno doktoranda: Ing. Pavel Tobiáš

Název disertační práce: Využití BIM a GIS nástrojů pro informační modelování historických budov

Prohlašuji, že jsem uvedenou disertační práci vypracoval/a samostatně pod vedením školitele prof. Ing. Jiří Cajthaml, Ph.D.
Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

V Praze dne

.....
podpis

ABSTRAKT

Tato disertační práce zkoumá přínosy technologií vyvíjených pro informační modelování budov (BIM) pro tvorbu informačních modelů historických budov a integraci těchto modelů do geoprostorového kontextu 3D geografických informačních systémů (3D GIS). V práci je nejprve obecně rozebrán problém spolupráce BIM a GIS. Dále jsou popsány výsledky rešerše zaměřené konkrétně na informační modelování historických budov a procedurální modelování. Představen je přitom existující software, současné vědecké práce a používané metody. Stěžejním výstupem jsou dva pracovní postupy, které společně umožňují tvorbu jednoduchých informačních modelů historických budov v BIM, jejich integraci do GIS, správu výsledků v 3D prostorové databázi a nakonec vizualizaci v rámci procedurálně generovaných 3D webových scén okolní krajiny.

KLÍČOVÁ SLOVA

BIM, informační modelování budov, 3D GIS, geografické informační systémy, procedurální modelování, kulturní dědictví, památková péče

ABSTRACT

This doctoral thesis investigates benefits of technologies developed for building information modelling (BIM) for the creation of information models of historic buildings and the integration of such models into the geospatial context of 3D geographic information systems (3D GIS). First in the thesis, the problem of BIM and GIS cooperation in general is analysed. Furthermore, the results of a review focused specifically on historic building information modelling and procedural modelling are described. Existing software, current scientific efforts and utilised methods are introduced. The crucial output is constituted by two workflows which together enable creation of simple information models of historic buildings in BIM, their integration into GIS, management of results in 3D spatial database and finally their visualisation within procedurally generated 3D web scenes of surrounding landscape.

KEYWORDS

BIM, building information modelling, 3D GIS, geographic information systems, procedural modelling, cultural heritage, heritage preservation

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému školiteli prof. Ing. Jiřímu Cajthamlovi, Ph.D., za vedení a cenné rady a připomínky při zpracování této disertační práce a během celého doktorského studia. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a přátelům, kteří mě po celou dobu mého vysokoškolského studia podporovali.

Obsah

Úvod	11
1 Základy informačního modelování budov	13
1.1 Pojem BIM	13
1.2 Základní charakteristiky BIM	15
1.3 Standardy	17
1.3.1 Standard IFC	18
1.3.2 CityGML jako prostředník mezi BIM a GIS	20
1.4 Existující software	23
1.5 Problém spolupráce BIM a GIS	25
1.5.1 Oblasti spolupráce	25
1.5.2 Překážky spolupráce	27
2 Současné snahy o informační modelování historických budov	29
2.1 Práce zaměřené na 3D modelování	29
2.2 Práce zaměřené na správu a využití dat	32
3 Úvod do procedurálního modelování	35
3.1 Tvarová gramatika CGA	35
3.2 Historie CGA	36
3.3 CGA tvar	37
3.4 CGA pravidlo	37
3.5 Tvarové operace	38
3.6 Větvení pravidel	41
3.7 Implementace CGA – program CityEngine	42
3.8 Využití procedurálního modelování v praxi	43
4 Postup tvorby informačního modelu historické budovy – teoretická část	45
4.1 Požadavky na informační model	45
4.2 Volba vhodných nástrojů	48
4.3 Tvorba modelu	50
4.4 Integrace do GIS pro účely správy modelu	51
5 Procedurální modelování historické krajiny a objektů	55
5.1 Zdrojová data a jejich zpracování	55
5.2 Příprava 3D scény	58

5.3	Procedurální a CAD modelování	62
5.4	Výsledky	67
6	Tvorba informačního modelu historického objektu	71
6.1	Použitý software	71
6.1.1	Komerční BIM – Autodesk Revit	72
6.1.2	Levnější alternativy – Edificius a SketchUp	75
6.1.3	GIS software	77
6.2	Modelování v BIM	78
6.2.1	Příprava zdrojových dat	79
6.2.2	Parametrické modelování	79
6.2.3	Souřadnicové umístění	90
6.2.4	Alternativní postup modelování – Trimble SketchUp	91
6.3	Převod do GIS prostředí	92
6.3.1	Import	92
6.3.2	Úprava tříd a atributů	93
6.3.3	Materiály, texturování a opravy modelu	95
6.3.4	Oprava souřadnicového umístění	98
6.3.5	Vizualizace	100
7	Diskuze	103
7.1	Shrnutí pracovního postupu a výsledků	104
7.2	Porovnání s požadavky na informační model	108
7.3	Rozdílné přístupy k 3D modelování	110
7.4	Přínosy navrhovaného postupu	113
	Závěr	115
	Použité zdroje	117
	Seznam obrázků	129
	Seznam tabulek	131
	Seznam příloh na CD	133

Úvod

Pro účely správy a údržby historických památkových budov je zásadně důležitá dostupnost komplexních informací o daném objektu. Proto je nutno sloučit množství různých dat z různých zdrojů a v různých formátech a vytvořit jednotný informační systém, který by postihoval všechny důležité fyzické a funkční charakteristiky zájmové budovy. Potřebná data přitom mohou být značně různorodá – jedná se o textové i grafické historické dokumenty, plány, mapy, ale i o současná data ze stavebněhistorických průzkumů a geodetických zaměření budovy, fotografie atd. Vzhledem k tomu, že mají architektonické památky ze své podstaty trojrozměrný prostorový charakter, je vhodné, aby výsledný informační systém, který všechny uvedené dokumenty sloučí, umožňoval správu 3D modelu budovy. I to však nemusí být dostatečné, protože pro zachycení změn v čase potřebujeme 4D reprezentaci památky.

V současné době je většinou dokumentace památek vedena ve formě 2D výkresů, ať už v papírové nebo digitální podobě. Tyto výkresy často obsahují pouze geometrické prvky bez sémantiky a definice vztahů mezi jednotlivými objekty. Pro účely správy památky a plánování rekonstrukcí by přitom byla vhodná možnost prohlížet budovu ve virtuálním 3D prostředí a provádět prostorové a multikriteriální dotazy. K tomuto účelu je nutno znát strukturu budovy, tedy vzájemné vztahy mezi architektonickými elementy, integrovat různorodé zdroje dat a vytvořit sémantický model budovy.

Tvorba informačních modelů budov (BIM) se v současné době rozvíjí hlavně v oblasti návrhu a výstavby nových budov (as-designed BIM). BIM nástroje však mohou být využity také pro tvorbu modelů již existujících staveb (as-built BIM). Kromě klasických BIM nástrojů a přístupů používaných ve stavebnictví lze v rámci informačního modelování budov využít také prostředky geografických informačních systémů (GIS). GIS byl sice dříve určen hlavně pro modelování rozsáhlejších oblastí a 2D reprezentaci objektů, propracované možnosti uchování modelu v databázi, definice vzájemných vztahů, možnost vytváření atributových a prostorových dotazů a stále se zlepšující schopnosti 3D reprezentace z něj ale mohou dělat vhodný nástroj i pro správu modelu historické budovy.

S ohledem na uvedené si tato disertační práce klade následující cíle:

- Prozkoumat vztah informačního modelování budov a geografických informačních systémů *obecně*.
- Provést rešerši vědeckých prací využívajících BIM, GIS nebo jejich kombinaci pro informační modelování *historických* budov.

- Představit existující softwarová řešení využitelná pro danou problematiku.
- Na základě předchozí rešerše navrhnout pracovní postup pro tvorbu jednoduchých informačních modelů památkových budov s využitím BIM a GIS.

V textu disertační práce budou nejprve s využitím existující odborné literatury shrnuty současné poznatky o informačním modelování budov a zejména o vztahu tohoto odvětví s GIS. V první kapitole bude představen pojem BIM, současné standardy v této oblasti, přehled existujícího softwaru a obecně současný stav spolupráce BIM a GIS. Ve druhé kapitole se práce bude zabývat především modelováním historických budov a představí současné snahy ve světě a používané metody. Ve třetí kapitole bude pozornost věnována také teorii procedurálního modelování architektury, které se uplatní v našem případě zejména pro 3D rekonstrukci zastavěné krajiny v okolí zájmových historických staveb, tedy pro tvorbu geoprostorového kontextu informačního modelu. Na základě rešerše z prvních tří kapitol následně práce v kapitole čtvrté shrne teoreticky předpokládaný postup tvorby informačního modelu památkového objektu, tedy volbu vhodných nástrojů i postup 3D modelování a definuje požadavky na model a na výsledný informační systém, ve kterém bude informační model integrován.

Zatímco předchozí kapitoly měly spíše teoretický ráz, pátá a šestá kapitola jsou již zaměřeny na praktickou aplikaci poznatků z rešerše a zaměřují se na dva pracovní postupy, které, pokud jsou využity společně, mají jako výsledek jednoduchý informační model historické budovy integrovaný v GIS a prezentovaný v rámci 3D modelu okolní situace. Konkrétně pátá kapitola je zaměřena na procedurální modelování zastavěné krajiny a konečně kapitola šestá na samotnou tvorbu informačního modelu historické budovy, kdy je nejprve podrobněji představen použitý software, vybraný na základě rešerše, a dále je popisována praktická aplikace předpokládaného postupu tvorby modelu včetně jeho nasazení při 3D rekonstrukci vybraného prototypového objektu. Poznatky získané během testování jsou souhrnně rozebrány v následné diskuzi, kde je také popsán soulad, případně odlišnosti mezi teoretickými požadavky na model a výsledkem vzniklým na základě představeného pracovního postupu. Nakonec závěr poznatky shrnuje a nabízí oblasti, které by bylo vhodné rozvinout v dalším výzkumu.

1 Základy informačního modelování budov

1.1 Pojem BIM

Termín BIM je ve stavebnictví používán teprve od roku 2002 [1]. Tato zkratka bývá interpretována jako Building Information Model, Building Information Modeling nebo také Building Information Management. Přitom záleží na tom, je-li slovo *building* ve zkratce chápáno jako jednotlivá budova nebo jako komplexní stavební proces (v tom případě může být přesnější pojem Building Information Management, např. v USA je potom v podobném smyslu používán pojem VDC – Virtual Design and Construction [2]). Důležité je také upozornit na to, že informační modelování je možno využít jak pro budovy (tedy pro pozemní stavitelství), tak pro dopravní stavby, vodohospodářství i stavitelství speciální [1]. Proto se v češtině nabízí termín *informační modelování staveb*, které používá v disertační práci Černý [3]. Úvodní oficiální příručka Odborné rady pro BIM (CzBIM¹) však používá termín *informační modelování budov* a proto bude tento název používán dále v textu. BIM (jako proces) může být definován jako nový způsob vytváření, sdílení, výměny a správy informací v průběhu celého životního cyklu stavby (návrh, konstrukce, užívání, správa a údržba, renovace nebo demolice) [4]. Definice BIM dle CzBIM je možno nalézt na obr. 1.1. Další nalezené definice podle [4] jsou uvedeny níže.

Dle NBIMS² (The National BIM Standard-United States) je BIM:

„Digitální reprezentace všech fyzických a funkčních charakteristik budovy. BIM je zdroj sdílených informací o stavbě, vytvářející spolehlivou základnu pro rozhodování v průběhu jejího životního cyklu od prvotního záměru až k její likvidaci.“

AGC³ (Associated General Contractors of America) definují BIM jako:

„Datově bohatou, objektově orientovanou, inteligentní a parametrickou digitální reprezentaci stavby, ze které mohou být získána data vhodná pro potřeby různých uživatelů. Tato data potom mohou být využita pro rozhodování a zdokonalení procesu dodávání stavby.“

Nakonec je možno uvést například výklad CRC (Cooperative Research Centre) for Construction Innovation⁴

„BIM je trojrozměrná databáze navržená speciálně pro stavební objekty. BIM zahrnuje digitální popis budovy se všemi náležitostmi, které přispívají k její funkčnosti,

¹<http://www.czbim.org/>

²<http://www.nationalbimstandard.org/>

³<http://www.agc.org/>

⁴http://www.construction-innovation.info/images/pdfs/SOH-FH_Fact_Sheet_2.pdf

Building Information Model / BIM model (digitální reprezentace, soubor)

sdílená digitální reprezentace fyzikálních a funkčních vlastností jakékoliv stavby (budovy, mostu, silnice apod.), která poskytuje základ pro rozhodování

Building Information Modelling / BIM, resp. BIM proces

je proces tvorby a použití digitální reprezentace budovy – virtuálního modelu budovy/stavby. Výsledkem sestavení modelu je sdílená znalostní databáze podporující rozhodovací procesy od nejrannějších fází návrhu, přes projekci, provádění stavby až po správu během používání stavby a případnou demolici.

Building Information Management / BIM

BIM přímo či nepřímo ovlivňuje všechny účastníky stavebního procesu. BIM mění tvorbu, používání a sdílení údajů o stavebním díle po celou dobu životnosti díla. BIM je digitální systém a sada otevřených standardů podporujících spolupráci během životního procesu stavby. Zahrnuje 3D (vizualizaci), 4D (čas a plánování) a 5D (finanční odhady a plánování) údajů, které slouží jako společný, centrálně uložený zdroj informací od fáze návrhu až do případné demolice. Kombinace standardizovaných informací a facility managementu umožňuje odhadovat dopady a celkové náklady vlastnictví stavby. Rozšíření BIM na všechny části stavby v průběhu životního cyklu fáze vyžaduje standardizované procesy, taxonomii a datové struktury. Je požadována interoperabilita a standardizovaný obsah na všech úrovních podrobnosti od stavebních modelů pro systémy, subsystemy, součásti i jednotlivé prvky.

Obr. 1.1: Definice BIM dle [1]

jako je klimatizace, údržba, úklid nebo rekonstrukce, včetně popisu vztahů mezi těmito jednotlivými náležitostmi.“

V [4] jsou dále současné definice informačního modelování shrnuty a jsou uvedeny následující charakteristiky informačního modelu budovy:

1. Je objektově orientovaný: Většina BIM modelů má objektově orientovaný charakter.
2. Je otevřený/nezávislý na dodavateli softwaru: Otevřenost je velmi důležitá charakteristika BIM modelů, protože jsou vyvíjeny pro výměnu a sdílení informací.
3. Umožňuje interoperabilitu, tedy výměnu dat mezi různými aplikacemi.
4. Je datově bohatý/komplexní, protože reprezentuje všechny fyzické a funkční charakteristiky budovy.
5. Je rozšiřitelný.
6. Je trojrozměrný: Reprezentace budov v BIM je vždy trojrozměrná.
7. Zahrnuje různé fáze životního cyklu: Objekty modelu mohou být zachyceny v různých stavech dle různých fází životního cyklu budovy, což umožňuje N-rozměrné modelování.

8. Obsahuje prostorové vztahy: Prvky budovy jsou hierarchicky uspořádány a tak jsou uchovány prostorové vztahy mezi nimi.
9. Je bohatý na sémantiku: V BIM modelu je uchováno velké množství sémantických informací, tedy informací o funkci prvků budovy.
10. Umožňuje generování pohledů na model: Pohledy na model (Model Views) jsou podmnožiny, které mohou být generovány ze základního informačního modelu.
11. Modely mohou být ukládány, sdíleny a vyměňovány: Jedna ze základních charakteristik informačního modelu budovy. Modely mohou být uloženy ve formě souborů nebo v databázi a ve formě souborů mohou být vyměňovány mezi uživateli.

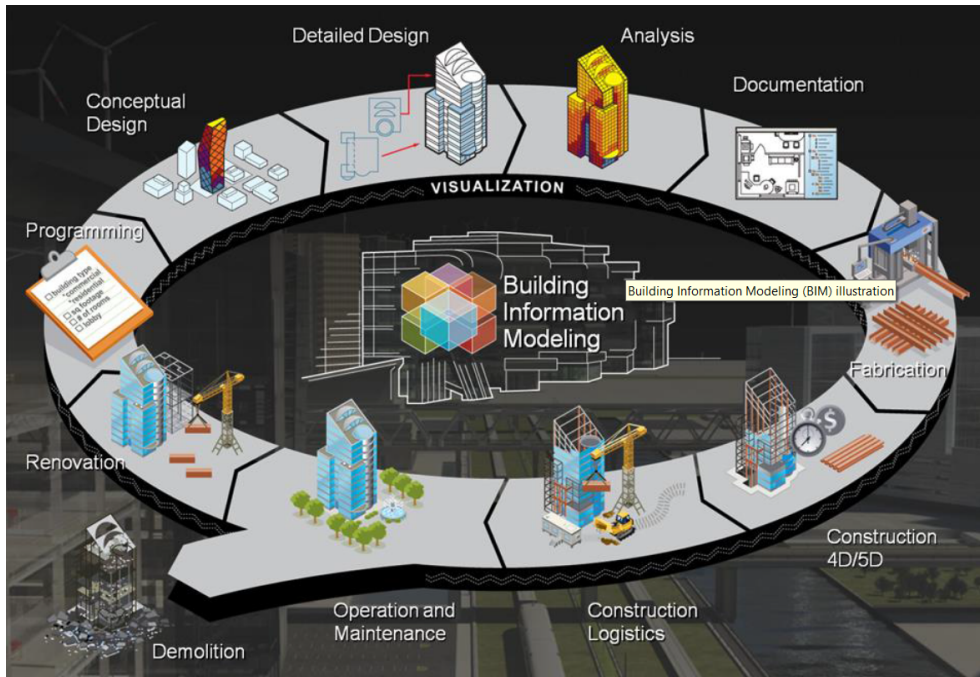
1.2 Základní charakteristiky BIM

Z uvedených definic je tedy patrné, že informační model budovy je informační databáze, která obsahuje data o budově od návrhu přes výstavbu, správu a užívání až po její rekonstrukci či demolici, tedy veškeré informace o budově během celého jejího životního cyklu. Informační modelování budov je potom komplexní proces uchovávání, sdílení a výměny informací o stavbě. Tohoto procesu by se měli účastnit (tedy přispívat do modelu/databáze) všichni účastníci stavebního procesu (tj. architekt, projektant, rozpočtář...). Pokud by některý z účastníků model nepoužíval, efektivita informačního modelování by tím byla výrazně snížena [1].

Tvar a rozměry budov jsou v BIM vždy popisovány trojrozměrně. Na druhou stranu je důležité, že informační model budovy není jen samotný 3D model, tedy 3D geometrie. Geometrický model je pouze jedním z více způsobů reprezentace uložených informací. Například [5] uvádí, že 3D geometrie je u objektů modelu pouze jednou z vlastností na stejné úrovni jako je název dodavatele nebo údaje o ceně. Geometrický model je určitě důležitý pro projektanta, který vytváří návrh budovy v CAD softwaru. Naopak rozpočtář využije raději tabulkového procesoru a bude pracovat s podmnožinou dat, které se týkají podlahové plochy, nákladů na vyhotovení nebo harmonogramu výstavby [1].

BIM může tedy být chápán jako objektové parametrické modelování stavby. Parametry mohou obsahovat:

- konstrukční a materiálové vlastnosti prvků,
- pozice v harmonogramu výstavby,



Obr. 1.2: Životní cyklus stavby [2]

- harmonogram kontrol a výměn,
- investiční a provozní náklady.

Pomocí parametrů lze vytvořit komplexní model skutečného objektu, který může být využit pro přípravu stavby a její realizaci a dále pro správu stavebního objektu a analýzy. Simulace a analýzy, které lze provádět s výsledným modelem se týkají různých profesí spolupracujících na návrhu budovy a mohou být zaměřeny například na:

- výpočty statického a dynamického chování stavebního objektu,
- analýzy vlivu stavebního objektu na jeho okolí a životní prostředí,
- energetickou náročnost,
- certifikaci staveb,
- výpočet velikosti uhlíkové stopy.

Cílem informačního modelování je dosáhnout vyšší úrovně připravenosti objektu před zahájením vlastní výstavby. Toho může být dosaženo větší koordinací mezi profesemi, kdy mohou být případné kolize řešeny již ve fázi návrhu.

Z definic na obr. 1.1 také vyplývá, že BIM umožňuje N-rozměrné modelování staveb. Za čtvrtý rozměr modelování jsou zde považovány časové informace. Časový rozměr BIM umožňuje vizualizovat projekt v prostoru a čase a tím zabránit kolizím při provádění staveb i z pohledu času a pořadí. Pátým rozměrem potom mohou být informace o ceně. Jiné atributy, jako jsou například energetická náročnost nebo údaje pro facility management, potom mohou tvořit ještě další „rozměry“ BIM [1].

1.3 Standardy

Dnešní BIM standardy jsou pokročilými následovníky výměnných formátů, jako je například formát DXF. Vzhledem k tomu, že se stavebního procesu účastní velké množství profesí, kdy každé jednotlivé odvětví využívá svůj specifický software, je definování společného výměnného formátu velmi důležité. Nejvíce zmiňovanými BIM standardy jsou v současnosti Industry Foundation Classes (IFC) a CIMSteel Integration Standards (CIS/2), které jsou definovány s využitím jazyka EXPRESS, součástí standardu STEP (STandard for the Exchange of Product model data) [4, 6]. Pokud bychom se nezabývali pouze geometrickým modelem, může být dalším standardem v oblasti informačního modelování budov COBie (Construction Operations Building Information Exchange), což je formát vyvinutý americkou armádou (United States Army Corps of Engineers), který se soustředí na zaznamenání dodavatelských dat, ne na geometrii a je využíván hlavně pro správu budov [2].

Vzhledem k tomu, že tato kapitola bude dále obsahovat rozbor vztahu BIM a GIS, je nutno připomenout také současné GIS standardy pro ukládání 3D dat. Ty jsou často založeny na značkovacím jazyku XML. Jako první je možno zmínit formát COLLADA, který byl společně s OGC (Open Geospatial Consortium) standardem KML (Keyhole Markup Language) využíván pro 3D modely v Google Earth (v rámci KMZ souborů) a v Trimble SketchUp. Dalším OGC standardem je potom GML (Geography Markup Language), značkový jazyk geografie, v ČR norma ČSN EN ISO 19136. Aplikační schéma tohoto standardu ve verzi GML3 určené pro modely měst je nazýváno CityGML. Standard CityGML je často využíván jako meziklánek při převodu BIM (IFC) modelů do geoprostorového kontextu. Nakonec formát ESRI Shapefile je po uvolnění dokumentace v roce 1998 hojně využíván v celé řadě GIS nástrojů, takže ho lze nazvat de-facto standardem [5].

1.3.1 Standard IFC

IFC (Industry Foundation Classes) je otevřený formát a datový model, který je spravovaný organizací buildingSMART International⁵. Rozhodnutí o vytvoření otevřeného standardu pro podporu interoperability v oblasti AEC (Architecture, Engineering, Construction) přijalo 12 společností z USA v roce 1994, v roce 1995 z tohoto společenství vznikla asociace International Alliance for Interoperability (IAI), dnešní buildingSMART International. Prvním standardem této asociace byl v roce 1997 právě standard IFC. Od roku 2005 je formát IFC popsán v rámci normy ISO 16739. Softwarové nástroje v současnosti podporují zejména verzi 2x3 TC1. Zveřejněna byla také nová verze IFC4, která by měla odstranit mj. nedostatečnou definici lokálního souřadnicového systému. V současné době ale není verze IFC4 zatím příliš podporována [1, 3, 4, 5]

Model může být v rámci IFC popsán kromě výše uvedené reprezentace s využitím jazyka EXPRESS také pomocí XML, kdy je reprezentace definována XSD schématem. XML implementace IFC je nazývána ifcXML. Jak EXPRESS, tak XML popis modelu je uložen v textové, člověkem čitelné podobě. Pro zmenšení objemu dat je k dispozici komprimovaný formát ifcZIP.

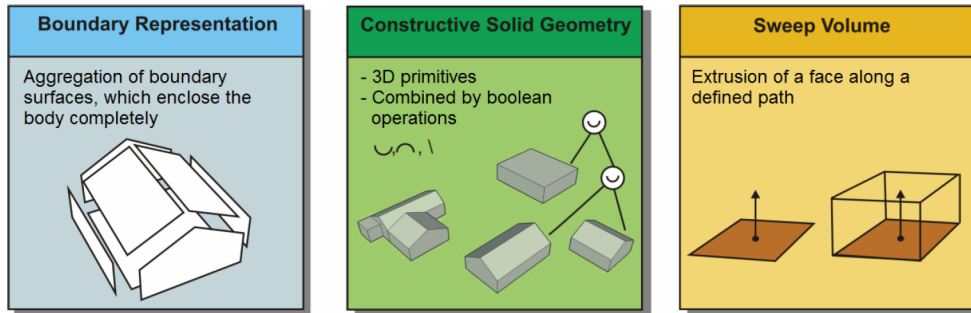
Nejčastějšími formami ukládání geometrie v IFC jsou CSG (Constructive Solid Geometry) a swept geometry (sweep volume, sweeping). V případě využití CSG jsou objekty vytvořeny z geometrických primitiv (koule, válec, kužel, krychle...). Tyto základní elementy jsou spojeny pomocí booleovských operátorů (sjednocení, rozdíl, průnik). Sada operací, které jsou potřebné k vytvoření finálního tvaru, je potom vyjádřitelná pomocí stromové struktury.

Swept geometry (tažená geometrie) je geometrie, která je definovaná pomocí dvourozměrného profilu a trajektorie. Výsledné těleso je vytvořeno pohybem profilu po trajektorii, přičemž se buď může jednat o prosté vytažení, nebo o rotaci, kdy je trajektorie definována osou a úhlem. Oba způsoby popisu se vyznačují tím, že je geometrie ukládána implicitně, tedy pouze pomocí parametrů. Před vlastním zobrazením geometrie je tedy nutno použít parametry a vizualizované těleso sestrojít.

Poslední možností geometrické reprezentace v IFC je ještě B-Rep (Boundary Representation, reprezentace hranic), kdy jsou trojrozměrné objekty ohraničeny plochami, které objekt plně uzavírají a tvoří hranici mezi vnitřkem a vnějškem. B-Rep je jediný způsob reprezentace, který je používán také v GIS (viz 1.3.2) [6].

UML diagram pro nás nejdůležitějších tříd v IFC je na obrázku 1.4. Základní třídou je zde IfcObject, který může být rekurzivně rozložen na další IfcObjecty. Dále můžeme v IFC rozlišit dva základní druhy elementů:

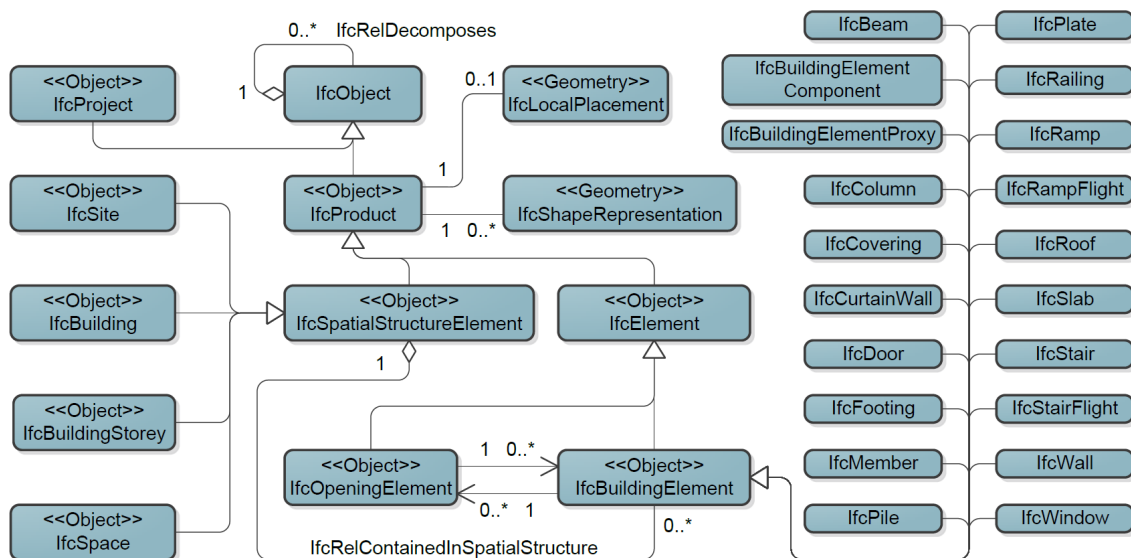
⁵<https://www.buildingsmart.org/>



Obr. 1.3: Možnosti reprezentace geometrie v IFC [6]

- elementy prostorové struktury (IfcSpatialStructureElement) – Stavba (IfcSite), Budova (IfcBuilding), Podlaží (IfcBuildingStorey) a místnost (IfcSpace),
- stavební elementy (IfcBuildingElement) – například stěny, sloupy, dveře, okna...

V rámci kterého objektu prostorové struktury se stavební element nachází je potom definováno vztahem IfcRelContainedInSpatialStructure. Souřadnice počátku a orientace lokálního souřadnicového systému WCS (viz 1.5.2) v globálním souřadnicovém systému WGS 84 jsou definovány jako atribut stavby, tedy objektu třídy IfcSite. Důležité je, že ani elementy prostorové struktury, ani stavební elementy nemusí mít definovanou geometrii. Model tedy může být pouze sémantický. Na druhou stranu ale objekty mohou mít libovolný počet reprezentací (bod, Bounding Box, B-Rep, CSG), které závisí na kontextu náhledu na model. To souvisí s důrazem na sémantické objekty modelu, kdy je geometrie jen jednou z možností popisu. [3, 6].



Obr. 1.4: Částečný UML diagram IFC [6]

Informační model budovy obsahuje velké množství informací, z nichž jen malá část je potřebná pro konkrétní aplikace. Protože je zbytečné, aby aplikace pracovaly s informacemi mimo svůj obor, je možné definovat pohledy na model (Model View Definiton). Pohled na model je podmnožina základního informačního modelu. Nejrozšířenějším pohledem na model je Coordination View, který podporuje většina softwarových nástrojů pro návrh budov. Jedná se o pohled, který slouží pro koordinaci projektů, tedy pro kontrolu návaznosti jednotlivých stavebních odvětví [3, 4].

1.3.2 CityGML jako prostředník mezi BIM a GIS

CityGML je otevřený formát a datový model založený na XML využitelný pro ukládání a výměnu virtuálních 3D modelů měst. Jedná se o aplikační schéma GML3. Původně byl vyvíjen společenstvím SIG3D (Special Interest Group 3D GDI-DE⁶). První úspěšná implementace CityGML proběhla v roce 2005 v rámci projektu Pilot 3D. V roce 2008 se CityGML stalo převzatým standardem OGC a je nadále spravováno touto organizací. Nejnovější stabilní verzí je v současné době CityGML 2.0, přičemž je v přípravě verze 3.0⁷. Dle [7] je v současné době standard využíván pro modely měst v těchto zemích: Německo (Berlín, Drážďany, Mnichov), Francie (Paříž, Lille, Nantes, Marseille), Nizozemsko, Monako, Švýcarsko (Curych, Ženeva), Dánsko, Turecko (Istanbul), Katar, Japonsko (Jokohama), Malajsie.

Na rozdíl od modelů měst v jiných 3D formátech CityGML obsahuje kromě geometrie také sémantický model. Standard tedy pro nejdůležitější objekty ve městech definuje geometrii, topologii, sémantiku i vzhled. Vzhledem k tomu, že se jedná o aplikační schéma, využívá CityGML geometrický model GML3. Tento model je založen na normě ISO 19107 Geographic information – Spatial schema a ukládá geometrii pomocí reprezentace hranic (B-Rep). Využívána je pouze část modelu GML3, který je naopak rozšířen o koncept implicitní reprezentace geometrie prvků (prototypy pro opakující se objekty se stejným tvarem). Geometricko-topologický model GML využívá následující geometrická primitiva:

- 0D – Bod (Point),
- 1D – Křivka (Curve),
- 2D – Plocha (Surface),
- 3D – Solid.

⁶GeoDaten Infrastruktur Deutschland

⁷<http://www.citygml.org/>

Jednotlivá primitiva jsou ohraničena primitivy nižších řádů – 3D solid je ohraničen plochami, plocha je ohraničena křivkami. Křivka v CityGML musí být vždy přímkou, plocha musí být vždy rovinná.

Model CityGML se skládá ze dvou hierarchií, sémantické a geometrické. Na sémantické úrovni jsou entity reálného světa reprezentovány objekty, jako je budova, zeď, okno, místnost atd. Jejich popis obsahuje atributy, relace i agregační hierarchie mezi objekty, takže je možno vztahy mezi objekty odvodit i bez geometrie. Na prostorové úrovni je objektům přiřazena geometrie, která reprezentuje jejich prostorové umístění a tvar.

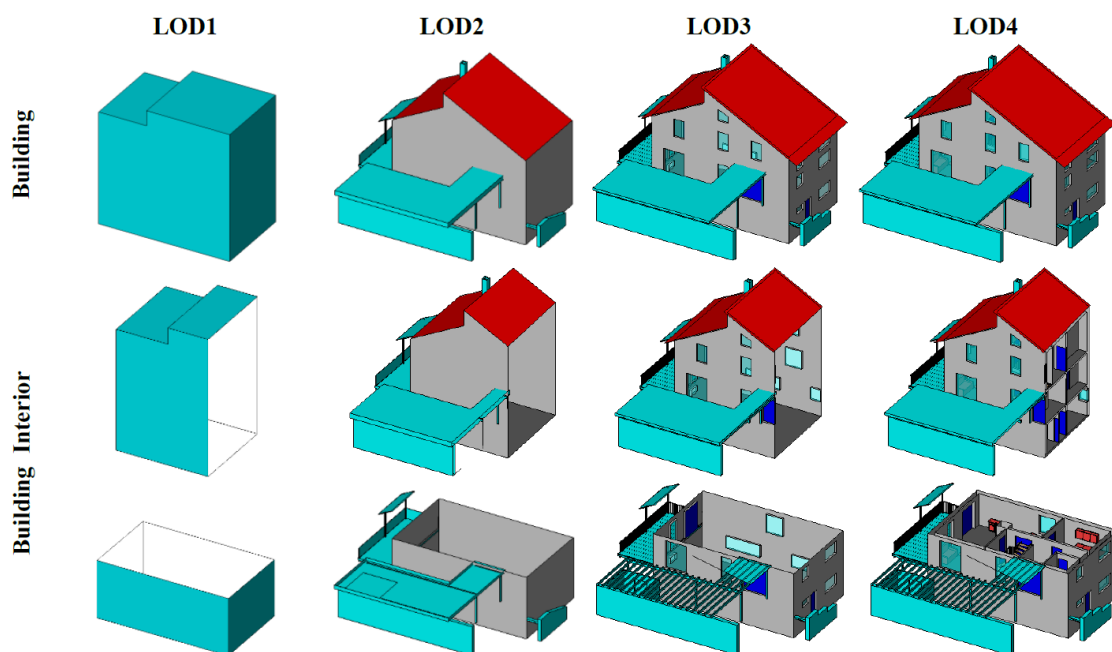
Různé aplikace CityGML vyžadují různou podrobnost modelu města. Proto zde byl zaveden pojem úrovní podrobnosti LOD (Level of Detail). V CityGML datasetu může mít jeden objekt více geometrických reprezentací, jednu pro každý LOD. To umožňuje vizualizovat model města a provádět analýzy v různém stupni rozlišení.

Level of Detail 0 je 2,5D digitální model terénu, který může být vizualizován s využitím mapy nebo leteckého snímku. Z hlediska velikosti zobrazovaného území může být LOD0 využit pro rozsáhlejší oblasti. Budovy, na nichž je koncept LOD nejlépe patrný, jsou reprezentovány pouze půdorysy nebo polygony hran střech. LOD1 je určen pro oblasti velikosti města. Budovy jsou reprezentovány krabicovým modelem, tedy jako hranoly s plochými střechami. V LOD2 jsou potom rozlišeny struktury střech a ohraničující plochy budov jsou tematicky rozlišené (např. zeď, střecha...). V LOD3 jsou budovy reprezentovány jako podrobné architektonické modely včetně otvorů, tedy oken a dveří. Nejpodrobnější LOD4 přidává i reprezentaci interiérů budov.

Ve standardu CityGML je pro jednotlivé úrovně podrobnosti definována také úroveň generalizace, tedy minimální rozměry modelovaných objektů, a přesnost (absolutní přesnost – směrodatná odchylka 3D souřadnic bodů). Uživatel, který obdrží CityGML dataset v konkrétním LOD, si tedy může jednoduše udělat představu o tom, jakou kvalitu dat může očekávat.

Každý objekt může mít tedy více reprezentací dle LOD. Kromě toho je možné definovat generalizační vztahy mezi jednotlivými objekty. Těch může být využito v případě, že bude několik různých objektů po generalizaci v nižším LOD sloučeno do jednoho [7, 8, 9, 10, 11].

Další zajímavou vlastností datového modelu je modularizace. Aplikace, která implementuje CityGML nemusí podporovat všechny tematické oblasti modelu a může tedy využít pouze podmnožinu standardu dle svého zaměření. Aby byla umožněna částečná implementace, je standard modulární. Dolní mezí implementace je



Obr. 1.5: Podrobnost modelu budovy dle různých LOD [7]

CityGML *Core* modul, který musí být implementován vždy. Většina aplikací potom bude implementovat profil CityGML, tedy kombinaci *Core* modulu a jednoho či více modulů tematických. Tematických modulů je v současné verzi 2.0.0 třináct: *Appearance*, *Bridge*, *Building*, *CityFurniture*, *CityObjectGroup*, *Generics*, *LandUse*, *Relief*, *Transportation*, *Tunnel*, *Vegetation*, *WaterBody*, *TexturedSurface*.

Pro vytváření doplňků k datovému modelu CityGML je k dispozici mechanismus Application Domain Extension (ADE). Rozšíření může zahrnovat nové vlastnosti existujících tříd (jako je například počet obyvatel budovy), ale také definici nových objektových typů. Každé rozšíření musí být definováno vlastním XSD dokumentem [7]. V současné době existují například rozšíření:

1. Noise (pro analýzy hlukového znečištění) [12],
2. Hydro (pro povodňové analýzy) [13],
3. CAFM (facility management) [14],
4. GeoBIM (pro kombinaci informací z IFC a CityGML) [15],
5. Utility Network (modelování inženýrských sítí) [16],
6. Immovable Property Taxation (daňové účely) [17].

Kromě implementace ve formě fyzického souboru GML je koncept CityGML v současné době implementován také jako databázové schéma. To je vyvíjeno TU Berlin (Technische Universität Berlin) pro databázi Oracle Spatial pod názvem 3D City Database⁸. K dispozici je aplikace pro čtení a zápis CityGML dokumentů a pro export souborů KML a COLLADA. Technickou univerzitou v Berlíně je vyvíjena také knihovna a API v jazyce Java citygml4j⁹, která umožňuje čtení, zpracování a zápis souborů CityGML. Konverzní nástroj FME¹⁰ (Safe Software), který je také součástí rozšíření ArcGIS Data Interoperability¹¹ umožňuje zápis i čtení CityGML. Plně kompatibilní s CityGML by měl být také například software Bentley Map¹². Pro prohlížení CityGML je možno použít například freeware nástroje: Aristoteles, LandXplorer CityGML Viewer nebo FZKViewer¹³ [5, 7].

1.4 Existující software

Informační modelování budov je dlouhodobý proces, který v ideálním případě postihuje budovu v průběhu celého jejího životního cyklu. Přitom se na tvorbě modelu podílí celá řada zainteresovaných subjektů, tedy odborníků z různých odvětví architektury a stavitelství. Proto není s podivem, že neexistuje jediná komplexní BIM aplikace, ale proces informačního modelování je spíše založen na sdílení či výměně dat mezi jednotlivými odborníky, kdy každý z nich používá svůj specializovaný software.

Přehled nejvýznamnějších softwarových nástrojů je uveden v tabulce 1.1. Současný BIM software lze přitom dle [18] rozdělit do tří kategorií:

1. nástroje pro tvorbu 3D modelu,
2. aplikace pro prohlížení a kontrolu modelu,
3. analytický software.

Dále je nutno doplnit nástroje, které nejsou v tabulce uvedeny a které jsou přitom nezbytné pro management informací o nejdelsí části životního cyklu budovy, tedy pro její užívání. Jedná se o software pro facility management, jako je ArchiBUS nebo Graphisoft ArchiFM, a konečně také o GIS nástroje, tedy například ESRI ArcGIS.

⁸<https://github.com/3dcitydb>

⁹<https://github.com/citygml4j>

¹⁰<http://www.safe.com/fme/>

¹¹<http://www.esri.com/software/arcgis/extensions/datainteroperability>

¹²<https://www.bentley.com/cs/products/brands/opencities-map>

¹³http://www.citygmlwiki.org/index.php/Free_Software

Tab. 1.1: Dostupné nástroje pro informační modelování budov (upraveno z [18])

Název produktu	Výrobce	Využití v BIM	Primární funkce
Revit Architecture	Autodesk	vytváření a prohlížení 3D modelů	architektonické modelování, parametrický návrh
Bentley Architecture	Bentley Systems	vytváření a prohlížení 3D modelů	architektonické modelování
SketchUp Pro	Trimble	konceptní 3D modelování	tvorba modelu konceptního návrhu
ArchiCAD	Graphisoft	konceptní 3D architektonický model	tvorba architektonického modelu
TeklaStructures	Tekla	konceptní 3D modelování	aplikace architektonického 3D modelu
DProfiler	Beck Technology	konceptní návrh a odhad nákladů	3D konceptní modelování s odhadem nákladů v reálném čase
Vectorworks Designer	Nemetschek	konceptní 3D modelování	tvorba architektonického modelu
Affinity	Trelligence	konceptní 3D modelování	konceptní modelování v rané fázi návrhu
Edificus	AccaSoftware	architektonický BIM a 3D objektový CAD	architektonické modelování
Vico Office	Vico Software	konceptní 5D modelování	5D konceptní model, generování přehledu nákladů a harmonogramů
Revit Structure	Autodesk	návrh konstrukcí	modelování konstrukcí, parametrický návrh, statické či dynamické výpočty staveb
SDS/2	Design Data	návrh konstrukcí	3D modelování konstrukcí a detailů
RISA	RISA Technologies	návrh konstrukcí	balíček aplikací pro návrh konstrukcí
Robot	Autodesk	analýzy konstrukcí	obousměrné propojení s Autodesk Revit Structure
Green Building Studio	Autodesk	energetické analýzy	výpočty energetické náročnosti a uhlíkové stopy
Structural Analysis, Design Detailing, Building Performance	Bentley Systems	analýzy konstrukcí, modelování detailů, výkazy výměr, energetická náročnost budov	výpočty a výkazy energetické náročnosti budov
Solibri Model Checker	Solibri	prohlížení a kontrola modelu	detekce a správa kolizí, kontrola kompatibility všech objektů v modelu
Tekla BIMSight	Tekla	prohlížení a kontrola modelu	kombinace modelů, detekce kolizí, sdílení informací
Navisworks Manage/Simulate	Autodesk	prohlížení a kontrola modelu	detekce kolizí, 4D simulace průběhu stavby
xBIMXplorer	Open BIM	prohlížení formátu IFC	otevírání a prohlížení modelu ve formátu IFC
Solibri Model Viewer	Solibri	prohlížení modelu	otevírání a prohlížení modelu ve formátu IFC
Navisworks Freedom	Autodesk	prohlížení modelu	otevírání a prohlížení modelu ve formátu IFC

Z tabulky lze dále vysledovat, že velké firmy, jako je Autodesk, Graphisoft nebo Bentley nabízejí nástroje, které pokrývají většinu funkcí potřebných při informačním modelování. Taková softwarová řešení jsou potom určena pro komerční použití a jsou samozřejmě zpoplatněna. Jednou z mála dostupnějších platforem tak zůstává open-source program Edificius. Zcela bezplatné pak jsou pouze prohlížečky BIM modelů, jako je Autodesk Navisworks Freedom, které nabízejí pouze základní funkce [18].

V kapitole 2 bude uveden přehled nejvýznamnějších prací, které se zabývají informačním modelováním památkových objektů. Přitom si můžeme povšimnout, že z dvaceti uvedených prací jich dvanáct využívá pro modelování program Autodesk Revit. To je v souladu se studiemi popisovanými ve článku Davida M. Foxe [19], které připisují Revitu až 67% podíl na trhu, přičemž je tento nástroj následován produkty Bentley Architecture a Graphisoft ArchiCAD.

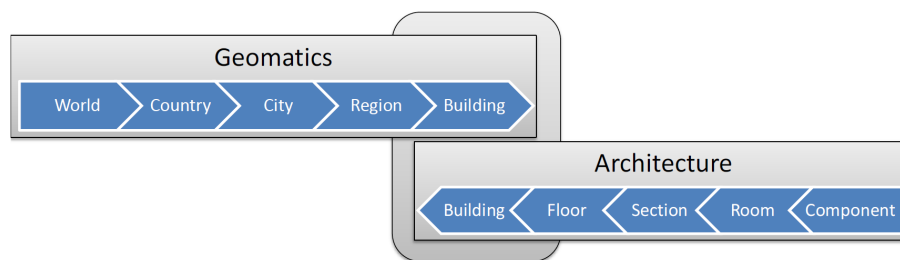
1.5 Problém spolupráce BIM a GIS

S nástupem používání informačních modelů budov při návrhu, provádění, správě a údržbě staveb se samozřejmě nabízí otázka, jak mohou být při modelovacím procesu využity geografické informační systémy a na druhou stranu, jak mohou být uvnitř GIS, tedy v geoprostorovém kontextu, využity informačně bohaté modely budov. Podrobně byl tento problém rozebrán také v [20]. V současné době přitom platí, že vzhledem k rozdílnosti obou přístupů není možná jejich plná integrace na úrovni systému [3, 6, 21]. Na druhou stranu např. Hijazi a kol. [22] tvrdí, že je možné dosáhnout interoperability na datové úrovni, sémantické úrovni nebo v rámci webové služby.

1.5.1 Oblasti spolupráce

Isikdag a kol. ve své práci [23, 24] uvádějí, že implementace BIM v geoprostorovém kontextu může být užitečná pro analýzy při výběru lokality stavby (vizuální dopad stavby, analýzy viditelnosti), simulace pro určení spotřeby energie a požadavků na osvětlení u budov, krizové plánování a krizové řízení a obecně pro N-rozměrné analýzy na úrovni města.

Donkers [6] vidí možné využití informačních modelů budov v katastrálních aplikacích (3D katastr), při analýzách dopadu staveb na životní prostředí, při zjišťování solárního potenciálu střech, v architektonických aplikacích (návrh počtu a rozmístění oken dle prostorového umístění budovy, posuzování interakce mezi budovami a okolím – přenos hluku, tepla) a pro účely realitních kanceláří, tedy pro vyhledávání domů se specifickými vlastnostmi.



Obr. 1.6: Překryt oblastí zájmu geomatiky a architektury podle [6]

Laat a Berlo [15] popisují oboustrannou prospěšnost spolupráce BIM a GIS, kdy BIM může být zdrojem dat pro modely zastavěných území v GIS a naopak GIS mohou být datovým zdrojem pro design a integraci nových budov v rámci stávající zástavby. Dle Hijaziho a kol. [22] je schopnost integrovat BIM do geoprostorového kontextu klíčovou otázkou pro usnadnění údržby 3D modelů měst. Ty potom mohou být využity například v aplikacích městské správy. Zmíněno je použití pro indoor navigaci a také spolupráce BIM a GIS pro facility management (správa univerzitního kampusu).

Kolbe a kol. [8] píší, že informační modely budov ve formátu IFC jsou důležitým zdrojem dat pro modely měst uchovávané s využitím standardu CityGML v nejvyšší úrovni podrobnosti LOD 4. Takové modely jsou potom využitelné pro krizové řízení (odhad rozsahu poškození jako je např. simulace zaplavení, navádění záchranných týmů), obecně pro kombinovanou (indoor/outdoor) navigaci a samozřejmě pro 3D vizualizace. O využití BIM modelů a modelů měst v CityGML LOD4 pro navigaci v interiéru se lze dále dočíst také ve [25], kde je rozebráno vytváření grafů z primárních geometrických 3D modelů pro účely navigace. V [5] Zlatanova a kol. rozšiřují oblast použití 3D modelů měst v krizovém řízení a krizovém plánování o vytváření simulátorů pro trénink personálu na základě realistických modelů skutečně existujících měst.

Využití modelů měst ve vysoké podrobnosti popisují také Benner a kol. [26], kteří navrhují nový model pro uchovávání 3D modelů měst – QUASY. Ten by měl dále rozšířit možnosti využití modelů měst o územní plánování, účely městské správy a dopravní simulace. Propojení BIM a GIS pro plánování dopravní infrastruktury okolo výškové budovy je popsáno také v [27]. Bansal a kol. [28] potom využívají propojení BIM a GIS pro plánování bezpečnosti práce na staveništi.

Poněkud jiný přístup zvolil Černý [3], který na základě mj. Borrmanna [29, 30] studoval zejména možnost využití prostorových analýz vycházejících z GIS (s rozšířením do 3D) přímo v BIM modelu. Práce nejprve identifikuje nedostatky při

provádění analýz v GIS prostředí (ArcGIS), tedy hlavně nutnou degradaci geometrie modelu při převodu. Proto je pro další výzkum zvolen jiný přístup a analýzy jsou prováděny s využitím vlastního nástroje přímo v BIM modelu. Tento přístup sice zmíněné nedostatky odstraňuje, na druhou stranu je ale limitován pro použití v rámci jednotlivých budov a neumožňuje analýzy v širším geoprostorovém kontextu.

V současné době BIM nachází využití zejména při návrhu, realizaci a užívání nových staveb, kdy model v ideálním případě vzniká vlastně přirozenou cestou v průběhu životního cyklu budovy. Přitom ale můžeme nalézt také snahy o informační modelování historických, tedy již dlouho existujících staveb. Toto téma je zásadní pro tuto práci a bude dále rozvedeno od kapitoly 2.

1.5.2 Překážky spolupráce

Vzhledem k tomu, že nástroje pro informační modelování budov a geografické informační systémy byly od začátku vyvíjeny pro rozdílné účely, je mezi nimi možné nalézt zásadní odlišnosti, které ztěžují jejich spolupráci. Informační modely budov a obecně i CAD systémy, ze kterých BIM vychází, jsou navrženy zejména pro návrh nových staveb. Tedy pro modelování stavebních objektů, které zatím neexistují. Jejich cílem je zachytit budovu či jinou stavbu s maximálním možným detailem v geometrii i sémantice. V rámci modelů jsou významné vzájemné vztahy mezi jednotlivými objekty, absolutní poloha celku nemusí být tolik důležitá.

Naproti tomu geografické informační systémy většinou modelují realitu, tedy již existující objekty a jevy kolem nás. Při modelování je obvykle používána velká míra abstrakce a je kladen značný důraz na georeferencování, tedy na absolutní umístění modelovaných prvků na zemském povrchu [23, 31].

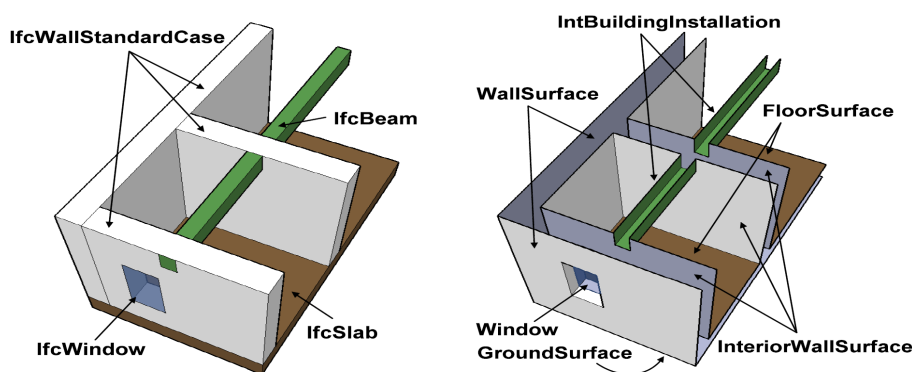
V [15] potom Laat a Berlo uvádí, že v oblasti CAD/BIM jsou modely sdíleny většinou ve formě fyzických souborů (např. ve formátu IFC), zatímco v GIS je uplatňován spíše serverový přístup ke sdílení dat. Výjimkou může být například open-source BIMserver¹⁴.

S využitím dostupné literatury byly tedy nalezeny hlavní překážky integrace informačních modelů budov s geografickými informačními systémy:

1. BIM (např. formát IFC) používá více reprezentací geometrie (oproti GIS navíc CSG, taženou geometrii),
2. BIM a GIS modely používají odlišnou sémantiku,
3. BIM a GIS používají rozdílné souřadnicové systémy.

¹⁴<https://github.com/opensourceBIM/BIMserver>

První problém je asi největší překážkou při převodu BIM (IFC) modelů do GIS formátů jako je CityGML. Zatímco BIM modely využívají všech druhů ukládání geometrie jako je reprezentace hranic, CSG a tažená geometrie, v GIS je ukládání omezeno na reprezentaci hranic, kdy jsou pro ohraničení většinou používány pouze přímé linie a rovinné plochy. Na rozdíl od parametrických objemových modelů v IFC jsou tedy v CityGML objekty reprezentovány pouze svými viditelnými plochami. Pro převod z IFC je proto nutno extrahovat vnější schránku objektu, což není triviální problém [6][26]. Donkers [6] dále uvádí, že většina existujících nástrojů pro převod IFC do CityGML (nástroje BIMserveru, IFC Explorer) nevytváří plně validní CityGML modely. To může samozřejmě snižovat možnost využití pro následné GIS analýzy.



Obr. 1.7: Reprezentace geometrie v BIM a 3D GIS [15]

Zatímco BIM a formát IFC jsou zaměřeny na tvorbu detailních modelů stavebních objektů, v CityGML by měly být reprezentovány modely celých měst. Je tedy logické, že třídy v IFC neodpovídají přesně třídám CityGML. Postupem transformace se zaměřením na sémantické informace se zabývají například Isikdag a Zlatanova [31].

Rozdíl mezi souřadnicovými systémy popisuje ve své práci například Černý [3]. V BIM je používán tzv. World Coordinate System (WCS), což je lokální pravoúhlý souřadnicový systém výkresu. Počátek tohoto systému a jeho orientace, tedy nutné parametry pro transformaci do globálního souřadnicového systému GIS, by měly být v IFC uvedeny (v systému WGS 84). Tyto parametry ale nejsou povinné a kromě toho mohou mít pouze orientační přesnost. Tento problém by měl být odstraněn v nové specifikaci IFC4, která ale, jak již bylo řešeno výše, není zatím příliš podporována.

2 Současné snahy o informační modelování historických budov

Komplexní rešerše zkoumající problém informačního modelování památkových budov lze nalézt v [18, 32, 33]. Tabulka 2.1 obsahuje přehled vědeckých prací, které se zabývají využitím BIM a GIS pro tvorbu informačních modelů památkových objektů. Základem pro tento výčet byl seznam v článku Saygi a Remondina [34], který byl přeložen, upraven a také významně rozšířen o další nalezené práce. Ačkoliv tento seznam určitě není kompletní, můžeme na základě nalezených prací velmi dobře sledovat použité přístupy a softwarové nástroje.

Nalezené snahy lze rozdělit podle zvoleného přístupu. Většina uvedených prací je přitom spíše zaměřena na využití BIM softwaru. V takovém případě se zpravidla jedná o vytvoření knihoven parametrických objektů, které mohou sloužit pro převod nestrukturovaného mračna bodů, vzniklého laserovým skenováním, do podoby parametrického 3D modelu.

Druhou skupinu tvoří práce, které využívají kombinaci BIM a GIS nástrojů, kdy BIM je většinou využíván pro 3D modelování a GIS následně pro správu výsledných dat. Poslední skupinu prací je sice možno označit jako GIS přístup, protože nevyužívají přímo BIM software, jejich postup je ale kombinovanému BIM/GIS workflow velmi podobný. Dále v této kapitole budou nalezené práce popsány detailněji. Přitom je rozdělíme podle toho, zda jsou primárně zaměřeny na tvorbu informačního modelu nebo naopak na správu výsledných dat a jejich využití.

2.1 Práce zaměřené na 3D modelování

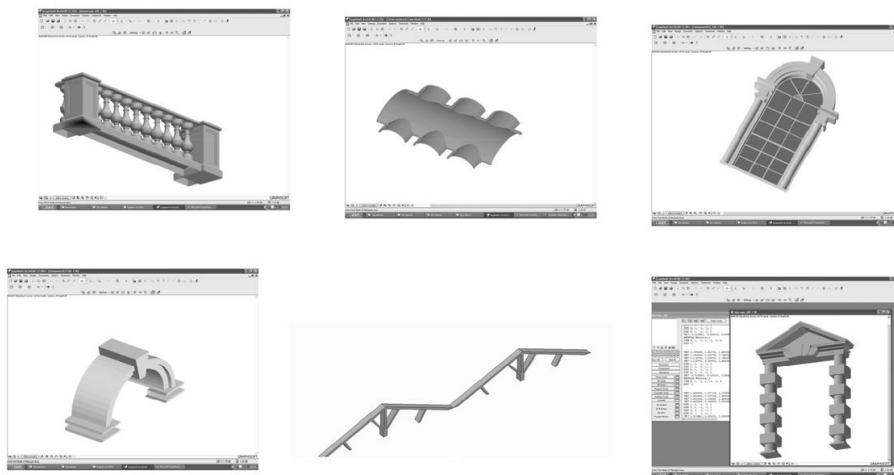
Vlastnímu 3D modelování musí samozřejmě předcházet sběr dat. Jako moderní metody sběru dat o historických památkových objektech jsou chápány laserové skenování a digitální fotogrammetrie. Výsledkem obou metod je husté mračno bodů, které lze sice pro některé účely památkové péče využít, těžko se ale jedná o plnohodnotný 3D model. Proto není překvapivé, že můžeme nalézt řadu prací, které se zabývají převodem získaných dat ve formě mračna bodů do podoby parametrického 3D modelu. Například práce Faie a kolektivu [35] je zaměřena na problémy spojené s kombinováním dat laserového skenování a 3D modelů z BIM softwaru. Nicméně tato práce využívá obecné knihovny objektů, které nejsou nijak přizpůsobeny potřebám modelování historických památek.

Tvorba prototypové knihovny určené speciálně pro potřeby památkové péče byla popsána v roce 2009 v článku Murphyho a kol. [36], přičemž byla pojmenována

Tab. 2.1: Současné snahy o modelování historických památek (rozšířeno z [34])

Přístup	Literatura	Případové studie	Software	Poznámky
BIM	Attar a kol. (2010) [54]	hist. sklady rekonstruované na kancelářské budovy v Torontu	Revit, AutoCAD, plugíny gbXML, Energy-Plus	tvorba BIM modelu, jeho využití pro analýzy energetické efektivity budovy
BIM	Foxe (2010) [19]	historické budovy v Bostonu a Durhamu	?	informační modely využity pro rekonstrukci budov, příklad z praxe
BIM	Fai a kol. (2011) [35]	areál historické továrny v Torontu	AutoCAD, Civil 3D, SketchUp, Revit, Navisworks	4D modelování – rekonstrukce stavu v několika obdobích, využito pro přestavbu areálu
BIM	Achille a kol. (2012) [55] Tommasi a kol. 2016, [56]	katedrála v Miláně	Rhinoceros, WebGL, Back Office, Front Office, plugin Pointools	3D model využit jako archiv pro popisné informace a fotografie, možnost sdílení na webu
BIM	Apollonio a kol. (2012) [39]	palladiánská architektura	Revit	knihovny parametrických objektů na základě klasické architektonické literatury
BIM	Boykens a kol. (2012) [45]	Vinohradská synagoga v Praze	ArchiCAD, Maxon, Cinema4D	rekonstrukce již neexistující synagogy s využitím BIM
BIM	Garagnani (2012) [43]	raně byzantský kostel v Ravenně	Revit, plugin GreenSpider	plugin pro segmentaci nestrukturovaného mračna bodů
BIM	Brumana a kol. (2013) [40]	kostel v Scardia d'Intelvi, Itálie	Revit, Green Building Studio	v BIM modelu zachyceny různé konstrukční fáze budovy
BIM	Oreni a kol. (2013) [38]	různé historické klenby	Leica Cloudwork, Revit, AutoCAD, Rhinoceros	parametrické modely kleneb
BIM	Baik a kol. (2014) [41]	hist. budovy v Džiddě, Saudská Arábie	PhotoModeler Scanner, Autodesk RECAP 360, Rhinoceros, Revit	tvorba knihovny parametrických objektů (JHBIM)
BIM/GIS	San José-Alonso a kol. (2009) [53]	různé hist. objekty ve Španělsku	PINTA	vlastní softwarová platforma PINTA kombinující BIM a GIS funkcionalitu
BIM/GIS	Yajing a Cong (2011) [42]	kamenný chrám Ta Keo	Revit, 3ds Max, SketchUp, Geomagic, AutoCAD	tvorba rodin pro modelování kamenných staveb, plán na propojení GIS a BIM pro správu informací
BIM/GIS	Dore a Murphy (2012) [48], Murphy a kol. (2013) [37]	Henrietta Street v Dublinu	ArchiCAD, SketchUp + CityGML plugin, ArcGIS	komplexní postup tvorby 3D modelu z dat laserového skenování, knihovny parametrických objektů, převod do GIS
BIM/GIS	Ellul a kol. (2017) [52]	historická budova Londýnské univerzity	Revit, Safe Software FME, Oracle Spatial	stručný postup od laserového skenování po GIS, zkušební integrace s daty mapování hluku a kvality ovzduší
BIM/GIS	Vacca a kol. (2018) [46]	opevnění na Sardinii	Revit, FME Exporter, ArcGIS	tvorba 3D modelu na základě 2D archivních dat, převod do GIS
BIM/GIS	Matrone a kol. (2019) [47]	kostel v Benátkách	Revit, FME Exporter, ArcGIS, PostGIS	převod 3D modelu v různých LOD do prostorové databáze
BIMxGIS	Saygi a Remondino (2013) [34], Saygi a kol. (2013) [44]	Kurşunlu Khan v Turecku	Revit + Revit DB Link, AutoCAD, SketchUp, 3ds Max, ArcGIS, PostGIS	porovnání BIM a GIS přístupu pro 3D modelování a správu doplňujících informací
GIS	Centofanti a kol. (2011) [51]	villa a kostely v Itálii	AutoCAD, 3ds Max, Rhinoceros, Rapidform XOR, Microsoft Access, ArcGIS	3D modely v GIS prostředí pro správu a analýzy informací o kulturních památkách
GIS	Jedlička a kol. (2013) [49]	zámek Kozel	Kokeš, RiSCAN, MicroStation, MSR, SketchUp, ArcGIS, CityEngine	kompletní postup od pořízení dat laserovým skenováním a fotogrammetrií po import modelu do GIS prostředí
GIS	Campanaro a kol. (2015) [57]	naleziště v Pompejích	ArcGIS (ArcMap + ArcScene)	data získaná laserovým skenováním a fotogrammetricky, experimenty s využitím WebGL pro vizualizaci na webu

Historic Building Information Modeling (HBIM). Dále byla tato metoda rozvinuta v článku [37]. Proces HBIM začíná vytvořením souboru dat (mračen bodů) s využitím terestrického laserového skenování a digitální fotogrammetrie. Následující fáze potom zahrnuje návrh a tvorbu vlastní knihovny parametrických objektů. Za tímto účelem je využita softwarová platforma Graphisoft ArchiCAD a otevřený skriptovací jazyk GDL (Geometric Description Language), který je v ArchiCADu implementován. Jako hlavní podklad pro tvorbu knihovny HBIM jsou využity historické architektonické knihy, které obsahují informace o stavebních prvcích, architektonických detailech a jejich vztazích. Po vytvoření knihovny následuje poloautomatický proces mapování parametrických objektů do mračen bodů.



Obr. 2.1: Příklady parametrických objektů z knihovny HBIM [37]

Knihovnou historických stavebních prvků se zabývají ve svých člancích také Oreni a kol. [38], Appolonio a kol. [39] nebo Brumana a kol. [40]. Všichni jmenovaní přijali pojmenování HBIM i když není vždy jasné, jestli je tak nazývána parametrické knihovna nebo obecně celý postup informačního modelování architektonických památek. Baik a kol. [41], jejichž práce se věnuje knihovně určené pro modelování blízkovýchodní architektury v Džiddě, potom používají „lokalizovaný“ termín JHBIM (Jeddah Historical Building Information Modeling). Do této skupiny prací by mohl patřit také článek Yajinga a Conga [42], kteří sice nepoužívají termín HBIM, ale v podobném duchu vytváří knihovnu objektů pro modelování kamenných stavebních památek. Nakonec Garagnani [43] se ve svém článku zabývá popisem vlastního pluginu GreenSpider, který by měl usnadnit zpracování nestrukturovaného mračen bodů. Všechny uvedené práce využívají oproti Murphymu a kol. BIM nástroj Autodesk Revit.

Ne všechny snahy počítají s modelováním na základě dat laserového skenování. Saygi a kol. [34, 44] porovnávají BIM i GIS přístup pro tvorbu a správu modelu a

využívají jako podkladů archivní výkresy. Jednotlivé elementy jsou potom vytvářeny ručně. Pro BIM zpracování byl použit Autodesk Revit, pro vyzkoušení GIS přístupu kombinace nástrojů AutoCAD, Trimble SketchUp a Autodesk 3ds Max. Výkresové dokumentace jako hlavního podkladu využívají také Boykens a kol. [45], kteří modelují již neexistující předlohu a laserové skenování je tak jako metoda sběru dat samozřejmě vyloučeno. Další příklady využití již existujících 2D archivních podkladů popisují Vacca a kol. [46] a Matrone a kol. [47].



Obr. 2.2: Tvorba a vizualizace 3D modelu na základě mračna bodů [41]

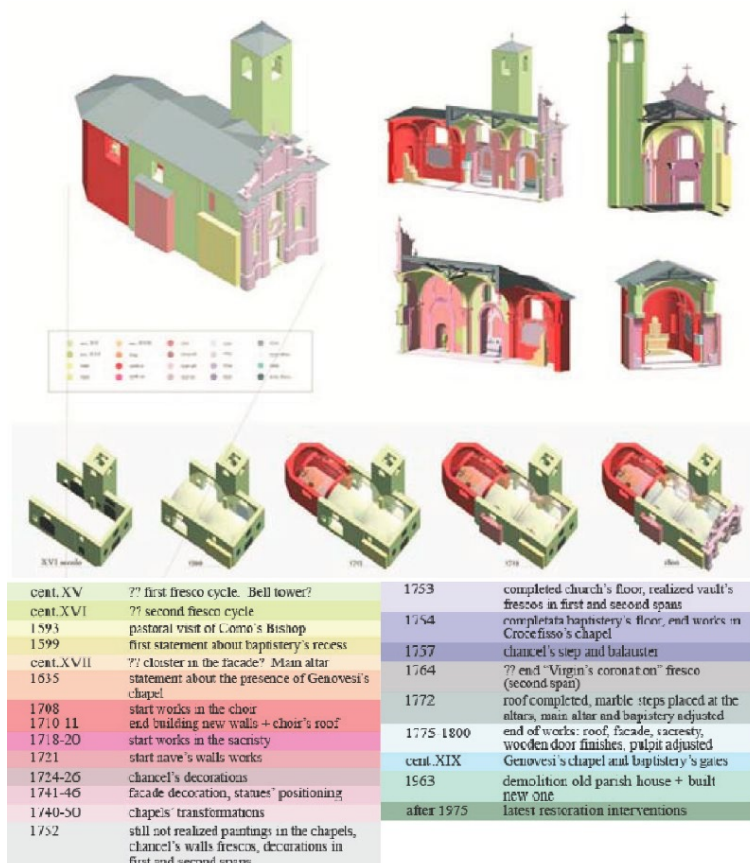
2.2 Práce zaměřené na správu a využití dat

Výzkum, který popisují Saygi a kol. [34, 44] byl sice zmíněn již v předchozím oddíle, protože se zabývá i 3D modelováním, jeho těžiště však leží především v rozboru možností správy informací o památkových objektech. Práce podrobně analyzují postup tvorby sémantických modelů a jejich uchování. Zdůrazněna je nutnost segmentace modelu na architektonické elementy tak, aby bylo možno spravovat informace o každém z nich. BIM i GIS přístup jsou porovnávány z hlediska správy 3D geometrie a doplňujících informací. GIS nástroje (v práci byl testován klasický software ArcGIS) jsou identifikovány jako v současné době vhodnější pro správu dat, vzhledem k možnosti sloučit velké množství různorodých 3D, 2D i negeometrických datových vrstev.

To potvrzují použitým postupem i Dore a Murphy ve své další práci [48], v níž se zabývají integrací 3D modelu, který je výsledkem využití HBIM postupu popisovaného výše, do GIS prostředí. Výsledek by potom měl sloužit pro správu informací a propojení 3D modelu s dalšími zdroji dat, včetně externích zdrojů z jiných informačních systémů. Jako prostředník mezi BIM softwarem ArchiCAD a GIS nástrojem ArcGIS je využit program Trimble SketchUp s CityGML pluginem. Velmi podobný postup používají i Jedlička a kolektiv [49, 50]. Ti sice nevyužívají pro 3D modelování přímo BIM software, pro zpracování naměřených dat je použit jiný – geodetický program, postup integrace výsledného sémantického modelu z programu SketchUp do GIS prostředí ArcGIS je ale obdobný.

Nástroj ArcGIS používají také Centofanti a kol. [51] pro vytvoření architektonického informačního systému, který by měl sloužit pro účely správy a údržby historických památek. I tato práce shledává BIM software prozatím nedostatečným pro účely památkové péče a preferuje import 3D modelů do GIS prostředí (ArcScene). Případovou studii zabývající se převodem modelu památkové budovy v různých úrovních podrobnosti (LOD3 a 4 jako HBIM modely z Revitu) přes ArcGIS do 3D prostorové databáze PostGIS popisuje Matrone a kol. [47]. Podobnou studii nabízí také Vacca a kol. [46], kde je cílem převodu ESRI geodatabáze. Je důležité, že z těchto studií vyplývá, že problémem není přenos geometrie, ale spíše k ní vztahených popisných dat. V neposlední řadě Ellul a kol. [52] převádějí informační model vytvořený na základě dat laserového skenování v programu Revit přes formát IFC do prostorové databáze Oracle Spatial, kde do něj integrují výsledky mapování hluku a kvality ovzduší v zájmové budově.

San José-Alonso a kol. potom ve své práci [53] představují podobný přístup, který ale nazývají *Cultural Heritage Information System* (CHIS). Tento systém by měl klást oproti klasickému GIS důraz na trojrozměrnou reprezentaci, vizualizace a interaktivní prohlížení informací obsažených v rámci 3D modelu (historické texty, hypertextové odkazy na multimedia, metadata. . .). BIM je v tomto příspěvku chápán jako syntéza metodiky CAD a GIS, která ale nebere v potaz širší okolí budovy. Proto vyvíjejí vlastní softwarovou platformu PINTA (Processing Information System for Architecture), která kombinuje funkcionalitu BIM a GIS. PINTA umožňuje vytvářet modely z dat laserového skenování a fotogrammetrie, uchovávat data a generovat výkresy řezů, pohledů, atd. Výsledek by měl být vhodný zejména pro plánování rekonstrukcí historických památek. Zajímavý je důraz na umožnění vzdáleného a současného přístupu více uživatelů z řad státní správy a veřejnosti (v duchu BIM spolupráce).



Obr. 2.3: Architektonické elementy rozlišené v modelu dle stavebních etap [40]

Přesto, že je v uvedených pracích vyhodnocen GIS jako výhodnější nástroj pro uchování a správu informací o památkových objektech, existuje řada dalších příspěvků, které popisují práci výhradně v BIM prostředí. Příkladem mohou být články Foxeho [19] nebo Attara a kol. [54]. Obě práce s výhodou využívají BIM software pro plánování rekonstrukcí, v případě druhého jmenovaného i pro analýzy energetické efektivity budovy. Je ale nutno poznamenat, že pracují s historickými památkami v Severní Americe, které jsou výrazně mladší, než je obvyklé v Evropě. Tím jsou konstrukčně bližší moderním stavbám, pro které je BIM připraven. Podobná je situace také u již uvedené práce Faie a kol. [35]. Zde je BIM používán jako nástroj pro plánování rekonstrukce areálu zaniklé továrny, přičemž je využito možnosti vytvářet 4D modely a zachycovat tak vývoj zájmových objektů v čase. Nakonec Brumana a kol. [40] využívá BIM model i pro vizualizaci rozlišení architektonických prvků dle jednotlivých stavebních etap (viz obr. 2.3).

3 Úvod do procedurálního modelování

Protože v rámci tvorby informačních modelů historických budov počítáme s jejich souřadnicovým umístěním do okolního terénu a zástavby, je třeba nalézt také vhodný nástroj pro modelování tohoto širšího geografického kontextu. Vytváření vizualizací rozsáhlých zastavěných oblastí klasickým přístupem, tedy ručně bod po bodu v CAD softwaru (viz např. [49, 58, 59, 60, 61]), je přitom velice časově náročné. Proto je výhodné využít procedurální modelování, kdy je místo rekonstrukce předlohy bod po bodu výsledek založen na jejím popisu v textovém, člověkem čitelném souboru. Ten obsahuje strukturu budovy nebo častěji skupiny budov a slouží jako základ pro automatické generování modelu. Procedurální modelování je pro nás zajímavé také kvůli své příbuznosti s BIM přístupem vzhledem k tomu, že je v obou odvětvích kladen velký důraz na sémantiku a hierarchické uspořádání jednotlivých architektonických prvků [62, 63]. Protože procedurální modelování není zcela běžnou metodou 3D rekonstrukce, bude jeho stručnému představení věnována tato kapitola, přičemž hlavní důraz bude kladen na tvarovou gramatiku CGA, která je přímo určena pro procedurální modelování architektury.

3.1 Tvarová gramatika CGA

Procedurální modelování architektury je založeno na produkčních systémech, do kterých patří například Semi-Thue procesy¹ nebo Chomského gramatiky². Zatímco uvedené systémy pracují nad množinou symbolů (abeceda), z nichž vytvářejí řetězce podle zadaných pravidel [64], existují i další gramatiky, které místo symbolů operují s tvary. Z těch jsou aplikací pravidel vytvářeny geometrické obrazce. Příkladem mohou být L-systémy³, které Przemyslaw Prusinkiewicz a Aristid Lindenmayer použili pro popis růstu jednoduchých organismů (obr. 3.1). Gramatika CGA, která je od začátku primárně určena pro procedurální modelování architektury, potom patří do tvarových gramatik poprvé popsanych v práci George Stinyho a Jamese Gipse v roce 1971 [62, 63, 65, 66]. Tvarové gramatiky jsou v současnosti považovány za nejvíce rozvinutou a vyspělou metodu pro procedurální reprezentaci budov [67] i když mají obecně některá omezení, jako je například nemožnost kontrolovat výsledky interaktivně a přímo ve 3D scénách [68].

¹https://en.wikipedia.org/wiki/Semi-Thue_system

²Americký lingvista Avram Noam Chomsky. Viz: <https://chomsky.info/>

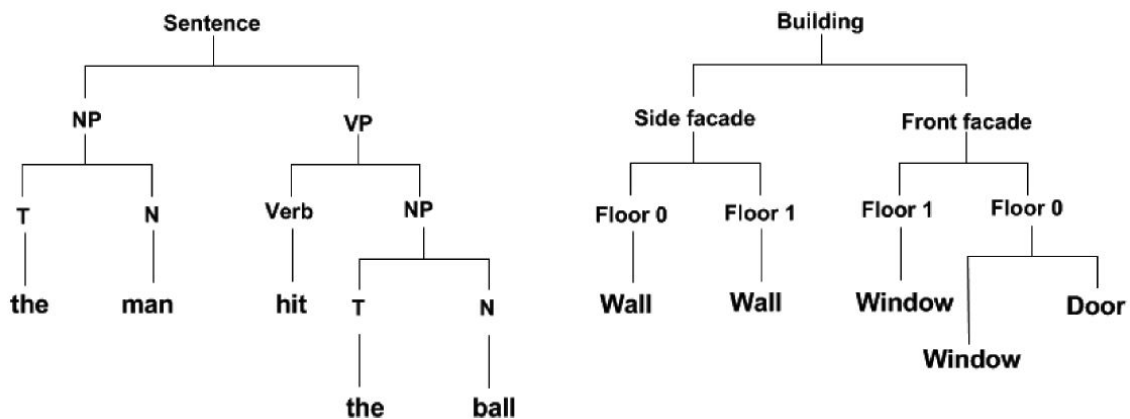
³Lindenmayerovy systémy: <https://en.wikipedia.org/wiki/L-system>



Obr. 3.1: Travniny vymodelované pomocí L-systémů (zdroj: Wikipedie)

3.2 Historie CGA

Historii tvarové gramatiky CGA lze vysledovat do roku 2001. V tomto roce Yoav I. H. Parish a Pascal Müller prezentovali v článku *Procedural modeling of cities* [69, 70], jak lze s využitím tvarové gramatiky rychle vytvářet *jednoduché* trojrozměrné modely měst na základě 2D polygonů, kterým je přiřazena výška, jsou vysunuty do prostoru a jsou na ně aplikovány textury. V roce 2003 bylo Wonkou a kolektivem v článku *Instant architecture* [71] naopak předváděno modelování geometrických *detailů* na fasádě. Popsána zde byla tzv. dělicí gramatika (split grammar), která umožňuje rozdělovat 3D objekty na části. Kombinace obou metod byla potom představena v článku Müllera, Wonky a kolektivu *Procedural modeling of buildings* [63]. Tento článek byl vydán v roce 2008 a je zde již popsána také implementace nové gramatiky, nazvané CGA (Computer Generated Architecture), v programu CityEngine. Ten se objevil na trhu ve stejném roce [62, 63, 72]. Nedávno byla potom představena poslední verze gramatiky, nazvaná CGA++ [73].



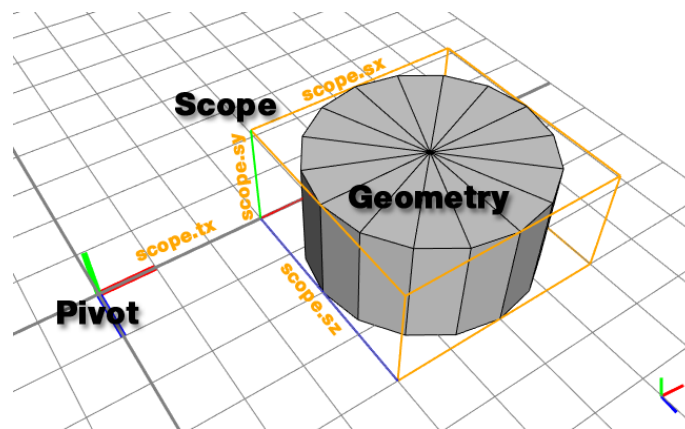
Obr. 3.2: Chomského koncept bezkontextové gramatiky a její adaptace pro budovu dle Stinyho a Müllera [74]

3.3 CGA tvar

CGA je tvarovou gramatikou. Proto je jejím základním elementem *tvar* (shape). Každý tvar se skládá z označení (shape symbol, rule name), parametrů a atributů. Označení tvaru je jméno elementu, tímto jménem je na něj odkazováno v souboru pravidel gramatiky a to tak, že pravidlo s odpovídajícím jménem je použito pro generování nástupce tvaru (viz dále).

Každý tvar může mít přiřazeny parametry. Tyto parametry jsou implicitně definovány v pravidle, které daný tvar vytváří. Podporovány jsou parametry logické (bool), číselné (numeric, interně reprezentovány jako double-precision float) a textové řetězce (string).

Nakonec atributy popisují geometrii a prostorové umístění tvaru. Nejdůležitějšími atributy jsou geometrie (geometry), rámec (scope) a pivot (počátek souřadnicového systému tvaru). Uvedené pojmy nejlépe vysvětlí obrázek 3.3. Tvary v CGA mohou být terminální nebo neterminální, přičemž, jak je z názvu zřejmé, pro terminální tvar nejsou definována žádná pravidla, která by ho nahrazovala tvarem jiným [63, 66, 75].



Obr. 3.3: Tvar, jak je definován v CGA [75]

3.4 CGA pravidlo

Výsledný vzhled procedurálně generovaného modelu popisuje soubor pravidel. Ten obsahuje pravidla, která iterativně vylepšují vzhled modelu postupným přidáváním detailů. S pomocí tvarové gramatiky CGA je nejprve vymodelován hrubý objemový model (mass model). Poté je vytvořena struktura fasády a nakonec jsou

přidány detaily (okna, dveře, ozdobné prvky). Vlastní přidávání detailu je realizováno nahrazováním jednodušších tvarů několika tvary detailnějšími. V rámci modelování je tak vlastně definována hierarchická struktura modelu a sémantika, čehož může být využito pro procedurální obměny. Může tedy být vygenerována celá řada různých modelů, které společně vytvoří např. model města [63].

Obecný tvar CGA pravidla vypadá následovně:

předchůdce --> následník

Na levé straně pravidla je označení tvaru, který má být nahrazen. Na straně pravé je potom odkazováno na tvar nebo množinu tvarů, které původní tvar nahrazují. Dále zde může být popsána tvarová operace pro tvorbu nových tvarů nebo podmínka či stochastické pravidlo. Je tedy možno zajistit větvení pravidla, kdy se rozhoduje o tom, který tvar bude vybrán pro nahrazení nebo která tvarová operace bude použita.

První pravidlo v souboru pravidel je označeno jako startovací (start rule). Na levé straně má toto pravidlo kořenový tvar (výchozí tvar, root shape). Dále jsou pravidla vyhodnocována postupně a tvarové operace (a tedy nahrazování) jsou prováděny, dokud existují tvary, které mají definována pravidla pro jejich nahrazení, tj. jsou neterminální. V případě, že zbývají pouze tvary terminální, je proces generování ukončen.

Tvary, které jsou nahrazeny, nejsou mazány, ale jsou označeny jako neaktivní. Tím je stále v průběhu celého procesu generování zachovávána hierarchická struktura modelu. Tuto strukturu lze vyjádřit pomocí stromu tvarů. Výsledný model je množinou všech listů stromu (tedy terminálních tvarů) [63, 66, 75].

3.5 Tvarové operace

Pomocí tvarových operací je možné modifikovat geometrické atributy (změna velikosti, umístění rámce) i vzhled tvaru (barva, textura), případně i vytvářet tvary nové [66, 75]. Nejdůležitější tvarové operace gramatiky CGA budou uvedeny dále v této kapitole.

Posunutí

Operace posunutí mění polohu rámce a tedy i samotného tvaru. V syntaxi CGA se zapisuje:

$$t(tx, ty, tz),$$

kde tx , ty a tz jsou velikosti posunutí v jednotlivých osách (viz obr. 3.3 pro představu o orientaci os, y jde nahoru!). Velikosti mohou být buď absolutní nebo relativní (vztažené k rozměrům rámce).

Otočení

Operace otočení, zapisovaná:

$$r(\textit{centerSelector}, \textit{xAngle}, \textit{yAngle}, \textit{zAngle}),$$

provede otočení tvaru. Středem rotace je dle parametru *centerSelector* buď počátek souř. systému tvaru (*scopeOrigin*, implicitní) nebo střed rámce tvaru (*scopeCenter*).

Změna velikosti

Poslední transformační operace změna velikosti:

$$s(\textit{float xSize}, \textit{float ySize}, \textit{float zSize}),$$

změní velikost rámce tvaru. Stejně jako u translace mohou být hodnoty parametrů zadány relativně (v syntaxi CGA s apostrofem).

Vložení 3D objektů

Tato operace umožňuje vložit instanci geometrického primitiva (krychle, válec) nebo 3D model vytvořený v jiném modelovacím softwaru v podporovaných formátech, tedy OBJ nebo COLLADA DAE. Druhá uvedená možnost může být velmi vhodná pro vkládání detailů, které by již nebylo efektivní modelovat procedurálně (ozdobné prvky, detailní modely oken, dveří...). Operace má zápis:

$$e(\textit{geometryPath}),$$

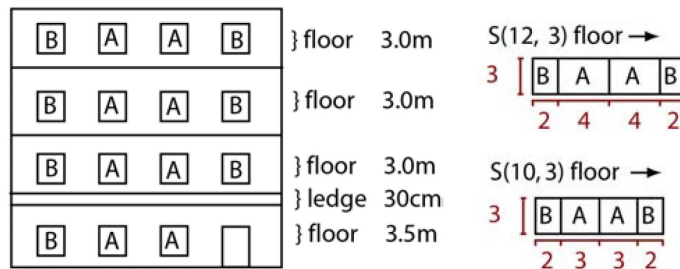
kde *geometryPath* je identifikátor objektu, tedy relativní cesta, proměnná nebo název geometrického primitiva.

Pravidlo pro rozdělení

Pravidlo pro rozdělení (split rule) ve tvaru:

$$\textit{split}(\textit{splitAxis}) \{ \textit{size}(1):\textit{operations}(1) \mid \textit{size}(n):\textit{operations}(n) \},$$

rozdělí tvar na části podél jedné zvolené osy. Parametry $size(n)$ vyjadřují vzdálenosti, ve kterých se rozdělení provede (tj. velikosti výsledných elementů). Tyto hodnoty mohou být přibližné nebo může být specifikováno, že se má určitý element s přibližnou velikostí opakovat n -krát v rámci původního tvaru. Typicky je této operace využíváno pro rozdělení hrubého tvaru fasády budovy na patra a následně na dlaždice (tiles) obsahující okna nebo dveře.



Obr. 3.4: Příklad rozdělení fasády na části pomocí pravidla pro rozdělení [63]

Rozložení na díly

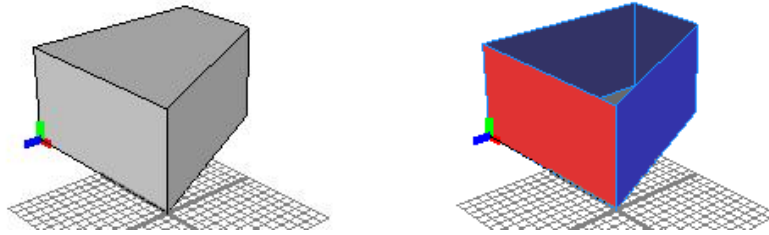
Operace rozložení na díly (component split) slouží pro rozdělení původního trojrozměrného tvaru na tvary nižších dimenzí (tj. na jeho dílčí části – plochy, hrany nebo vrcholy). Syntaxe pro zápis operace je následující:

$$\text{comp}(\text{compSelector}) \{ \text{selector} : \text{operations} | \text{selector} : \text{operations} \dots \}.$$

Parametr $compSelector$ určuje, zda rozdělení proběhne na plochy (f), vrcholy (v) nebo hrany (e). Parametry $selector$ potom specifikují umístění části (tedy nového nahrazujícího tvaru) v rámci tvaru původního. Umístění může být vyjádřeno např. vzhledem k světovým stranám v rámci souřadnicového systému scény, s ohledem na úhly, které tvary svírají se základními rovinami scény (vhodné pro střechy) nebo může být použit i index v rámci původního tvaru. Příklad rozdělení hrubého objemového modelu budovy na hlavní a boční fasády je na obr. 3.5. Pro rozdělení bylo použito pravidlo:

```
Building-->
  comp(f) {
    front : color("#ff0000") Main |
    side  : color("#0000ff") Side
  }
```

Aplikací pravidla bude tvar **Building** nahrazen tvary hlavní a vedlejších fasád a na fasády budou pro rozlišení aplikovány příslušné barvy.



Obr. 3.5: Příklad rozdělení hrubého objemového modelu na díly [75]

Vysunutí

Na rozdíl od tvarové operace rozložení na díly, která rozděluje 3D tělesa na jednodušší části a tedy vlastně ubírá jeden či dva rozměry, vysunutí tvarům rozměr přidává. Operace pracuje v základní podobě s parametrem *height*, tedy s výškou vysunutí:

`extrude(height).`

Operace je často využívána pro vytvoření hrubého objemového modelu budovy z 2D půdorysu, což je nezbytné pro práci s dvourozměrnými vrstvami importovanými z GIS [63, 66, 75].

3.6 Větvení pravidel

Dle [63] může být procedurální pravidlo obecněji zapsáno takto:

predecessor: cond. --> successor: prob.

Každé pravidlo tedy může obsahovat větvení. O tom, která větev pravidla bude vybrána (a tedy který tvar bude použit pro nahrazení), rozhoduje buď podmínka (cond.) nebo stochastické pravidlo (prob.). Podmínka, která je založena většinou na porovnávání atributů nebo parametrů tvaru, je zapsaná s využitím klíčových slov *case* a *else*, přičemž druhé uvozuje poslední větev pravidla, například:

```
Footprint(type) -->
  case type == "residential" : extrude(10) House
  case type == "industrial" : extrude(15) Factory
  else : NIL
```

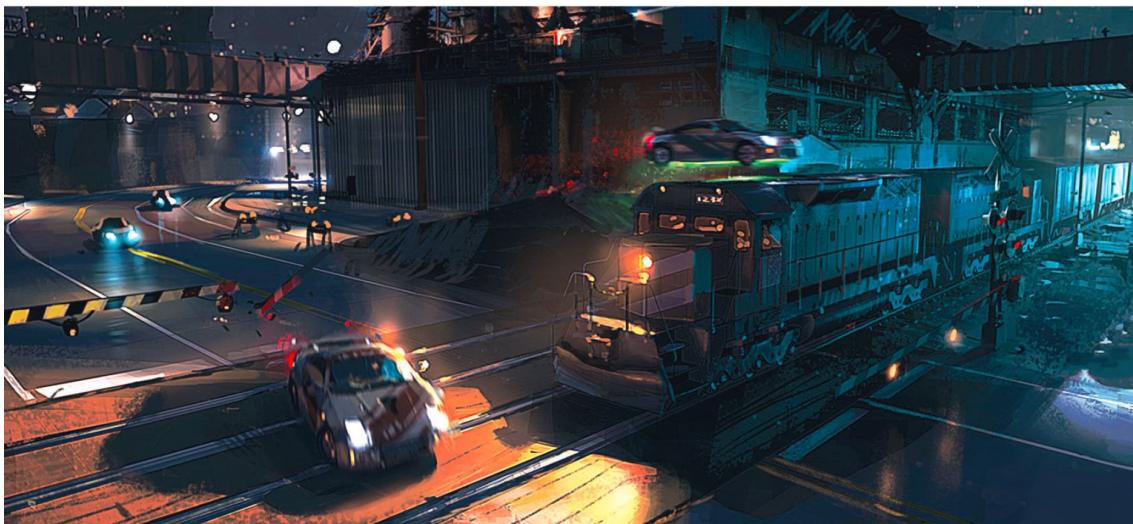
Stochastické pravidlo je potom založeno na specifikování pravděpodobnosti, s jakou bude provedeno nahrazení jednotlivými možnými tvary ve větvích pravidla. Výběr konkrétní větve tedy neprobíhá na základě splnění podmínky, ale v podstatě na základě náhodné vygenerované hodnoty [63, 75]:

```

Lot -->
    30% : Residential
    20% : Retail
    else : Industrial
  
```

3.7 Implementace CGA – program CityEngine

Popisovaná tvarová gramatika CGA je s využitím jazyka C++ implementována v programu CityEngine, který byl, jak již bylo zmíněno výše, komerčně představen v roce 2008. Hlavním záměrem tvůrců bylo vytvořit program, s pomocí kterého by bylo možno rychle generovat rozsáhlé modely měst a osídlené krajiny využitelné v počítačových hrách a ve filmovém průmyslu [76]. Taková města měla být spíše fiktivního charakteru, čemuž odpovídají některé funkce programu, které umožňují velmi rychle automaticky navrhovat například i vzhled uliční sítě [63].



Obr. 3.6: Prostředí pro hru Need for Speed bylo vytvořeno s využitím CGA [76]

Nejefektivnější metodou, jak navrhnout model fiktivního města, je vytvořit prázdnou scénu a generovat maximální množství prvků automaticky. Pomocí dostupných funkcí je možné nechat program navrhnout uliční síť na základě zvolených parametrů v předdefinovaném stylu. Ten může odpovídat původně středověkému městu, městu, které bývalo dříve pevností nebo na zelené louce vzniklému sídlu, jakým je například New York. Po vygenerování ulic jsou v prostoru mezi nimi vytvořeny stavební parcely (lot) a ty jsou rozděleny na polygonové tvary. Těmto polygonům je nakonec možno přiřadit soubor CGA pravidel, který pomocí tvarové gramatiky vygeneruje vlastní budovy. Podkladem při tvorbě města mohou být také digitální modely terénu nebo rastry popisující překážky (např. vodní plochy) [72, 75].

I když je z výše uvedeného patrné, že je CityEngine optimalizován pro rychlou tvorbu fiktivních měst, již od začátku se počítalo s tím, že by mohl být využit i pro potřeby 3D GIS [63]. Není proto překvapivé, že si tohoto softwaru všimla společnost ESRI a v roce 2011 zakoupila firmu Procedural, která do té doby CityEngine vyvíjela⁴. Od té doby probíhá snaha o začlenění programu do portfolia ESRI (například v rámci ArcGIS Pro).

Už ve vlastnictví firmy Procedural bylo možné do City Enginu importovat půdorysy (footprints) budov nebo hrubé objemové modely původem z GIS a ty dále detailně zpracovávat pomocí tvarových operací. V současné době lze importovat jak vrstvy z ESRI geodatabáze, tak ESRI shapefile a výsledek zpět do těchto datových struktur exportovat. Teoreticky je tak program dobře připraven i pro vytváření modelů existujících měst, které mohou být dále využity například pro územní plánování a urbanistické studie [76].

3.8 Využití procedurálního modelování v praxi

Jak již bylo řečeno, zřejmě největší přínos má procedurální modelování při tvorbě modelů fiktivních měst a krajiny, protože je možno využít v maximální míře výhody automatického generování objektů a tvůrci nejsou omezeni požadavky na shodu modelu s existující předlohou. Přesto je tento přístup vhodný i pro modely zachycující stav sídel v minulosti nebo přímo pro 3D rekonstrukce hypotetického vzhledu archeologických nalezišť. Procedurální modelování je možno využít v případě, že je třeba vytvořit přibližnou rekonstrukci rozsáhlého území na základě dostupných pramenů, přičemž významné budovy, o kterých je známo více, mohou být modelovány klasicky. Na druhou stranu mohou být generovány i detailní modely jednotlivých staveb, pokud jsou z podkladů zřejmá architektonická pravidla pro dané období a oblast.

Protože je program CityEngine přímo určen pro procedurální modelování architektury, není s podivem, že je využíván i v řadě prací zabývajících se 3D rekonstrukcemi historických objektů. O využití v archeologii pojednává článek Haeglera a kolektivu [62], který předkládá několik příkladů využití procedurálního modelování na základě výsledků zkoumání archeologických nalezišť. Jedná se například o model starověkých Pompejí nebo o detailní rekonstrukci starověkého města v projektu Rome Reborn⁵ na základě skenování plastiky Říma od Italo Gismondioho⁶. Pro zachycení

⁴<http://www.esri.com/news/releases/11-3qtr/esri-acquires-3d-software-company-procedural.html>

⁵<http://romereborn.frischerconsulting.com/>

⁶https://it.wikipedia.org/wiki/Italo_Gismondi

vzhledu starověkého Říma (obr. 3.7) byl přitom použit kombinovaný přístup, kdy významné objekty (např. Koloseum) byly modelovány klasicky manuálně v běžném CAD softwaru a pro okolní zástavbu bylo použito procedurální modelování. Podobné příklady je možno nalézt také v článku Watsona a kolektivu *Procedural Urban Modeling in Practice* [76]. Dále Calogero, Kaminsky a Arnold [74] používají CityEngine pro rekonstrukci vzhledu východního křídla Louvru na základě odmítnutých návrhů a pro porovnání s návrhem realizovaným. Všechny tři práce přitom popisují využití tvarové gramatiky CGA a programu CityEngine.



Obr. 3.7: Vizualizace projektu Rome Reborn (zdroj: <https://www.romereborn.org/>)

Na druhou stranu lze nalézt i přístupy, které pro generování procedurálních modelů využívají jiné prostředky. Jedná se například o práci Rodriguese a kolektivu [77], kteří používají L-systémů pro modelování římských domů na nalezišti Conímbriga v Portugalsku nebo o práci Quatrinni a Baleani [78] (rekonstrukce Palladiánské architektury). Laycock a kol. [79] potom rozebírají modelování změn památkových objektů a měst v čase s využitím vlastního blíže nespecifikovaného postupu procedurální rekonstrukce, přičemž je využíváno experimentů s automatickou extrakcí půdorysů budov z mapových podkladů [80]. Dále Belloti a kol. [81] pracují s předpokladem, že pro zážitek uživatele není nezbytně nutné modelovat přesně všechny budovy ve městě, ale že je důležitější vyobrazit celkový vzhled města na základě „architektonické pravděpodobnosti“, která vyjadřuje pravděpodobnost výskytu budov různých stylů v různých částech města. V neposlední řadě Perrin a kol. [82] již v roce 2000 experimentovali s procedurální rekonstrukcí krajiny pro účely územního plánování, přičemž se snažili předpovědět krajinný ráz v budoucnosti (růst vegetace, rozvoj zástavby).

4 Postup tvorby informačního modelu historické budovy – teoretická část

Tato kapitola teoreticky shrne, jak by mohla vypadat tvorba informačního modelu památkového objektu a bude při tom vycházet z existující literatury, která byla popsána výše v kapitolách 1 a 2. Na začátku je nutno si uvědomit, že BIM postupy, v současné době již poměrně rozvinuté ve stavebnictví, jsou ve většině případů orientovány na návrh a realizaci výstavby nových budov. Požadavky na modelování již existujících staveb jsou výrazně odlišné. Situace je ještě složitější, pokud hovoříme o historických budovách, které obsahují řadu nepravidelných stavebních prvků, neobvyklých v dnešní době, které navíc jeví výrazné známky opotřebení či poškození. Stejně tak jsou vysoké požadavky na správu výsledných dat, protože do 3D informačního modelu historické budovy je nutno zahrnout velké množství různorodých informací, ať už se jedná o 2D výkresy, mapy a náčrty, fotografie nebo o textové dokumenty [34, 44].

4.1 Požadavky na informační model

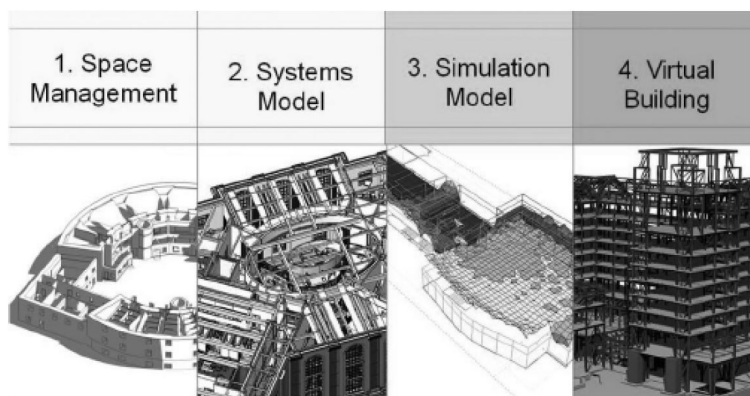
Výsledný 3D informační model by měl obsahovat sémantiku, charakteristiku struktury objektů a vztahy mezi jednotlivými architektonickými elementy [34]. Při tvorbě modelu si tedy nevystačíme pouze se zachycením viditelných ploch a musíme modelovat také „detail za povrchem“ objektů, tedy brát ohled i na konstrukční a materiálové řešení jednotlivých architektonických prvků [37]. Na druhou stranu je nutno zvážit, jak velká úroveň detailu bude vhodná pro naše účely. Foxe ve svém článku [19] připomíná, že v případě modelování již existující budovy bude model vždy do určité míry odlišný od skutečného stavu, protože vždy dojde k většímu či menšímu zjednodušení a abstrakci. Příliš vysoký detail přitom může být také nevhodný z hlediska rostoucího množství dat, která je třeba zpracovávat při další práci s modelem.

Úroveň podrobnosti by mohla být vyjádřena například hodnotou Level of Detail, popsanou v kapitole 1.3.2. Je ale důležité si uvědomit, že podrobnost informačního modelu se netýká jenom samotné geometrie, ale také podrobnosti, přesnosti a rozsahu popisných informací – atributů. V této souvislosti by tedy bylo možná příhodnější používat BIM termín *úroveň rozpracovanosti* (Level of Development). Tento pojem zavedl American Institute of Architects (AIA) v roce 2008 a vyjadřuje rozpracovanost modelu pěti hodnotami LOD (tabulka 4.1). Na obrázku 4.1 je potom

LOD	Popis
100	Celkový objemový model budovy, orientační plocha, objem, umístění a orientace ve 3D modelu, nebo jiné reprezentaci.
200	Jednotlivé stavební elementy jsou modelovány jako generalizované systémy nebo seskupení elementů s přibližným množstvím, rozměrem, tvarem, umístěním a orientací. K jednotlivým elementům mohou být přiřazeny negeometrické popisné informace.
300	Stavební elementy jsou modelovány jako specifické skupiny elementů přesné ve smyslu jejich množství, rozměrů, tvaru, umístění a orientace. K jednotlivým elementům mohou být přiřazeny negeometrické popisné informace.
400	Stavební elementy jsou modelovány jako specifické objekty s přesným rozměrem, tvarem, umístěním, množstvím, orientací, informacemi o zhotoviteli a podrobnými detaily. K jednotlivým elementům mohou být přiřazeny negeometrické popisné informace.
500	Stavební elementy jsou modelovány tak jak byly postaveny a dodány s přesnými rozměry, množstvím, tvarem, polohou a orientací. K jednotlivým elementům mohou být přiřazeny negeometrické popisné informace. Takový model může být následně použit pro správu a údržbu nemovitosti.

Tab. 4.1: Úrovně rozpracovanosti (LOD) v BIM [1]

poněkud zjednodušené vyjádření úrovní rozpracovanosti podle Foxeho [19]. Ačkoliv byly úrovně rozpracovanosti původně navrženy hlavně pro návrh nových budov, mohly by být velmi dobře aplikovány i na budovy historické, zejména pokud je plánována jejich rekonstrukce. Jaké úrovně BIM chceme dosáhnout je přitom vhodné rozmyslet předem, aby navržená struktura modelu umožňovala případné další přidávání detailů.



Obr. 4.1: Úrovně BIM podle [19]

S volbou vhodné podrobnosti modelu souvisí také jeho předpokládané další využití. Technologii informačního modelování je možné využít jak pro tvorbu precizních

modelů pro potřeby rekonstrukcí a přestaveb, tak pro modelování méně podrobných reprezentací pro specifické účely. Výsledný informační model může být využitelný například jako:

- informační systém pro zájemce o památky z řad více či méně odborné veřejnosti – nejnižší úroveň rozpracovanosti, model je přibližně rozdělen na jednotlivé architektonické elementy se stručným popisem v rámci atributových dat,
- 3D prostorová databáze dat stavebněhistorických průzkumů – se střední úrovní rozpracovanosti, model je podrobně rozdělen na jednotlivé stavební elementy z architektonicko-historického hlediska, jsou k dispozici podrobná atributová data, odkazy na doplňující informace v dalších souborech a databázích,
- komplexní informační model pro potřeby rekonstrukce a následné správy budovy na úrovni BIM nově navrhované budovy, včetně vnitřního zařízení a systémů.

Zajímavou otázkou v tomto kontextu je možnost derivace dat mezi jednotlivými úrovněmi rozpracovanosti (zejm. samozřejmě odvozování jednodušších reprezentací z podrobnějších).

Za primární výsledky pro potřeby památkové péče mohou být považovány 3D geometrické modely, které představují současné (as-built, as-found) fyzické charakteristiky historických budov. Aby však bylo možno splnit požadavky na BIM, je nutno integrovat také popisné informace. Ve výsledném informačním modelu potom budou obsažena následující atributová data [51, 83]:

1. lokalizace a určení budovy – souřadnice ve státním souřadnicovém systému, informace z katastru nemovitostí (č.p., parcelní číslo, způsob využití, vlastník a údaje o změnách vlastnictví),
2. historické dokumenty,
 - textové dokumenty – historická rešerše – dějiny objektu, archivní prameny, kroniky, přepisy historických dokumentů,
 - rastrová data – staré mapy, plánová dokumentace, archivní fotografie a další obrazový materiál,
3. architektonický rozbor objektu – materiál, konstrukční systémy, informace o jednotlivých stavebních prvcích, stavební historie, rozlišení konstrukcí dle stavebních etap, umělecko-historické i estetické hodnocení částí objektu,

4. údaje o stavu památky – úzce souvisí s předchozím bodem,
 - textové dokumenty z průzkumů – použité materiály, stavební techniky, stav, poškození a strukturální problémy,
 - rastrová data z průzkumů – kresebná dokumentace, fotografie, fotoplány, mapy,
 - vektorová data z průzkumů – plánová dokumentace vzniklá při geodetickém zaměření budovy (situace, pohledy, půdorysy, svislé řezy),
5. údaje o rekonstrukcích, údržbě a jiných stavebních zásazích – v rastrové i vektorové podobě.

Z uvedeného je patrné, že zásadním podkladem pro tvorbu informačního modelu památkového objektu na území České republiky jsou výsledky stavebněhistorických průzkumů [83].

Výsledný model historické budovy bude součástí informačního systému, na který je opět kladena řada požadavků. Požadovanou funkcionalitu informačního systému je možno shrnout následovně [34, 37, 51]:

1. možnost definování vzájemných a hierarchických vztahů mezi objekty modelu,
2. správa popisných informací – atributových dat, kterými je model sémanticky obohacen,
3. reprezentaci 4D dat – dat s časovou složkou,
4. nástroje pro 3D editaci,
5. 2D a 3D vizualizace památkového objektu ve vhodných měřítkách,
6. prohlížení popisných dat, fotografií a dalších dokumentů,
7. vytváření atributových, prostorových a multikriteriálních dotazů,
8. automatický export dat do podoby dokumentace vhodné pro plánování rekonstrukcí a historické studie.

4.2 Volba vhodných nástrojů

K tomu, abychom mohli vytvořit a spravovat informační model a dostát požadavkům uvedeným výše, je třeba vhodně zvolit softwarové nástroje. Bohužel v současné

době neexistuje žádné komplexní řešení určené přímo pro tvorbu a správu kompletního sémanticky obohaceného 3D modelu historické budovy [34]. Oba v současné době existující přístupy ke správě prostorových informací, tedy BIM a GIS mají svoje výhody a nevýhody (viz obr. 4.2) a těžko tak lze zcela upřednostnit jeden přístup před druhým. Prozatím tedy bude zřejmě nutné využít výhod obou přístupů a při tvorbě a správě BIM modelů památek používat kombinaci vhodného softwaru z obou odvětví.

Criteria for Information Management Process	BIM	GIS
Definition of specified mutual and hierarchical relationships	X	✓
Enhanced attribute management	X	✓
3D editing functionalities	✓	X
Spatial and multi-criteria query-able characteristics	X	✓
Representation of multi-layered conceptual themes in 3D	✓	X
Temporal (4D) representations	✓	✓

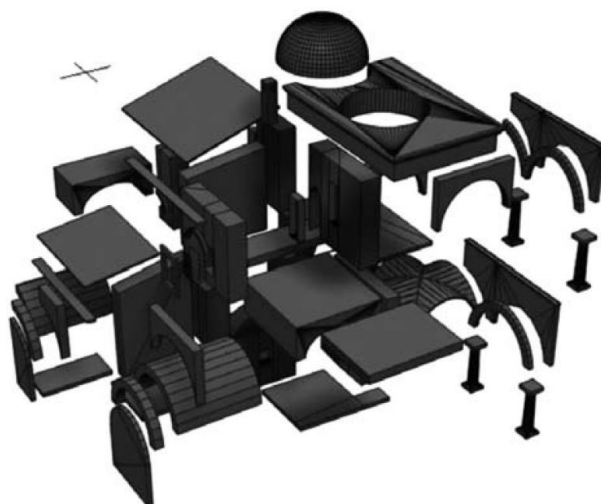
Obr. 4.2: Porovnání možností BIM a GIS [34]

Největší výhodou BIM softwaru představuje možnost vytvářet 3D modely s využitím inteligentních parametrických elementů. Na druhou stranu existující knihovny parametrických objektů většinou nejsou vhodné pro 3D rekonstrukci historických budov, protože v takových budovách se i prvky stejného typu (zdi, sloupy, okna. . .) mohou značně lišit svými parametry, neboť v historii neexistovala industrializace a prefabrikace ve stavebnictví v takové míře jako dnes. Dále může být problematická integrace nových atributů specifických pro historické památky a stejně tak jsou limitovány možnosti vytváření prostorových dotazů a integrace různorodých datasetů [34, 44, 37]. Nicméně i přes uvedené nedostatky zůstává BIM silným nástrojem pro fázi modelování. Návrh nových knihoven, které usnadňují 3D rekonstrukci, případně převod nestrukturovaného mráčka bodů do podoby objemového 3D modelu je potom velmi častým námětem vědeckých prací [36, 37, 38, 39, 40, 41, 42].

Naproti tomu GIS nástroje jsou primárně určeny pro správu a dotazování prostorových informací. V GIS prostředí proto lze dobře pracovat se sémanticky obohacenými objekty. Negeometrické atributy mohou být propojeny s geometrií a spravovány v relační databázi. Proto je umožněno vytváření prostorových i atributových dotazů a komplexních analýz [44, 51]. Na druhou stranu jsou ale v GIS zatím stále značně limitovány možnosti 3D editace. Není tak příliš překvapivé, že přístupem, který opravdu využívá současných možností softwaru, zůstává výše uvedená kombinace BIM pro zpracování dat laserového skenování, fotogrammetrie a/nebo 3D modelování a GIS pro správu dat, propojení s dalšími informačními zdroji a analýzy tak, jak je to popsáno v [34, 44, 53, 48, 49] nebo plánováno v [42].

4.3 Tvorba modelu

Abychom mohli později pracovat s popisnými informacemi vztaženými k jednotlivým částem výsledného modelu, je třeba provést segmentaci 3D geometrie na komponenty, které odpovídají stavebním elementům budovy. V případě, že pracujeme s daty ve formě mračna bodů, je třeba v něm nalézt tvary odpovídající architektonickým prvkům a nahradit je příslušnými geometrickými objekty z předem připravené knihovny. Pokud nejsou podkladem 3D rekonstrukce data laserového skenování ani fotogrammetrie a pracujeme například na základě existující dokumentace ve formě 2D výkresů, je obdobným způsobem třeba model strukturovat při ručním modelování. Jediným rozdílem tak je, že v druhém případě nerozdělujeme celkové mračno bodů na části, ale naopak z jednotlivých komponent skládáme výsledný celek [34].



Obr. 4.3: Rozdělení modelu na jednotlivé architektonické komponenty [34]

V souvislosti s BIM se často hovoří o parametrickém modelování. Přitom je nutno si uvědomit, že parametrických přístupů k 3D modelování je více a jaký přístup použijeme, závisí hlavně na dostupných vstupních datech. Klasický BIM software pro modelování je pokročilý architektonický 3D CAD nástroj, který využívá inteligentní objekty. Tyto objekty – modely architektonických elementů reprezentují všechny důležité fyzické a funkční charakteristiky svých skutečných předloh. Kromě samotných objektů jsou v BIM definovány i vzájemné vztahy mezi nimi. Pokud máme k dispozici dokumentaci budovy ve formě 2D výkresů, můžeme vytvořit virtuální 3D model ručně s využitím inteligentních objektů (viz např. [34] – obr. 4.3). Takový přístup bude zřejmě nejbližší klasické BIM filozofii, protože odpovídá postupu tvorby architektonického modelu navrhované budovy.

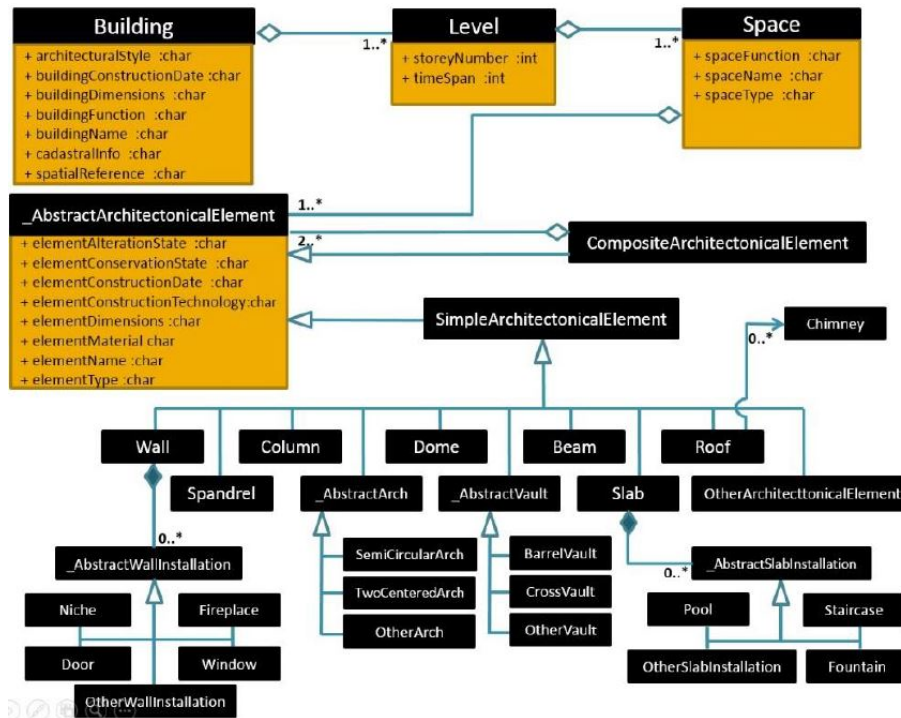
Podobný přístup k parametrickému modelování můžeme využít pro zpracování dat laserového skenování nebo fotogrammetrie. Pokud máme připravenou knihovnu parametrických elementů, můžeme zautomatizovat proces mapování vektorových dat do mračna bodů. Taková knihovna může být vytvořena na základě historických architektonických pramenů a obsahuje popis jednotlivých prvků v textovém souboru, např. s využitím jazyka GDL. Architektonické elementy jsou potom většinou poloautomaticky identifikovány v mračnu bodů a je provedeno nahrazení diskrétního modelu spojitými geometrickými primitivy [37].

Posledním typem parametrické 3D rekonstrukce architektury je potom procedurální modelování s využitím tvarové gramatiky. Takové modelování je podobné předchozímu přístupu, protože využívá popisu architektury v textovém, člověkem čitelném souboru. Ačkoliv je tento přístup většinou využíván spíše pro účely modelování zástavby rozsáhlejších území a pro vizualizace (viz např. [62] nebo [76]), mohlo by se jednat o vhodnou metodu i pro 3D rekonstrukci jednotlivých budov pokud jsou dostupné 2D výkresy [72]. Důraz na sémantiku a definování hierarchických vztahů mezi jednotlivými elementy je BIM velmi blízký.

Před samotným 3D modelováním je nutno velmi dobře rozmyslet strukturu výsledného modelu. Především je třeba určit, v rámci jakých jednotek budou lokalizovány jednotlivé stavební elementy. Centofanti a kol. [51] začínají od komplexu budov (building complex). V každém komplexu je možno identifikovat jednu nebo více budov (building). Nejmenší jednotkou je potom místnost (single room). Každý architektonický element je přiřazen této nejmenší jednotce. Podobně je strukturován i model Saygi a kol. [44] (viz obr. 4.4), přičemž zde je ještě mezi budovu a místnost (plochu, space) vložena třída podlaží (level). Nakonec Jedlička a kol. [49] počítají kromě tříd pro konstrukční prvky budovy i se třídou mobiliáře (movable).

4.4 Integrace do GIS pro účely správy modelu

Pokud přijmeme tvrzení, že BIM nástroje jsou vhodné pro 3D modelování a GIS je v současné době výhodnější pro správu informací, stojíme před problémem integrace BIM modelu do GIS prostředí. Tento problém zřejmě stále nemá v současné době jednoznačné řešení, což je patrné z počtu vědeckých prací, které se tímto tématem stále zabývají. Pokud hovoříme přímo o odvětví památkové péče, s převodem do GIS prostředí počítají např. práce [34, 44, 42, 53, 48, 49]. Pouze v příspěvcích Doreho a Murphyho [48] a Jedličky a kol. [49] je však možné nalézt podrobnější popis postupu převodu 3D modelu do GIS.



Obr. 4.4: UML diagram tříd a vztahů mezi komponentami budovy [44]

První z uvedených prací, tedy [48], využívá pro usnadnění integrace otevřené datové modely IFC a CityGML. HBIM model, který vznikl z dat laserového skenování mapováním parametrických objektů do mračna bodů, je z BIM softwaru ArchiCAD exportován do formátu IFC. BIM standard IFC využívá objektově orientovaný přístup, kdy je 3D model klasifikován do sémantických tříd. Tím by mohla být ulehčena konverze do podobně strukturovaného GIS formátu CityGML, kdy by byly sémantické třídy v IFC mapovány do odpovídajících tříd CityGML, jak je popsáno např. v [31].

Dore a Murphy však popisují pouze dočasný způsob, kdy byl jako prostředník využit program SketchUp. IFC model byl tak nejprve konvertován do jeho nativního formátu SKP. Tím se ovšem nezachovají sémantické informace z HBIM (!) a je převedena pouze geometrie. Třídy je proto nutno vytvořit nově s využitím CityGML pluginu. Tento plugin vytvoří při exportu sémantické třídy na základě předchozího rozvrstvení modelu v programu SketchUp. Výsledkem byl XML soubor vytvořený dle struktury CityGML, do kterého byly další informace dopisovány ručně, stejně jako bylo ručně prováděno připojení externích zdrojů. Po této editaci byl model importován do GIS nástroje ArcGIS s využitím rozšíření ArcGIS Data Interoperability.

Jedlička a kol. [49] vytvářejí 3D model přímo v programu SketchUp po importu měřených dat, předzpracovaných v příslušných programech pro zpracování dat z laserového skenování a dalších geodetických metod. Pro vytvoření sémantických objektů

je potom využít výše uvedený postup a CityGML plugin. Kromě toho je ale popisována také jiná metoda, kdy je model importován do scény nástroje pro procedurální modelování CityEngine (v podporovaném formátu COLLADA DAE) a teprve z ní exportován do ESRI geodatabáze.

Z uvedeného je patrné, že postupy pro převod BIM modelu do GIS nejsou v současné době zcela ideální. Lze však předpokládat, že do budoucna dojde ke zlepšení s tím, jak se bude obecně ve stavebnictví rozšiřovat používání BIM a pro posouzení interakce budovy s okolím bude nutno používat i nástroje GIS. Zatím je nutno vhodně kombinovat dostupné metody pro převod s ohledem na charakter vstupních dat a použité postupy při 3D modelování. Vzhledem k tomu, že GIS bude ve většině případů cílovým umístěním modelu, odpadá naštěstí nutnost zpětné konverze do BIM. To je ještě náročnější problém kvůli nutnosti rekonstruovat parametrické objekty s implicitně uloženou geometrií v BIM z jednodušších, plochami ohraničených objektů v GIS [3].

5 Procedurální modelování historické krajiny a objektů

Procedurální modelování bylo teoreticky představeno v kapitole 3, kde bylo také řečeno, že se jedná o velmi efektivní metodou pro 3D modelování rozsáhlých zastavěných oblastí. Pro studii použití prostředků BIM a GIS pro tvorbu modelů historických budov má význam, protože:

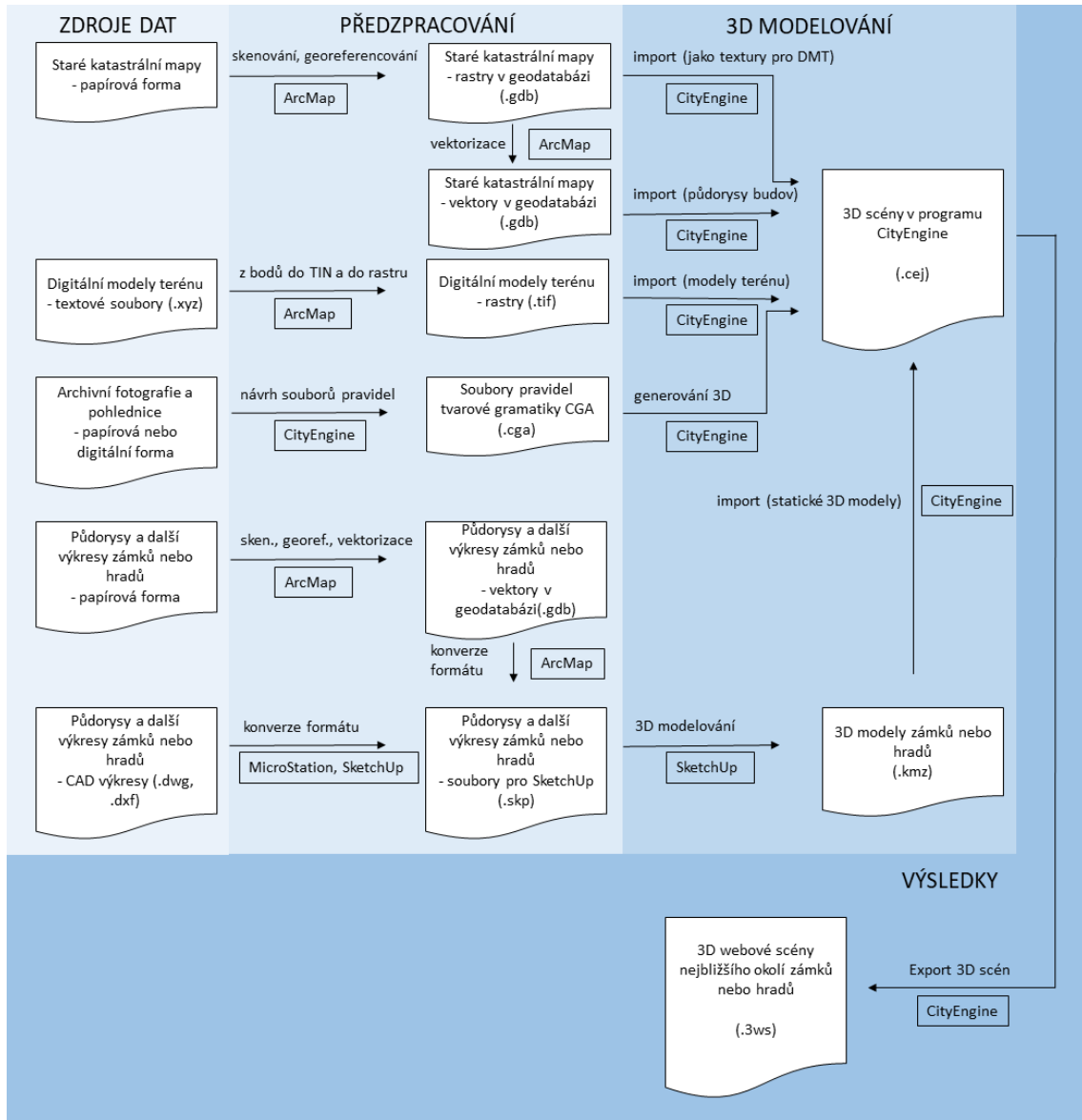
1. technologie použitá při procedurálním modelování, uchovávání modelu v prostorové databázi a jeho webové prezentaci je využitelná také pro informační modely budov integrované do GIS,
2. procedurálně rekonstruovaná krajina je vhodným kontextem pro prezentaci souřadnicově umístěného informačního modelu budovy,
3. s informačním modelováním ho spojuje důraz na sémantiku a popis struktury modelované předlohy (viz 3).

Tato kapitola se proto bude zabývat popisem pracovního postupu 3D procedurálního modelování zastavěné historické krajiny na základě dvourozměrných podkladů – starých map a historických fotografií. Přehledné schéma pracovního postupu je na obrázku 5.1. Konkrétně se v tomto případě jedná o adaptaci postupu pro potřeby procedurálního modelování nejbližšího okolí hradů a zámek v různých časových obdobích, přičemž bylo počítáno také s vkládáním CAD modelů významných budov do vzniklé 3D scény (viz dále).

5.1 Zdrojová data a jejich zpracování

Zdrojovými daty pro procedurální modelování jsou zejména mapy velkých měřítek a digitální modely terénu. V českém prostředí budou proto nejobvyklejšími datovými vstupy císařské povinné otisky stabilního katastru 1 : 2880, další vyřazené katastrální mapy, a první vydání Státní mapy 1 : 5000 – odvozené (SMO-5). S využitím informace obsažené v uvedených mapách je možno modelovat historický stav zástavby v různých časových obdobích. Pro rekonstrukci současného stavu je pak případně možné využít aktuální katastrální data například ve formě vektorových dat z Registru územní identifikace, adres a nemovitostí (RÚIAN). Pro zachycení menšího zájmového území mohou být využitelné i další speciální mapy nebo plány.

Před vlastním modelováním je nutno všechny podklady předzpracovat metodami běžnými v digitální kartografii. Pokud jsou mapy či plány k dispozici v papírové



Obr. 5.1: Postup tvorby 3D webových scén s využitím procedurálního modelování

podobě, je nutno přistoupit k jejich skenování s vysokým rozlišením a naskenované podklady je třeba georeferencovat. Pro georeferencování jsou v případě map velkých měřítek používány zejména globální transformační metody, jako je afinní transformace nebo polynomičká transformace druhého řádu. Souřadnicově umístěné podklady je nutno vektorizovat. I když experimenty s automatickou vektorizací probíhají již dlouhou dobu [80], je zřejmě stále nejspolehlivější a nejuniverzálnější metodou ruční vektorizace. Zájmovými objekty jsou v našem případě zejména půdorysy budov a dále jako body vektorizované stromy. Pro umístění vztažných bodů jednotlivých stromů v rámci polygonů plošné vegetace je možné s výhodou využít různých funkcí GIS softwaru pro náhodné generování bodů uvnitř polygonu nebo na liniích.

Pro lepší vizualizační možnosti v rámci 3D scény je vhodné vektorizovat také vodní plochy a toky, pro fotorealistické scény potom veškerý polohopisný obsah mapy a ve speciálních případech také výškopis. Pro pozdější využitelnost je nutno vytvořit vhodný datový model a rozdělit vektorizovaný obsah do tříd a také přiřazovat objektům atributová data. Poslední se týká zejména budov, které je možné rozdělit například na základě údajů o spalnosti z map stabilního katastru. Dále se v praxi osvědčilo rozlišovat pomocí atributových dat například druhy stromů (solitér, strom v lese, ovocný strom v sadu. . .).

Pro zachycení výškového členění krajiny je třeba využít vhodný digitální model terénu. Při modelování často vytváříme rekonstrukci okolí určité významné budovy (např. hrad či zámek), modelujeme tedy historické části zastavěné krajiny, které v mnoha případech neprodělaly příliš významných změn. Kromě toho je vhodné omezit zájmovou oblast, která má být modelována, aby v ní nebyly známky moderních terénních úprav, jako jsou násypy nebo zářezy dálnic, železnice apod. Za těchto předpokladů je často možné využít i pro reprezentaci historického terénu současné digitální modely, což je vhodné vzhledem k jejich připravenosti k použití, přesnosti a podrobnosti. V současné době je možné v ČR využít Digitální model reliéfu České republiky 4. či 5. generace od Českého úřadu zeměměřického a katastrálního. Ten je k dispozici v podobě výšek diskrétních bodů v pravidelné síti (5 x 5 m) s úplnou střední chybou výšky 0,3 m – 1 m (DMR 4G) či v podobě výšek diskrétních bodů v nepravidelné trojúhelníkové síti (TIN) s úplnou střední chybou výšky 0,18 m – 0,3 m (DMR 5G) [84].

I když se budeme snažit pečlivě vybírat zájmovou oblast modelování tak, abychom vyloučili výskyt míst s moderními změnami terénu, ne vždy se můžeme takovým oblastem zcela vyhnout. V takovém případě existují v podstatě tři varianty řešení. Zaprvé můžeme využít možnosti softwaru pro procedurální modelování, který bude popisován v následující sekci, a upravit terén manuálně. Dále je pro větší terénní změny možno využít filtrů používaných v GIS. Poslední možností je potom zavrhnout moderní modely terénu a využít výškovou informaci obsaženou ve starých mapách (zejm. vrstevnice v SMO-5). V tom případě ale musíme počítat s nutnou vektorizací vrstevnic a odvozením digitálního modelu terénu na jejich základě a také s výrazně nižší přesností takových dat. Na druhou stranu se jedná o jediný správný postup v místech, kde proběhly významné terénní změny, a samozřejmě také v případě, že je náš výzkum zaměřen také na zkoumání změn terénního reliéfu v čase.

Posledním typem zdrojových dat jsou historické fotografie a pohlednice, které jsou nezbytné k tomu, abychom mohli získat představu o rázu krajiny a zástavby

v minulosti. Získané poznatky potom můžeme využít pro navržení vhodného souboru pravidel, který bude následně sloužit pro procedurální generování 3D modelu. Kromě toho je možné tyto obrazové materiály souřadnicově umístit dle místa pořízení záběru a výslednou bodovou vrstvu dále využít při vizualizaci.

Pro předzpracování 2D dat byl v našem případě využíván zejména GIS software ArcGIS. Stejně tak je ale možné využít v této fázi alternativní GIS programy, jako například open-source QGIS.

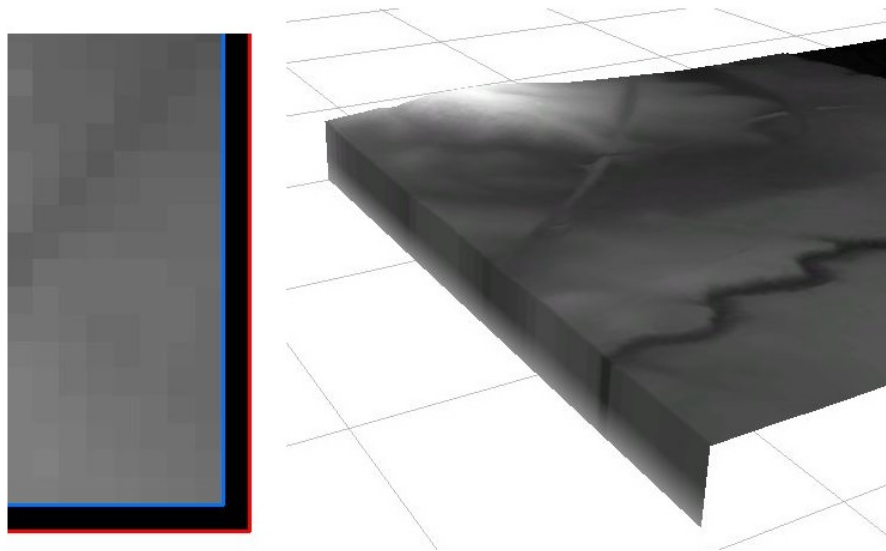
5.2 Příprava 3D scény

Pro sestavení 3D scén byl vybrán program CityEngine popsaný v kapitole 3.7. Výsledná scéna se skládá z několika vrstev. Obvykle se jedná o digitální model terénu potažený mapovou texturou, vektorové polygonové vrstvy půdorysů budov a vodních ploch, sloužící jako podklad pro procedurální modelování, bodovou vrstvu stromů pro stejný účel a poté systémové vrstvy pro reprezentaci pozadí 3D scény (obloha). Digitální model terénu tvoří základ 3D scény, program CityEngine vyžaduje na vstupu formát TIFF. Vzhledem k tomu, že námi obvykle používaná data DMR od ČÚZK jsou k dispozici v textovém formátu (.xyz), je nutno nejprve provést předzpracování v programu ArcMap. Jedná se o následující kroky:

1. zjistíme přibližný rozestup bodů v DMR – *Point File Information*, vychází přibližně 3 m u DMR 5G, resp. 5 m u DMR 4G,
2. konvertujeme DMR z textového formátu do formátu shapefile multipoint – *ASCII 3D to Feature Class*,
3. pokud jsou data k dispozici ve více souborech, spojíme je dohromady – *Merge*,
4. vytvoříme TIN z jednotlivých bodů – *Create TIN*,
5. převedeme TIN do rastrového formátu – *TIN to Raster*, výstupní velikost pixelu volíme dle přibl. rozestupu bodů, tj. kolem 3 m, více nemá pro naše účely smysl,
6. ořízneme výsledný rastr polygonem zájmové oblasti – *Clip*.

Při volbě zájmové oblasti je nutno si uvědomit, že výsledný model terénu bude s největší pravděpodobností obsahovat hodnoty NoData. To je dáno tím, že v GIS softwaru ořezáváme rastrový soubor s určitou velikostí pixelu vektorovým polygonem zájmové oblasti s prakticky nulovou tloušťkou hrany. Pixely, kterými hrana polygonu

prochází se tak budou dělit na dvě skupiny a těm, které leží z větší části mimo polygon, bude při oříznutí přiřazena hodnota NoData. Pokud si toho nebudeme vědomi, budou v případě chybně zvoleného ořezového polygonu hodnoty NoData rozmístěny různě podél okraje, což může představovat problém při vizualizaci rastru, neboť CityEngine takové pixely vyhodnotí jako pixely s nulovou výškou (obr. 5.2).



Obr. 5.2: Vlevo: hodnoty pixelů NoData (černá barva na okraji, ideální případ), vpravo: hodnota NoData interpretovaná při vizualizaci jako nulová výška

Při vizualizaci tak dostaneme DMR s bočními přesahy do nulové výšky, které jsou dle volby zájmové oblasti spojitě jako na obrázku 5.2 nebo se může v horším případě jednat i o soubor nespojitých trojúhelníků s vrcholy v nule. To by samozřejmě bylo při vizualizaci nežádoucí, při správném postupu ale může být tento efekt naopak využit i pro zlepšení dojmu z vizualizace. Takový postup vyžaduje, aby byl digitální model terénu vytvořen v souřadnicovém systému mapového okna použitého následně pro export. Pixely modelu terénu tak budou rovnoběžné s osami souř. systému. Při vhodně zvoleném ořezovém polygonu, opět rovnoběžném s osami, budou všechny krajní pixely mít hodnotu NoData. Pomocí *Raster Calculatoru* je pak možné nahradit tuto hodnotu hodnotou o několik desítek metrů nižší než je nejnižší hodnota rastru. Tak vzniknou při vizualizaci „převíslé“ okraje modelu terénu a výsledek může připomínat např. blokdiagram (viz další obrázky 3D scén). Zespodu je potom výsledek možno uzavřít polygonem s vhodně zvolenou nadmořskou výškou. Pokud tento vzhled nepožadujeme, je naopak možno přidělit okrajovým polygonům hodnotu jejich nejbližších sousedů a tak při vizualizaci dosáhnout běžného vzhledu DMT.

Texturu pro digitální model terénu lze vytvořit několika způsoby podle toho, jakou míru fotorealismu požadujeme. Nejjednodušší možností je použít přímo georeferencovaný rastrový obraz staré mapy. V takovém případě nebude výsledkem fotorealistická scéna, ale to nám pro některé účely nemusí vadit. Rozhodující je ale vždy vizuální kvalita použité mapy. Například rastrová podoba mapy císařských povinných otisků stabilního katastru je vzhledem ke své barevnosti použitelná ve výsledné scéně rovnou bez větších úprav. Na druhou stranu například Státní mapa 1 : 5000 – odvozená obsahuje kromě výškopisu v podstatě dvoubarevná binární data a pro tvorbu pohledných vizualizací se příliš nehodí.

Proto je další variantou použití vektorizované podoby mapy a její převedení zpět do rastrové podoby, tedy export vektoru do vhodného rastrového formátu. Taková mapa potom obsahuje symbologii dle nastavení v GIS a může být použita buď samostatně nebo v mapové kompozici s původní rastrovou mapou. Ani v tomto případě však nemůžeme hovořit o fotorealistickém výstupu. Řešením může být nahrazení symbologie vektorových vrstev fotografickými texturami. To je možné i v GIS softwaru (např. volba *Picture Fill Symbol* pro polygonové vrstvy v ArcMap) i když v tomto případě musíme počítat s poněkud těžkopádnějším ovládním vzhledem k tomu, že GIS programy nepočítají s nastavením velmi detailních fotorealistických textur. Výsledek sice zdaleka neodpovídá výstupům z herních engineů, na druhou stranu je ho možné vytvořit velmi rychle bez následné ruční editace, což odpovídá obecnému přístupu procedurálního modelování.



Obr. 5.3: 3D scéna s texturou na DMT – vpravo rastrový obraz staré mapy a vlevo její vektorová podoba

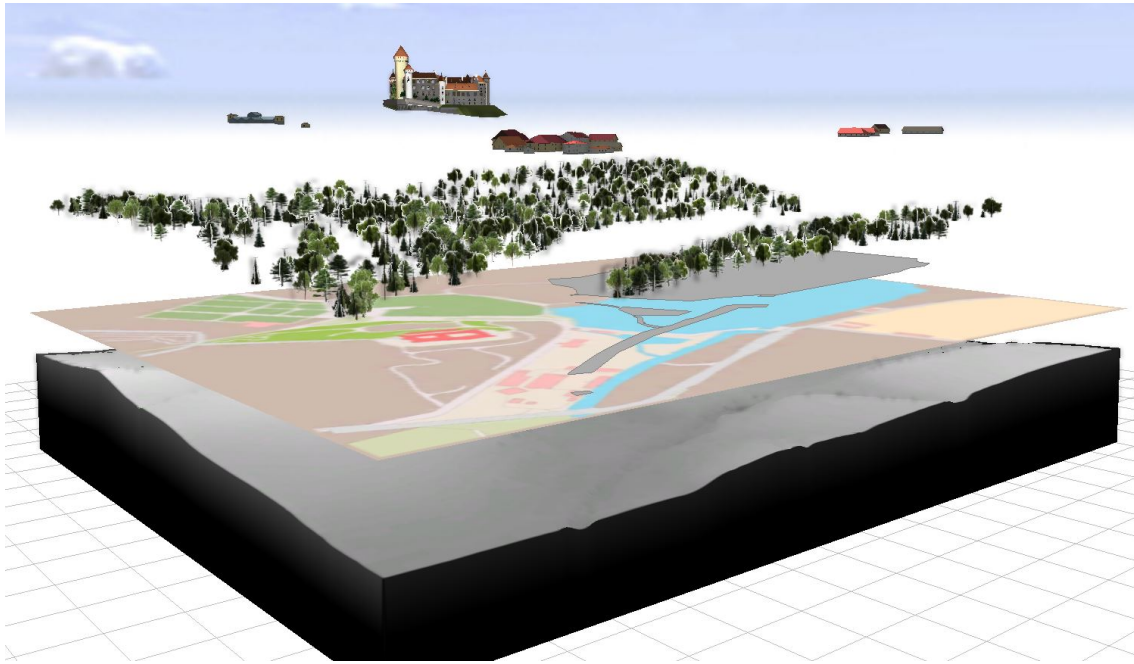
Ať už se rozhodneme vytvořit texturu terénu libovolným způsobem, je potřeba ještě zohlednit specifikum, s jakým CityEngine přistupuje k souřadnicovému umístění digitálního modelu terénu a použité textury. Nositelem informace o souřadnicovém umístění je vždy model terénu a to i přesto, že použijeme georeferencovanou

mapu (CityEngine soubory s informací o souř. umístění mapy ignoruje). Mapa je tedy prostě roztažena přes celý model terénu.

Uvedené může přinést problémy, protože při použití stejného ořezového polygonu pro model terénu i mapu v GIS softwaru nikdy nebude výsledek oříznutý stejně. To je v tomto případě způsobeno nestejnou velikostí pixelu mapy a modelu terénu. Mapu je proto nutno ořezávat přesně podle rozsahu (extentu) modelu terénu a to včetně hodnot NoData na jeho okrajích. Situaci ilustruje pravá strana obrázku 5.2, kde je modrá linie hrana ořezového polygonu digitálního modelu terénu, která prochází pixely s hodnotou NoData při jejich samém okraji. Naproti tomu červená linie reprezentuje polygon vytvořený podle výsledného rozsahu DMT. Pokud tímto vzniklým polygonem ořízneme mapu a použijeme ji jako texturu modelu terénu, mapa bude umístěna správně a později vložené přesně souřadnicově umístěné vektorové půdorysy budov budou odpovídat svojí polohou půdorysům budov na textuře. V opačném případě by byla mapa rozměrem menší než model terénu a roztáhla by se nesprávně do všech směrů. To platí, ať už jsou hodnoty NoData později nahrazeny hodnotou výšky okraje nebo ne. Aby se předešlo problémům s kresbou mapy na okrajích modelu terénu, je dále vhodné vytvořit na exportované mapě jednobarevné okraje dostatečné šířky (kolem 40 pixelů při rozlišení mapy 0,25 m na pixel).

Když již máme do scény v City Enginu vložena rastrová data, můžeme pokračovat v přidávání vektorových vrstev. Pro přenos vektorových dat z GIS softwaru je nejvhodnější volbou formát ESRI shapefile, případně ESRI geodatabáze, pro import výchozích tvarů lze ale využít také formáty DXF a OSM (OpenStreetMap). Všechna vektorová data jsou implicitně vkládána do nulové výšky ve scéně, pro jejich další využití je tedy potřeba je správně výškově zarovnat s digitálním modelem terénu.

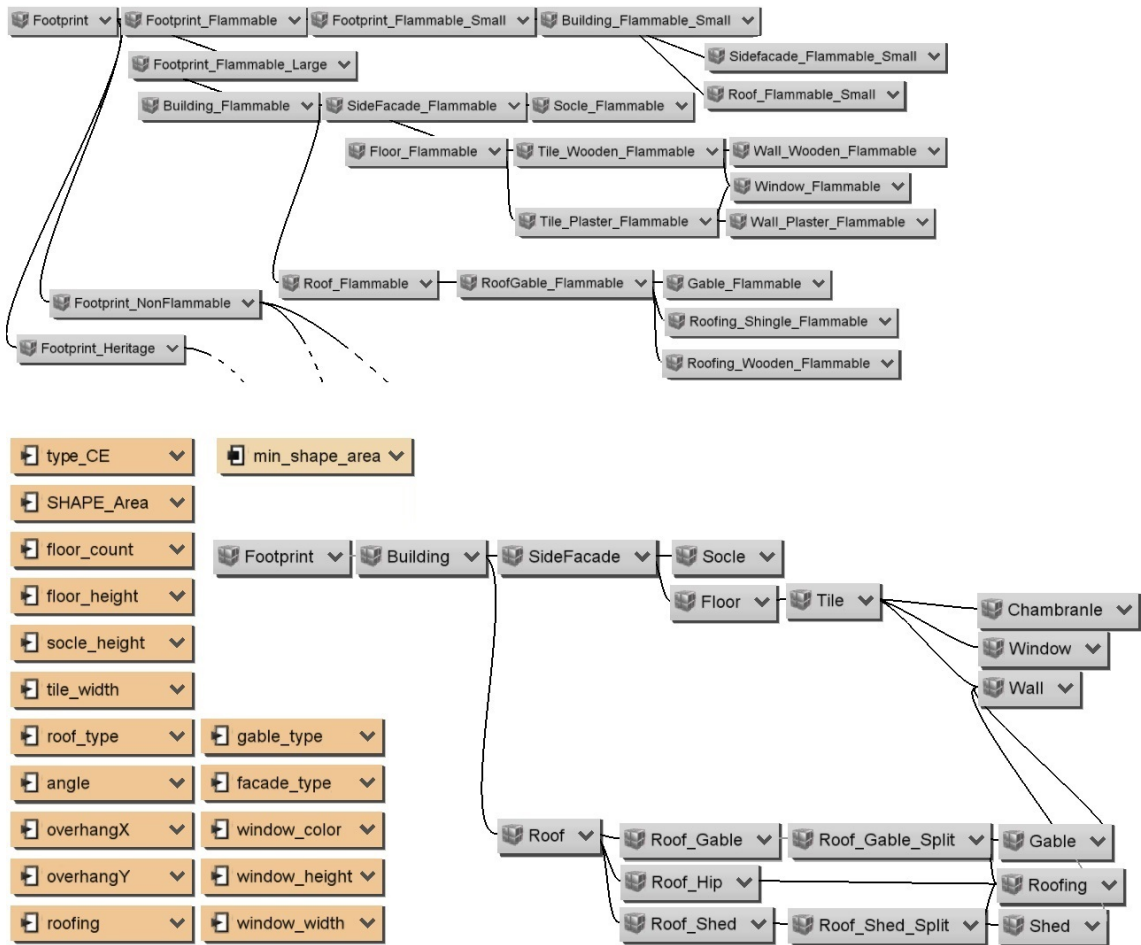
Výškové zarovnání probíhá tak, že jsou nejprve zarovnána vektorová data dle DMT (Align Shapes to Terrain) a poté je naopak terén zarovnán dle vektorových dat (Align Terrain to Shapes). Pro první operaci je většinou nejvhodnější využívat volbu *Translate to Average*, tedy přesun do průměrné výšky. Druhá operace je nutná zejména pro zarovnání terénu do roviny v místech, kde se nachází prvky polygonových vrstev (domy tedy budou stát na rovině), je ji ale nutno provádět pouze obezřetně vzhledem k tomu, že mění hodnoty výšek digitálního modelu terénu. Uvedeným způsobem se do scény vloží bodová vrstva stromů a polygonové vrstvy půdorysů budov a vodních ploch. Všechny prvky ve vrstvě vodních ploch je vhodné po importu pojmenovat `__water`, což zajistí, že budou při exportu vyhodnoceny jako vodní hladina a v exportované scéně náležitě renderovány.



Obr. 5.4: Jednotlivé vrstvy 3D scény – shora: statický 3D model zámku, proc. generované budovy, proc. generované stromy, polygony vodních ploch, vektorová mapa převedená do rastru jako textura DMT, digitální model terénu

5.3 Procedurální a CAD modelování

Pokud máme připravena všechna výše popsaná data ve 3D scéně, můžeme začít s procedurálním modelováním, pro které je zásadní ještě jeden vstup a to soubor pravidel tvarové gramatiky. Pro tvorbu tohoto souboru je vhodné využít archivních fotografií a pohlednic, které nám zprostředkují představu o vzhledu zástavby v modelované lokalitě. Podstatné přitom je, v jaké úrovni detailu chceme zástavbu generovat. Procedurální modelování není oproti klasickému přístupu co se týče detailu nijak omezeno. Vždy záleží na tom, jak propracovaný soubor pravidel do procesu vložíme. Efektivita procedurálního modelování je založena právě na možnosti generovat velmi detailní obsah na velmi rozsáhlém území. Na druhou stranu je nutno zvážit, kolik vstupních informací o dané lokalitě máme a zda výsledek bude hodnověrný, tedy podložený skutečnou znalostí území. To nelze v případě modelování historického stavu vždy zaručit, protože i při existenci dostatečného množství archivních fotografií lokality o vzhledu většiny běžné zástavby nemáme dostatek informací. Je třeba si proto uvědomit, že při procedurálním modelování historického stavu půjde vždy spíše o rekonstrukci rázu krajiny a zástavby a ne o přesné modelování budovy po budově. Pokud s tím počítáme, může nám procedurální modelování naopak pomoci a zaplnit hluchá místa s využitím náhodných atributů a určité pravděpodobnosti vzhledu modelovaných objektů.



Obr. 5.5: Výňatek z původně používaného souboru pravidel (nahore) a výsledný soubor pravidel (dole)

Na obrázku 5.5 jsou ukázky dvou souborů pravidel určených pro přidělení polygonové vrstvě půdorysů budov. Oba soubory jsou navrženy pro modelování zástavby ve spíše nižší úrovni podrobnosti (LOD 2 – 3 dle CityGML). Podkladem pro tyto soubory pravidel jsou primárně povinné císařské otisky stabilního katastru, takže je počítáno s možností využít informaci o typu budovy (spalná, nespalná, významná), která je reprezentována barvou výplně půdorysů budov v mapě. V horní části obrázku je výňatek z původně navrženého souboru pravidel. Ten dělení na jednotlivé typy řeší hned na začátku, tedy v prvním pravidle, kdy jsou do tří typů rozčleněny hned výchozí tvary půdorysů budov. Dále jsou potom půdorysy spalných i nespalných budov kategorizovány dle určité mezní plochy na malé a velké (toho je využito pro rozhodování o přidělení počtu podlaží). Teprve po tomto rozdělení dochází k dalšímu větvení pravidel na jednotlivé fasády, dále na podlaží atd. Uvedené je více ve shodě s logikou gramatiky CGA, protože přesně popisuje strukturu scény. Pokud by se výsledné typy budov zásadně lišily a jednalo by se o detailní modely, bylo

by vhodné se této struktury držet. V našem případě ale nevyžadujeme velký detail a spíše nás zajímá možnost používat soubor pravidel s malými obměnami pro zástavbu v různých částech České republiky. Typy budov budou ve výsledku rozlišeny zejména různými texturami. Proto byl celý soubor pravidel zjednodušen a výsledek je vidět v dolní části obrázku.

Podívejme se nyní na druhý soubor pravidel detailněji. Vlevo na obrázku vidíme dva sloupce proměnných, které jsou definovány tak, aby je bylo možné měnit i ručně v již vygenerované scéně. Gramatika CGA nazývá takové proměnné atributy. Hodnoty prvních dvou atributů jsou přebírány ze vstupních dat, tedy z vektorové vrstvy půdorysů budov a popisují typ budovy (spalná, nespalná, významná) a její výměru. Další atributy jsou potom implicitně vybírány na základě určené pravděpodobnosti, přičemž je při náhodném výběru zohledněn právě i typ budovy a její výměra. Jedná se o atributy popisující počet podlaží, výšku podlaží, výšku podezdívky, velikost dlaždic fasády (obdélník obsahující právě jedno okno), typ střechy a její parametry (sklon, přesahy), druh střešní krytiny, vzhled fasády a rozměry a typ oken. Poslední proměnná definující minimální výměru půdorysu pro generování vícepodlažních budov je potom definována jako konstanta a proto nemůže být po vyhodnocení při generování modelu dále měněna. Pokud je výměra budovy menší než zadaná hodnota, budova může mít pouze jedno podlaží, pokud je větší, je umožněno generování jedno i více podlažních budov.

Proces generování probíhá v souladu s běžným postupem použití tvarové gramatiky CGA (3.4). Výchozím tvarem je půdorys budovy (Footprint). V prvním pravidle je tento tvar nahrazen základním objemovým modelem budovy (Building) pomocí tvarové operace vysunutí do výšky, která odpovídá součtu výšky podezdívky s výškou podlaží vynásobenou počtem podlaží. Dále je provedeno rozložení na díly, které tvar Building nahradí tvary bočních fasád (SideFacade) a střechy (Roof). Na boční fasádu je dále aplikováno pravidlo pro rozdělení podle osy y , které nahradí tvar SideFacade tvarem podezdívky (Socle) a několika tvary podlaží (Floor) podle přiděleného počtu podlaží. Každé podlaží je dále děleno podle osy x na dlaždice (Tile), které představují část fasády s jedním oknem. Všechny dlaždice jsou poté děleny horizontálně i vertikálně tak, že jsou výsledkem tvary oken (Window) a šambrán (Chambranle). Zbylé části fasády jsou potom stěnami (Wall).

Tvar střechy je na základě přiděleného typu střechy nahrazen sedlovou střechou (Roof_Gable), valbovou střechou (Roof_Hip) nebo pultovou střechou (Roof_Shed). Typy střech, které je možné modelovat základními tvarovými operacemi jsou v tomto případě omezeny použitým softwarem. Na vytvořené střechy je potom dle typu použita tvarová operace rozložení na díly. Například sedlová střecha je rozdělena na

vertikální části (štít – Gable) a na části nakloněné (střešní roviny s krytinou – Roofing). Štít je potom dále pravidlem nahrazen na tvar stěny (Wall), neboť na něj bude následně aplikována stejná textura.

Všechny terminální tvary jsou nakonec potaženy odpovídající texturou. Protože je většina parametrů vzniklých budov definována jako atributy, je možno po vygenerování modelu dále upravovat jeho vzhled. Konkrétní budovy tak mohou být upravovány tak, aby lépe odpovídaly svým skutečným protějškům. Z pochopitelných důvodů jsou takto ručně upravovány zejména budovy viditelné na archivních fotografiích a pohlednicích. Nejdůležitější změnou bývá počet podlaží, jejich výška a typ střechy. Hlavně na barevných nebo kolorovaných fotografiích potom můžeme určovat typ střešní krytiny a její barvu. Velkých změn ve výsledném dojmu z budovy lze dosáhnout změnou velikosti oken nebo změnou šířky dlaždic, což ovlivní počet oken na jednotlivých fasádách. Soubor pravidel je navržen tak, aby bylo možné jednoduše přidávat nové možnosti pro texturování. Pokud máme k dispozici novou texturu, stačí ji vložit do příslušné složky projektu a přidat novou hodnotu atributu a větev do příslušného pravidla. Tuto úpravu může přitom zvládnout i uživatel pouze se základní znalostí gramatiky CGA. Výchozí soubor pravidel je tak možno dále rozšiřovat a upravovat dle rázu budov v lokalitě, která má být modelována. I když je soubor pravidel primárně určen pro generování obsahu na základě map císařských povinných otisků stabilního katastru, je možné ho použít i pro modelování na podkladě jiných map. V tom případě jen zůstane nevyužita možnost rozdělení na jednotlivé typy budov.

V předcházejících odstavcích byl představen soubor pravidel, který generuje nejdůležitější součást 3D scén, tj. budovy. Pro dokreslení vzhledu scény je ale třeba modelovat také okolní vegetaci. Soubory pravidel pro takový účel jsou poměrně jednoduché a spočívají hlavně ve vložení modelů stromů nebo keřů do scény pomocí tvarové operace pro vložení 3D objektů. V našem případě jsou používány jednoduché modely stromů, tvořené dvěma na sebe kolmými 2D texturami s průhledností. Pro větší míru detailu je ale možné využít složitější modely, které jsou k dispozici ke stažení jako knihovny pro program CityEngine. Vložení modelu stromu je opět založeno na určité pravděpodobnosti výskytu jednotlivých dostupných druhů a jejich přibližné výšky. Po vložení do scény je model náhodně rotován a je mu přiřazena náhodná výška dle druhu. Jak parametr rotace, tak výška jsou definovány jako atributy a je tak možné je měnit i ručně po vygenerování scény.

Dostupné archivní pohlednice a fotografie mohou sloužit nejen jako podklad pro tvorbu souborů pravidel, ale je také možné je zobrazovat přímo v rámci 3D scény

jako vypínatelnou vrstvu, přičemž se jedná o poměrně originální způsob jejich prezentace. Pro takový účel je třeba vytvořit další soubory pravidel. Osvědčené je rozdělení na dva soubory, z nichž jeden bude generovat vlastní fotografie a druhý 3D kartografické znaky označující místa jejich pořízení. Oba soubory pravidel jsou koncipovány obdobně jako v případě umísťování stromů a jsou tak založeny na vložení 3D znaku místa pořízení nebo 2D obdélníkového rámečku, na nějž bude jako textura „nalepena“ archivní fotografie. Dále následuje jejich otočení dle parametru popisujícího směr záběru. Nakonec je na obdélníkový rámeček vložena příslušná fotografie na základě atributu popisujícího cestu k danému souboru. Pro vložení fotografií a znaků do 3D scény tak, aby byl výsledek uspokojivý, je potřeba vykonat následující kroky:

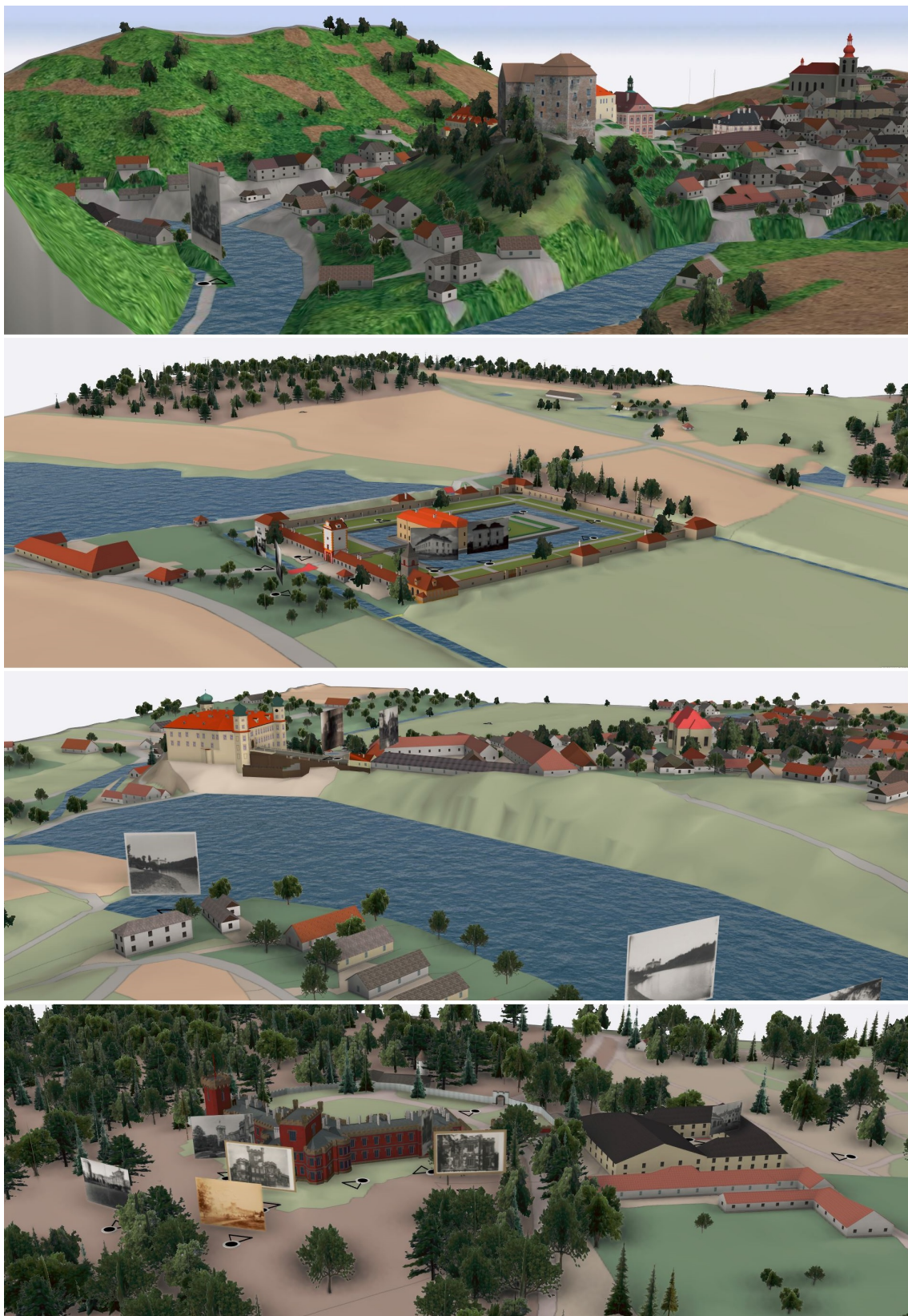
1. vložení bodové vrstvy fotografií (ESRI shapefile), přiřazení souboru pravidel pro vkládání obrázků jako textur,
2. zarovnání podle terénu – *Align Shapes to Terrain*, offset kolem 15 m,
3. generování modelu (vloží se rámeček, proběhne natočení, texturování pomocí fotografií),
4. konverze vložených rámečků s fotografiemi na CGA tvary – *Convert Models to Shapes* (zajistí pouze jednostrannou viditelnost textur),
5. import stejné bodové vrstvy fotografií, tentokrát pro účely vkládání kartografických znaků,
6. zarovnání podle terénu – *Align Shapes to Terrain*, offset kolem 1 m (zamezí konfliktům s DMT),
7. generování modelu (vložení 3D kart. znaků, natočení),
8. sloučení vrstvy rámečků s fotografiemi a vrstvy kartografických znaků,
9. případný ruční posun při kolizi jednotlivých fotografií,
10. sloučení odpovídajících si rámečku a kart. znaků.

Pokud se budeme řídit uvedenými kroky, získáme vrstvu 3D kartografických znaků označujících místa pořízení fotografií a rámečků s fotografiemi umístěnými texturováním. Odpovídající si znak a rámeček jsou jedním dotazovatelným objektem a pokud vložená vrstva ve formátu shapefile obsahovala atributová data, můžeme k nim přistupovat po kliknutí. Rámečky s fotografiemi jsou viditelné pouze ve směru pořízení záběru a při pohledu z druhé strany tak neruší 3D scénu.

V rešeršní části v kapitole 3.8 byly představeny i práce, které se zabývají tvorbou procedurálních modelů jednotlivých budov. To je určitě možné a z architektonického hlediska se může jednat o přínosný postup, neboť je při modelování detailně prozkoumána hierarchická struktura budovy a použita architektonická pravidla. Z hlediska efektivity je ale procedurální přístup výhodný až při modelování rozsáhlejší zástavby a při přesné rekonstrukci jednotlivých budov už se naopak může jednat o výrazně pracnější metodu. Pro modelování významných budov v rámci zvolené zájmové oblasti je tedy jednodušší využít klasického CAD přístupu a vytvořit model například v oblíbeném programu Trimble SketchUp. Do 3D scény v City Enginu je potom možné takové budovy vytvořené v CADu importovat jako statické modely ve formátech COLLADA DAE (nebo KMZ), Autodesk FBX a Wavefront OBJ. Po importu modelu je vhodné pečlivě zkontrolovat zobrazení jeho textur a jejich osvětlení vzhledem k tomu, že při vložení do scény se často vyskytnou problémy s převrácením normál jednotlivých ploch. Jediným řešením je v takovém případě návrat do CAD softwaru a vymazání, opětovné vytvoření a otexturování chybně zobrazených ploch a následně nový import do 3D scény. Na možnost pouze převrátit normály existující plochy např. v programu SketchUp (Reverse Normals) CityEngine scéna bohužel nijak nereaguje. Pozor je třeba dát také na správnou geografickou polohu modelu, neboť údaje o souřadnicovém umístění z CAD programů nejsou v CityEngine správně interpretovány a model se implicitně vloží posunutý. Na místě je tedy ruční doladění polohy přímo v rámci 3D scény. Vzhledem k zaměření této práce je vhodné nakonec podotknout, že 3D modely do 3D scény v programu CityEngine je možné vkládat také přes ESRI souborovou geodatabázi, čehož bude plně využito při vizualizaci BIM modelu v procedurálně generované scéně (viz dále).

5.4 Výsledky

Výsledné 3D scény lze exportovat do různých 3D formátů. Z běžných formátů se jedná opět o KML, DAE, OBJ a FBX. Zvláštní možností je export do ESRI geodatabáze nebo do vlastního formátu webové scény (formát 3WS). Pro běžné účely prezentace výsledků postačí poslední varianta. Výstup je možné zobrazovat pomocí CityEngine Web Vieweru, který může být umístěn na vlastním serveru nebo je k dispozici v rámci služby ArcGIS Online. Při zobrazování scény jsou využity technologie HTML5 a WebGL, pro prohlížení scén proto uživateli postačuje webový prohlížeč bez nutnosti instalovat další doplňky.



Obr. 5.6: Příklad 3D scén vzniklých v rámci projektu NAKI „Historický fotografický materiál“

Popisovaný pracovní postup byl zatím nasazen zejména v rámci v roce 2017 ukončeného projektu NAKI „Historický fotografický materiál“¹. Využití postupu v rámci tohoto projektu bylo popsáno v [85]. Projekt byl zaměřen na 60 zámků a hradů v majetku České republiky a ve správě Národního památkového ústavu. Cílem projektu bylo vytvořit webovou mapovou aplikaci na základě existujících starých map, plánů a historických fotografií, přičemž výsledná aplikace zachycuje vývoj panství od poloviny 19. století. Kromě 2D obsahu byly u několika vybraných objektů vytvořeny i 3D scény, které vhodně doplňují mapovou část. Vzhledem k tomu, že byl projekt zaměřen nejenom na vlastní zámky či hrady, ale i na jejich okolí a na celá panství, také trojrozměrné scény zachycují památkové objekty v kontextu okolní zástavby a krajiny. Vzhledem k pracnosti ruční 3D rekonstrukce zastavěných oblastí bylo pro tento účel procedurální modelování velice výhodné, neboť umožnilo v maximální možné míře využít datové zdroje zpracovávané v rámci tvorby dvourozměrné mapové aplikace. Protože se postup pro 3D modelování v praxi osvědčil, předpokládá se další využití pro projekty NAKI „Český historický atlas“² a „Vltava“³.

Příklady 3D scén vzniklých v rámci projektu NAKI „Historický fotografický materiál“ jsou na obrázku 5.6. Jedná se o scény zobrazující nejbližší okolí zámků či hradů, kde je zachycen historický stav buď na základě mapy císařských povinných otisků stabilního katastru (40. léta 19. století) nebo Státní mapy odvozené (50. léta 20. stol.). Rozhodujícím faktorem pro volbu zobrazovaného období byla dostupnost podkladů pro CAD modelování zámku či hradu ve stavu dané doby. Přímo ve 3D scéně jsou umístěny náhledy archivních pohlednic a fotografií. Zobrazení této vrstvy lze přitom vypínat, takže neruší výsledný dojem ze scény. Všechny fotografie jsou doplněny atributovými daty, která jsou dostupná po kliknutí na příslušnou fotografii nebo kartografický znak místa jejího pořízení (název, popis fotografovaných objektů, autor, datace, zdroj, inventární číslo a odkaz na fotografii v plném rozlišení). Všechny vytvořené 3D scény jsou v době psaní této práce k dispozici na stránkách projektu: <http://gis.fsv.cvut.cz/zamky/3d.php>.

¹Historický fotografický materiál – identifikace, dokumentace, interpretace, prezentace, aplikace, péče a ochrana v kontextu základních typů paměťových institucí, DF13P01OVV007

²Český historický atlas, DG16P02M043

³Vltava – proměny historické krajiny v důsledku povodní, stavby přehrad a změn ve využití území s vazbami na kulturní a společenské aktivity v okolí řeky, DG18P02OVV037

6 Tvorba informačního modelu historického objektu

Následující kapitola je stěžejní částí této práce, protože přináší poznatky z testování BIM a GIS softwaru a jejich kombinace pro tvorbu a správu informačního modelu historické budovy. Plně jsou přitom využity poznatky z rešerše v prvních dvou kapitolách a dále je následován postup teoreticky popsany v kapitole 4. Rozbor dále prezentované metodiky je možné nalézt také v [86]. Navržený pracovní postup byl průběžně ověřován na prototypovém modelu památkové budovy. Za vzorový objekt pro tyto účely byla zvolena sala terrena v areálu zámku v Mnichově Hradišti. Jedná se o barokní stavbu, zřejmě nejhodnotnější v celém areálu zámku, která je situována jako protějšková dominanta k hlavnímu objektu zámku na hloubkové ose areálu. Sala terrena byla vystavěna ve třetí etapě barokní přestavby zámku mezi lety 1710 – 1712, jejím architektem byl Mikuláš Reimondi [87]. Důvodů k volbě této budovy bylo několik. Zaprvé se jedná o barokní objekt s poměrně složitou strukturou a je tedy vhodný pro ověření možností softwaru. Kromě zdobných vnějších fasád bylo otázkou i modelování vnitřních prostor, kde byla předpokládána práce s poměrně složitými texturami, vzhledem k bohaté výzdobě hlavního sálu objektu. Na druhou stranu není vybraný objekt příliš rozsáhlý, takže je možné ho modelovat detailně v rámci rozumné časové náročnosti. Vhodné je také to, že sala terrena není prakticky nijak vybavena mobiliářem a není tak třeba brát ohledy na bezpečnostní otázky podrobného modelování vnitřních prostor, což je poměrně živé téma informačního modelování památek. V neposlední řadě byly pro modelování k dispozici podkladová data z výše popsaného projektu NAKI „Historický fotografický materiál“ a v rámci tohoto projektu byl vymodelován i celý areál zámku s okolím. Tím byl k dispozici geoprostorový kontext, v rámci kterého bylo možné následně vizualizovat souřadnicově umístěný informační model.

6.1 Použitý software

V souladu se závěry z rešerše bylo rozhodnuto využít při návrhu pracovního postupu BIM software pro část 3D modelování a naopak GIS pro správu modelu a vizualizační účely. To je nutné vzhledem k tomu, že v současné době neexistuje žádné komplexní řešení, které by bylo využitelné v celém procesu od jeho začátku do konce. Zatím byl celý postup řešen převážně v softwaru velkých výrobců, který má k dispozici největší množství vhodných nástrojů a funkcí. Nicméně v rámci dalšího

textu budou navrženy i levné nebo přímo open-source alternativy, které mohou v praxi celý proces výrazně zlevnit.

6.1.1 Komerční BIM – Autodesk Revit

Jako zástupce BIM softwaru byl v pracovním postupu zatím používán zejména program Revit firmy Autodesk, konkrétně verze Revit Architecture, určená zejména pro návrhovou část stavebního procesu. Důvodem pro jeho volbu bylo jednak to, že se jedná o v současnosti nejrozšířenější BIM platformu a dále jednoduchá dostupnost bezplatné tříleté studentské verze. V této práci není prostor pro kompletní popis funkcí programu, bude zde ale uveden alespoň přehled základní filozofie a funkčnosti, která se přímo týká modelování historických budov. Pro další informace je vhodné zejména dokumentace programu [88] nebo některý z mnoha dostupných tutoriálů [89].

Nejdůležitějším konceptem v programu Revit jsou *rodiny*. Obecně se jedná o skupiny prvků se společnou sadou vlastností (parametry) a s příbuznou grafickou reprezentací. Různé prvky náležející do rodiny mají stejnou sadu parametrů, jejichž hodnoty se ale mohou lišit pro jednotlivé *typy rodin*. Objekty, které jsou skutečně umísťovány do projektu jsou potom *instancemi* určité rodiny a určitého typu. Rodiny se rozdělují na tři základní skupiny:

- systémové rodiny,
- načítatelné rodiny (rodiny komponent),
- komponenty na místě.

Systémové rodiny jsou tvořené systémem (tj. programem Revit), když je třeba, to znamená tak, jak modelář postupně vytváří 3D model. Instance takových rodin reprezentují základní prvky budovy, které jsou ve skutečnosti sestavované přímo na staveništi (stěny, podlahy, střechy, potrubí). Systémové rodiny jsou definovány v projektu Revitu (soubor RVT), nenačítají se z externích souborů a neukládají se mimo projekt. V programu Revit není možné vytvářet nové systémové rodiny, existuje tak pouze možnost editovat stávající a vytvářet tak nové typy rodin.

Naproti tomu načítatelné rodiny (komponenty) se vytvářejí předem v rámci speciálního editoru v Revitu a je možno je uložit v externích souborech (RFA) a poté znovu importovat nebo načítat do dalších projektů. V praxi se potom jedná o komponenty budov, které jsou nakoupeny, dodány a nainstalovány do budovy (okna, dveře, truhlářské výrobky, zařizovací předměty, nábytek, rostliny, kotle, ohřívače vody, klimatizace...). Pro snadnější práci s komponentami existují katalogy typů,

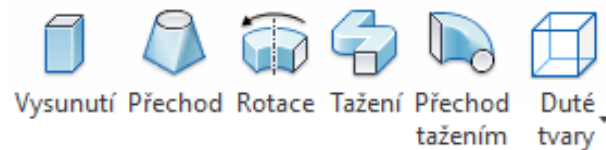
které umožňují načíst do projektu pouze ty typy, které jsou pro projekt nezbytné. Na rozdíl od systémových rodin je možné vytvářet zcela nové načítatelné rodiny.

Program Revit obsahuje speciální nástroje pro umístění většiny potřebných systémových rodin a dále i pro umísťování některých komponent. Příslušným nástrojem je tak možné vytvářet stěny, podlahy (např. na základě polygonů stěn), stropy, střechy (podle půdorysu budovy, vysunutím), sloupy a umísťovat okna či dveře. Pro vkládání komponent, které nemají přidělen vlastní nástroj potom existuje funkce *Komponenta*. První volba *Umístit komponentu* jednoduše vloží do modelu předem připravený model. Pro účely modelování historických budov je ale zásadní druhá možnost *Vytvořit na místě*. Pomocí tohoto nástroje je možné modelovat prvky, které se v modelu neopakují, jsou nepravidelné a nelze je sestavit jiným nástrojem. Jedná se přitom o poslední skupinu rodin, tedy komponenty na místě, což jsou rodiny s jedním typem, které jsou specifické pro aktuální projekt. Můžeme říci, že u modelů složitých historických budov bude většina prvků modelu vytvářena pomocí tohoto nástroje vzhledem k tomu, že základní funkce Revitu počítají zejména s modelováním pravidelných tvarů navrhovaných moderních budov. To je ostatně v souladu s rešerší provedenou v této práci.

Na příkladu programu Revit lze dobře demonstrovat parametrický přístup k modelování v BIM. Pokud použijeme základní nástroje pro tvorbu systémových rodin, vidíme, že každý vytvořený prvek má přiřazeny parametry, které popisují jeho geometrii a také konstrukční strukturu a další popisné informace. Například parametry stěn tak obsahují informace o délce, tloušťce, vazbách na výškové členění objektu a na další prvky modelu a dále informace o skladbě a materiálovém složení jednotlivých částí, vlastnosti jednotlivých materiálů ale také údaje o výrobci, URL na další informace, obrázek atd. Vzhledem k tomu, že jsou jednotlivé prvky uloženy implicitně, tedy parametricky s využitím uvedených údajů, je možné kdykoliv zpětně měnit jejich geometrii a vlastnosti ať už interaktivně přímo v náhledu na model (např. délka), tak tabulkovým způsobem (tloušťka, skladba – jako parametry typu rodiny).

Způsob reprezentace geometrie je přitom patrný zejména při vytváření nestandardních objektů pomocí komponent na místě. Při modelování s využitím tohoto nástroje máme k dispozici několik funkcí, které vytvoří základní elementy na základě tažení profilu po trajektorii, vysunutí (speciální případ tažení s trajektorií kolmou na rovinu profilu), rotace profilu podél osy nebo přechodu mezi dvěma profily (viz obr. 6.1). Dá se tedy říci, že se jedná o taženou geometrii (swept geometry), přičemž obdobným způsobem lze vytvářet i *duté tvary*, které reprezentují otvory a

lze pomocí nich plné tvary ořezávat. Výsledná komponenta na místě je tedy skládána pomocí booleovských operátorů jako Compound Solid Geometry a uložena implicitně. Kdykoliv tak máme možnost se k modelu vrátit, změnit parametry, profil či trajektorii a tím upravit vzhled modelovaného objektu. Další výhodou je, že tímto způsobem vznikají topologicky čisté objemové modely. Na druhou stranu se jedná o přístup, který vyžaduje větší rozvahu před zahájením samotného modelování, protože je třeba vhodně rozdělit modelovaný objekt na části, které je možné rekonstruovat a je nutno počítat s tím, že nebude možné nakonec modely dotvořit pomocí ploch modelovaných bod po bodu.



Obr. 6.1: Nástroje pro tvorbu tažené geometrie (Revit, komponenta na místě)

Pro účely rekonstrukcí a vícefázových projektů je možné v Revitu využít nástroje *fáze*. V našem případě se jedná o velmi slibnou funkci vzhledem k tomu, že umožňuje zachytit vývoj historického objektu v čase a mohlo by se tak jednat o vhodnou funkci pro rekonstrukci vývoje objektu na základě podkladů stavebněhistorického průzkumu. Pro každý model je možné vytvořit sérii pohledů, z nichž každý zachycuje budovu v určitém časovém okamžiku. Při rekonstrukci se většinou bude jednat o dvě fáze, tj. o existující a navrhovaný stav, v případě historické budovy bude fází výrazně více. Fáze vytvoření konkrétního prvku modelu se přiřadí podle toho, v jakém pohledu prvek vytvoříme. Naopak fázi demolice je případně nutno přiřadit ručně pomocí odpovídajícího nástroje. Pro každý pohled můžeme využít filtrování, tedy můžeme zobrazit buď to, co bychom viděli v konkrétní fázi nebo všechny prvky, přičemž jsou fáze rozděleny stylem čáry. Druhou zajímavou funkcí jsou potom *varianty návrhu*. Pomocí tohoto nástroje je možné definovat sadu variant, což je primárně určeno pro posuzování různých možností designu nové budovy, ale mohlo by být využito také pro správu různých hypotéz vzhledu historické budovy v minulosti nebo pro správu nerealizovaných variant (obdobný přístup jako v případě procedurálního modelování, jako např. v [74]).

Pro potřeby následného exportu do GIS jsou zásadní informace o použitém souřadnicovém systému v Revitu. Hlavní problém se souřadnicovými systémy v BIM již byl v textu popsán a spočívá v tom, že jsou BIM programy orientovány zejména na zachycení vzájemné polohy objektů modelu a již méně na absolutní umístění na povrchu Země. Práce tedy probíhá v lokálním souřadnicovém systému a v rovině na

rozdíl od GIS, kde je obvykle definováno zobrazení a globální souřadnicový systém. Na druhou stranu i v rámci architektonického návrhu je třeba zohlednit umístění objektu alespoň v rámci nejbližší okolní situace, čehož můžeme dále využít.

Základem v Revitu je vnitřní souřadnicový systém, tedy kartézský souřadnicový systém, ve kterém program pracuje na pozadí a o kterém uživatel nemá další informace. V rámci něho je potom definován *základní bod projektu*, implicitně totožný s počátkem vnitřního souřadnicového systému. Základní bod projektu určuje počátek dalšího kartézského systému – *souřadnicového systému projektu*. Projektové souřadnice slouží pro umísťování jednotlivých prvků modelu a popis jejich vzájemných vztahů a v rámci nich modelář v programu pracuje. Kromě projektových souřadnic dokáže Revit pracovat s tzv. *sdílenými souřadnicemi*, které jsou definovány například připojením výkresu okolní situace ve formátu DWG nebo přímo přidělením souřadnic některému z bodů modelu. Nejedná se tedy o analogii k práci v GIS, kde je přímo definováno, v jakém zobrazení a globálním souřadnicovém systému pracujeme, ale alespoň mají všechny body projektu určeny souřadnice, které lze dále využít v GIS. Pro přibližné geografické umístění modelu je nakonec možno využít nástroj *Geografická poloha*. Určená poloha může sloužit například pro analýzy oslunění, energetické analýzy nebo pro analýzy závislé na počasí. Nástroj určuje skutečnou polohu modelu na Zemi pomocí geografických souřadnic, jeho přesnost lze ale snadno pochopit z metody umísťování modelu ručně značkou na mapě. Mimo to není tato geografická poloha nijak navázána na souřadnicové systémy programu.

Výsledný model je z Revitu možné exportovat do různých formátů, pro nás je nejdůležitější podpora standardu IFC různých verzí, která bude dále popsána v kapitole 6.3.1.

6.1.2 Levnější alternativy – Edificius a SketchUp

Pokud se podíváme na tabulku 6.1, je jasné, že z pohledu nákladů na pořízení licence může být výhodné uvažovat o levnějších alternativách softwaru. Vzhledem k tomu, že software velkých konkurentů Autodesku je podobně nákladný jako program Revit, existují dnes dvě hlavní dostupnější alternativy zaměřené na návrh staveb, které lze použít také pro tvorbu modelů historických stavebních objektů. Jedná se o BIM Edificius a jednoduchý 3D CAD Trimble SketchUp. První jmenovaný program nabízí základní funkcionalitu velmi podobnou programu Revit. Pro vytvoření vertikální a horizontální obálky modelu lze využít funkce pro převod z 2D DXF výkresů a nástroje pro umísťování parametrických modelů jednotlivých architektonických elementů (stěny, podlahy, stropy, střechy...). Dále lze do modelu vkládat okna, dveře, k dispozici jsou i nástroje pro vytváření konstrukčních elementů (sloupy,

Software	Typ licence	Cena
Autodesk Revit Architecture	roční předplatné	78 000,- Kč
ACCA Edificius	roční předplatné	17 800,- Kč
Trimble SketchUp	trvalá, 1 rok podpora	24 000,- Kč

Tab. 6.1: Přibl. cena nástrojů v době psaní této práce dle webů výrobce či dodavatele

nosníky. . .). Všechny uvedené typy prvků lze vybírat z katalogů. Existuje přitom obecný katalog všech prvků, projektový katalog a uživatelské katalogy. Důležité je, že standardně není možné vytvářet zcela nové typy architektonických elementů, ale je možné pouze upravovat typy stávající. Zde se tedy nabízí paralela se systémovými rodinami v programu Autodesk Revit. Stejně jako v Revitu je i v softwaru Edificius možné exportovat výsledek do formátu IFC (podporována je pouze verze IFC 2x3 Coordination View 2.0).

S ohledem na to, že jsou katalogy architektonických elementů zaměřeny zejména na návrh nových budov, je jasné, že bude pro tvorbu modelu historické budovy třeba využít nástrojů pro 3D rekonstrukci prvků specifických tvarů a rozměrů podobně jako při použití komponent na místě v programu Revit. Edificius pro tyto účely nabízí integraci s CAD softwarem SketchUp. V rámci modelu tak lze vybrat referenční prvky pro umístění specifického objektu, otevřít propojený SketchUp, navrhout nový objekt a ten zpětně uložit do katalogu.

Protože by tedy pro naše účely bylo nutné s programem Edificius vlastnit i licenci softwaru SketchUp pro účely modelování specifických objektů, nabízí se otázka, zda raději nevyužít pouze druhý jmenovaný. Program SketchUp je jednoduchý CAD zaměřený zpočátku zejména na rané fáze architektonického návrhu. Nejedná se tedy přímo o BIM software (nepočítáme-li různé zásuvné moduly třetích stran), v současné době ale již disponuje funkcemi, které využití v BIM procesu umožňují. Jedná se v první řadě o možnost exportu formátu IFC (IFC 2x3) a dále o nástroj pro klasifikaci objektů dle tříd IFC. Na druhou stranu je nevýhodou způsob uložení geometrie pomocí reprezentace hranic (B-Rep). Pro tvorbu modelu tak lze využít podobné nástroje, jako v případě BIM softwaru (tažení, rotace. . .), po ukončení funkce se ale model uloží explicitně jako jednotlivé body, které tvoří hrany a plochy ohraničující tělesa. Na jednu stranu tak lze jednoduše bod po bodu upravovat model a vytvářet i objekty nerekonstruovatelné pomocí běžných nástrojů, na stranu druhou jednou vytvořená komplexní geometrie je jen těžko upravitelná.

Oba levnější softwary (zejm. SketchUp) mají dále omezenější možnosti přidávání popisných informací. To nás však nemusí trápit v případě, že budeme model exportovat a dále spravovat v GIS. Lze tedy říci, že levnější alternativy mohou v případě

potřeby zastoupit ve fázi modelování dražší BIM software, pokud budeme věnovat dostatečnou pozornost modelování. To je totiž při využití parametrických komponent na místě jednodušší v programu Revit, zejména v případě pozdější úpravy specifických objektů nepravidelných tvarů. Jako levná alternativa by mohl být preferován spíše jednoduchý CAD program SketchUp, protože se bez něho stejně neobejdeme ani při použití BIM softwaru Edificius. Hlavní překážkou při použití jednodušších nástrojů potom budou možnosti souřadnicového umístění. Zatímco Autodesk Revit umožňuje alespoň práci ve sdílených souřadnicích, které mohou odpovídat rovinným souřadnicím globálních souř. systémů, ve SketchUpu je možné pracovat pouze s lokálním souřadnicovým systémem.

6.1.3 GIS software

Protipólem programu Revit v oblasti GIS je softwarové řešení od firmy ESRI. Také nástroje této společnosti jsou poměrně nákladné na pořízení a zabírají značnou část trhu s GIS produkty. Vzhledem k tomu, že jsou programy od firmy ESRI mezi geoinformatiky velmi rozšířené a tedy známé, budeme se zde zabývat pouze produkty přímo vhodnými v procesu informačního modelování. Prvním softwarem použitelným pro prohlížení a analýzy 3D podkladů v nabídce ESRI byla aplikace ArcScene. Ta pracuje s podobným rozhraním jako 2D GIS ArcMap, ale umožňuje vizualizovat datasey ve 3D. Právě vizualizace je ale zřejmě hlavním účelem ArcScene a to zejména vizualizace 2,5D dat, případně jednoduchých 3D modelů. Vytvořené BIM modely lze prakticky pouze prohlížet, manipulace a úpravy složitých 3D modelů již nejsou úplně pohodlné. Na druhou stranu lze v prostředí ArcScene využít nástroj Interoperability Extension od firmy FME, který byl dlouho pro 3D dostupný právě pouze v ArcScene. S využitím Interoperability Extension je možné importovat do ESRI geodatabáze BIM modely ve formátu IFC (viz 6.3.1).

Pro tvorbu 3D modelů byl dlouho určen zejména program CityEngine popsáný v kapitole 3.7. Ten však exceluje výhradně v procedurálním modelování na základě 2D GIS vrstev. V programu jsou sice obsaženy nástroje pro tvorbu 3D modelů, podobné svojí logikou programu SketchUp, pro seriózní 3D modelování ale program určen není. V našem případě ale může dobře posloužit alespoň pro texturování BIM modelu převedeného do geodatabáze a pro drobné úpravy chyb vzniklých při převodu. Po dokončení modelu je dále možné využít možnost exportu např. do formátu webové scény 3WS, obdobně jako v případě scén procedurálního modelování. Jako hlavní nástroj pro práci s 3D daty je v současnosti prezentován ArcGIS Pro, který pro práci s 3D používá některých funkcí zjevně integrovaných z CityEnginu. V našem případě bude tento software využit zejména pro souřadnicové umístění modelu

vzhledem k tomu, že ArcGIS Pro oproti ArcScene umožňuje relativně bezproblémovou manipulaci i s detailními 3D modely.

Všechny uvedené programy spadají do kategorie GIS softwaru a tomu odpovídá i způsob reprezentace geometrie. Základním formátem pro ukládání 3D dat v ESRI geodatabázi je typ multipatch, v rámci kterého je geometrie uložena pomocí reprezentace hranic [90]. To může být na jednu stranu vnímáno jako výhoda, protože by explicitně uložená geometrie definovaná svými hraničními plochami měla být ve všech softwarech interpretována stejně. Na druhou stranu je třeba počítat s tím, že při převodu modelu z BIM do GIS prostředí dojde ke ztrátě parametrickosti a u nerovinných ploch i k menšímu či většímu zjednodušení, kdy budou takové plochy nahrazeny souborem rovin.

V následujícím pracovním postupu je zatím pro GIS část řešení používán software firmy ESRI. Na rozdíl od BIM části, kde by bylo možné nahradit nákladný software Autodesk Revit poměrně snadno bez zásadního vlivu na výsledek, u práce s GIS by bylo nahrazení levnější alternativou výrazně složitější. Dostupný GIS software, jako je například open-source QGIS, je dnes bez problému k dispozici, je ale využitelný pouze pro práci s 2D (příp. 2,5D) daty. Ve vědeckých pracích je popisována zejména možnost využití prostorové databáze PostGIS, ideálně s aplikací databázového schématu 3D City Database, vyvíjeného v rámci standardu CityGML (1.3.2). Pro webové prohlížení modelu je možné nasadit digitální glóby, jako je klasický Google Earth nebo open-source alternativa Cesium. Nevýhodou takového postupu je absence dedikovaného softwaru, který by mohli využívat i neinformatici z řad architektů, a nejistá perspektiva některých open-source projektů. S pozvolna rostoucím využíváním modelů standardu CityGML (zejm. v Německu) by se mohla situace postupně zlepšovat.

6.2 Modelování v BIM

Modelovací část pracovního postupu je zaměřena na rekonstrukci modelu z 2D výkresových dat. Jedná se tedy o druhý případ dle kapitoly 4.3, kdy je vytvářen výsledný model ručně, postupně z jednotlivých dílčích komponent. Některé metody zpracování ale budou využitelné i při tvorbě modelu na základě výsledků fotogrammetrického sběru dat nebo výstupů z laserového skenování. Těmi je totiž nestrukturované mračno bodů, tedy obrovské množství dat, jejichž zpracování do podoby objemového sémantického 3D modelu je i přes v textu popsání snahy o automatizaci procesu většinou prováděno do značné míry ručně. Výsledný model je tak

často modelován běžnými prostředky na základě údajů o tvaru a rozměrech, získaných z mračna bodů (např. z řezů). Ve specifickém případě modelování již zaniklých historických památek je pak modelování na základě 2D výkresů prakticky jedinou možností rekonstrukce.

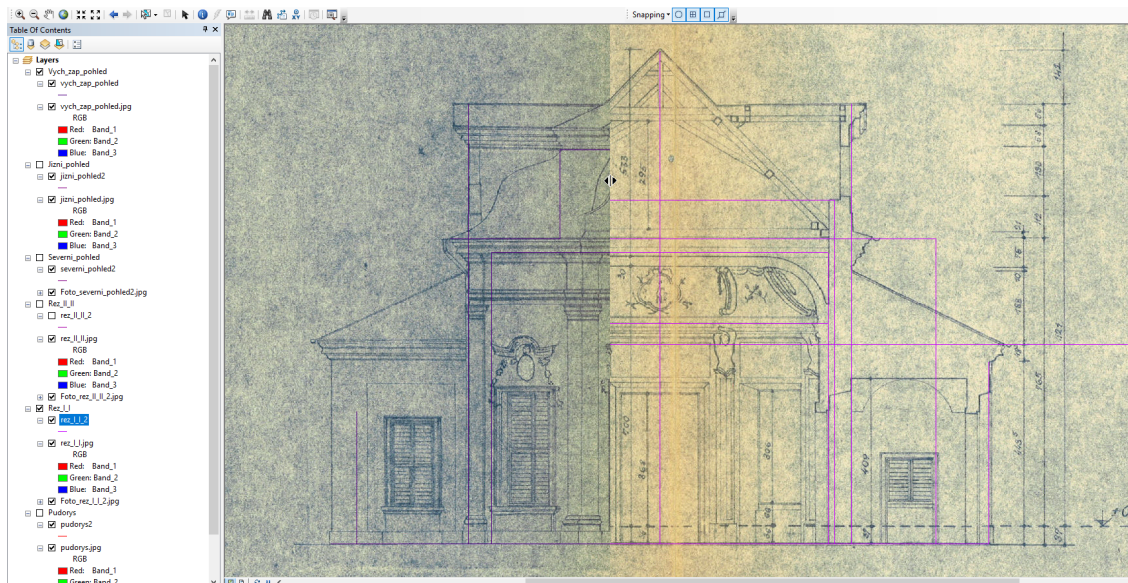
6.2.1 Příprava zdrojových dat

Výkresové podklady je vhodné zpracovat dle běžných postupů digitální kartografie. Podklady v papírové formě je třeba naskenovat a případně upravit barevnost pro zvýšení čitelnosti. Protože výkresy budou použity zejména jako podklad pro tvorbu modelu a jejich další publikace není primárním cílem, má přednost dobrá čitelnost kresby před celkovým vzhledem výkresů. Protože většinou není možné získat všechny rozměry důležité pro rekonstrukci objektu pouze z kót, bude třeba některé míry přímo na výkresech odměřovat. Proto je nutné podklady georeferencovat. Jako souřadnicový systém je možno zvolit místní systém, jelikož nás v tuto chvíli zajímají zejména vzájemné vztahy na výkresech a ne absolutní poloha objektu na zemském povrchu (model bude stejně vytvářen v lokálním souř. systému BIM softwaru).

Jako podklad pro georeferencování je vhodné zkonstruovat vektorový základní tvar objektu dle dostupných kót (viz obr 6.2). K souřadnicovému umístění bude vhodná zejména lineární konformní transformace, protože po jejím provedení zůstane zachován tvar objektu. S opatrností lze ale použít také afinní nebo projektivní transformaci, uvážíme-li, že nás při rekonstrukci budou zajímat zejména délkové rozměry a smysl odměřování úhlů na výkresech je diskutabilní. Pozor je třeba dát hlavně na vhodné rozmístění identických bodů, protože na výkresech nelze vždy zaručit rovnoměrné pokrytí kresbou jako na mapových podkladech. V prostředí geoinformatiky je běžné georeferencování půdorysných podkladů, stejný postup lze ale s výhodou použít také pro souřadnicové umístění pohledů a řezů (při práci ve 2D GIS softwaru pochopitelně ve stejné rovině mapy). Výsledek pak bude umožňovat kromě odměřování také překrývání jednotlivých výkresů pohledů a řezů, což může zajistit lepší pochopení prostorových vztahů v budově.

6.2.2 Parametrické modelování

Po přípravě dostupných podkladů je možné zahájit 3D modelování. Jak bylo popsáno v kapitole 6.1.1, nabízí program Autodesk Revit v podstatě dvě možnosti, jak vytvářet modely prvků budovy. První variantou je použití nástrojů určených přímo pro modelování konkrétních architektonických elementů. V takovém případě



Obr. 6.2: Výkresy v místním systému a jejich překrývání (ArcMap)

začneme definicí potřebných typů systémových rodin a poté vytvoříme základ modelu umístěním jejich instancí. Takto lze modelovat základní vertikální a horizontální obálku budovy (stěny, podlahy, stropy, střechy). Po jejím vytvoření umístíme do modelu opět pomocí odpovídajících nástrojů instance načítatelných rodin a tím model dokončíme (umístění oken, dveří, příp. dalšího zařízení). Tento postup je výchozím v programu Revit a přináší dvě základní výhody. Zaprvé můžeme při modelování jednotlivých instancí využít přímo odpovídajících nástrojů, se kterými je snazší práce. Druhou výhodou je potom vytváření vztahů mezi prvky. Například okna a dveře jsou tak umísťována v rámci stěn (hostované komponenty), což vytváří základní hierarchie v modelu.

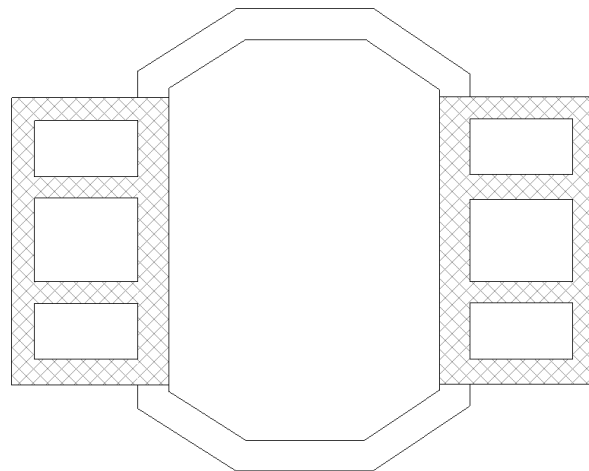
V případě složitých historických budov nástroje pro tvorbu základních systémových a načítatelných rodin velmi často nedostačují. V takovém případě je na místě jednotlivé objekty vytvářet jako komponenty na místě. Výhodou je výrazně širší nabídka nástrojů pro modelování a možnost individuálního přizpůsobení vzhledu výsledných modelů. Na druhou stranu je tvorba takových komponent pomalejší a jednotlivé objekty nelze umístit jako hostované komponenty a vytvářet tak hierarchie. Pokud však počítáme s pozdějším převodem do GIS, nemusí nás druhá skutečnost příliš trápit a vystačíme s tím, že je každé komponentě na místě alespoň možné přiřadit kategorii, která definuje, jaký druh objektu je pomocí ní modelován (stěna, podlaha, střecha, okno, dveře...) stejně jako je tomu při modelování systémových a načítatelných rodin pomocí příslušných nástrojů. To umožňuje vytvářet vzájemné vztahy až po exportu do GIS.

Dále bude následovat popis tvorby jednotlivých druhů architektonických elementů, demonstrováný na prototypovém modelu barokní sala terreny. Tento popis může sloužit jako výchozí pro modely jiných staveb, protože je možné předpokládat značnou podobnost jednotlivých elementů. Preferován bude přitom většinou postup s využitím specifických modelů vytvářených pomocí komponent na místě, který je lépe uplatnitelný v případě modelů složitých historických budov.

Tvorba stěn

Pro tvorbu základních stěn je v Revitu k dispozici nástroj *Stěna* v menu *Architektura*. Ten nabízí možnost tvorby architektonických (tj. nenosných) a konstrukčních (nosných) stěn. Délku stěny a její výšku lze měnit interaktivně při vkládání, přičemž u výšky je vhodné využít *vazby* a místo zadání absolutní hodnoty ji vztáhnout k přednastaveným výškám podlaží. Tloušťka stěny je naproti tomu parametrem typu rodiny a proto je vždy nutné pro další tloušťku stěny vytvořit nový typ. V praxi to u historických budov může znamenat vytvářet nový typ pro každou jednotlivou stěnu v modelu. Kromě toho je možné nástroj *Stěna* využít pouze pro tvorbu jednoduchých stěn s konstantní tloušťkou, přičemž v některých případech není možné kontrolovat přesný průběh vytvářených stěn a přesné rozměry. To se projeví zejména u stěn zalomených v obecných úhlech. Při tvorbě modelů nově navrhovaných budov to nemusí být problém, pokud ale chceme rekonstruovat přesný tvar a rozměry existující budovy, může být práce poměrně náročná. Ve složitějších případech je proto vhodnější využít komponenty na místě a s jejich pomocí zkonstruovat specifické stěny pomocí funkce *Vysunutí* na základě profilu, který je půdorysným obrazem stěn.

V případě vzorového modelu byly jako běžné stěny modelovány hlavní nosné stěny středního objemu sala terreny a dále stěny bočních křídélek (tedy přímé stěny bez zalomení o konstantní tloušťce). Stěny zalomených trojbokých rizalitů s měnící se tloušťkou byl modelovány jako komponenty na místě (obr. 6.3). Tvorba stěn je pro 3D model zásadní, protože určuje jeho celkový tvar a rozměry. Při tvorbě vzorového modelu nebylo možné vždy přesně dodržet rozměry dle výkresu zejména vzhledem k tomu, že na výkresech půdorysu nesouhlasí vnitřní a vnější rozměry objektu (se započtením tloušťky stěn). To je poměrně běžný jev ve výkresové dokumentaci a souvisí zřejmě hlavně s nutností odděleného měření interiéru a exteriéru. Na některých místech proto bylo nutno idealizovat vzájemné vztahy mezi prvky modelu (např. průměrováním kót). Přitom byly spíše zachovávány vnější rozměry s ohledem na to, že v našem pracovním postupu předpokládáme prezentaci modelu v geoprostorovém kontextu rámci GIS prostředí, kde jsou vnější rozměry důležitější.



Obr. 6.3: Půdorys prvního podlaží vzorového objektu, šrafovaním je rozlišen použitý modelovací nástroj

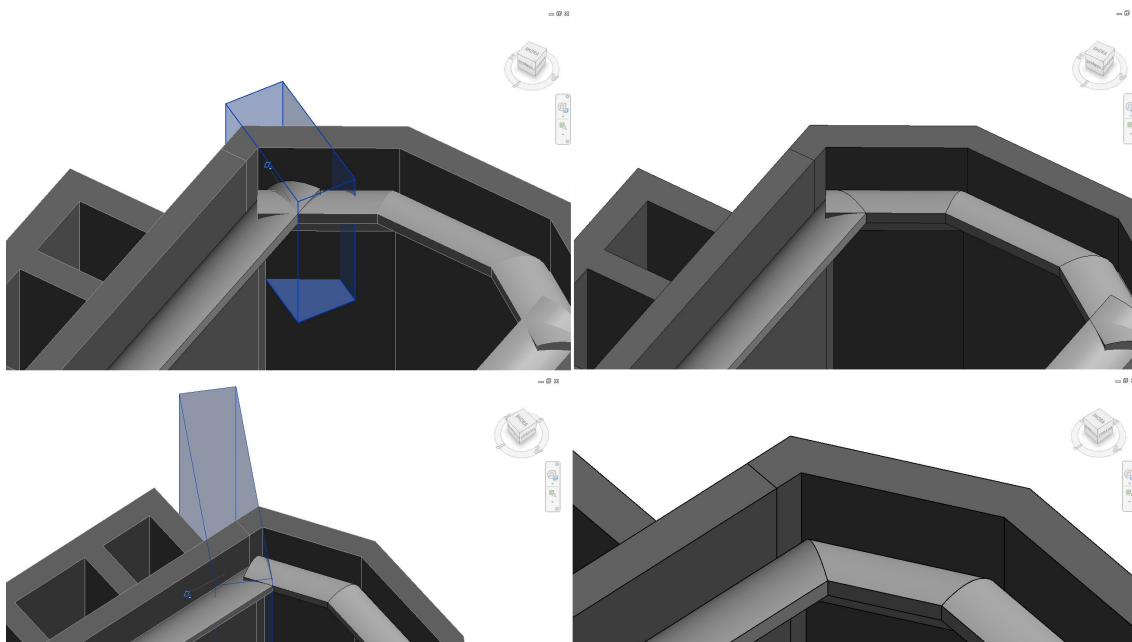
Po delší úvaze bylo také rozhodnuto uvažovat rovnoběžnost základních os objektu se souřadnicovými osami a kolmost stěn. Vzhledem k charakteru vstupních dat nemáme v tomto případě dostatek informací pro přesnější postup a modelování se tím výrazně zjednoduší. Každopádně je otázkou, zda bychom si mohli něco takového dovolit při rekonstrukci skutečného stavu objektu na základě fotogrammetrických výstupu či laserového skenování. Použitá míra zjednodušení potom závisí zejména na dalším účelu modelu.

Stropy

Klasická tvorba stropu probíhá v Revitu s využitím speciálního nástroje *Strop*. Tento nástroj najde využití při tvorbě plochého stropu a je možné ho použít buď jako automatické funkce, která vytvoří strop ve zvolené výšce nad vybranými polygony (tedy místnostmi) v půdorysu, nebo lze nakreslit strop ručně. I při druhé volbě je přitom možné vytvářet hrany výsledného polygonu stropu na základě existujících čar místností v půdorysu. Protože historické budovy mají často klenuté stropy, se základními nástroji si zpravidla nevystačíme a využijeme opět komponenty na místě.

V případě vzorového objektu bylo nutno modelovat celkem sedm modelů stropů různých typů, takže bylo možno existující nástroje dobře prověřit. Jako první byl vytvářen model stropu v hlavním sálu. Ten je plochoštopový s vysoce klenutým fabionem a tak bylo vhodné využít kombinovaný přístup k tvorbě. Fabion byl vytvářen jako komponenta na místě s kategorií rodiny *Stropy* a s využitím nástroje *Tažení*. Celý fabion přitom nebylo možné konstruovat naráz a to zřejmě proto, že by se profil (a tedy i výsledný model) nacházel uvnitř trajektorie. Proto byly vytvořeny

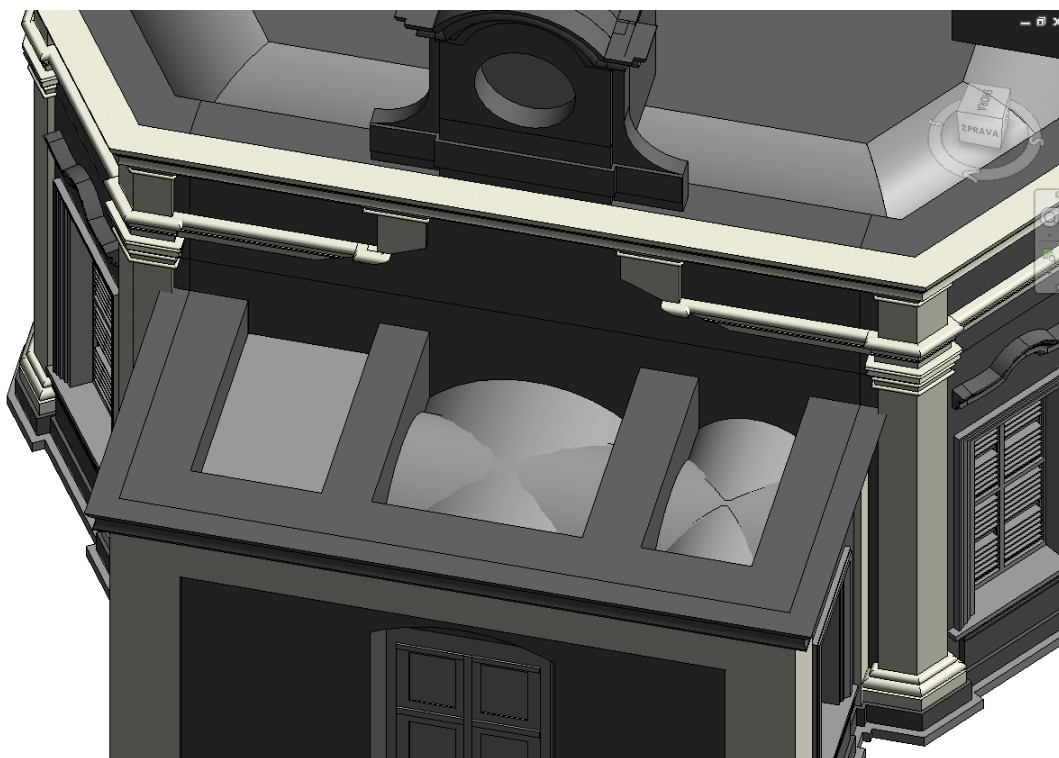
postupně čtyři části dle obvodových stěn hlavního sálu a ty byly vždy ořezány pomocí dutých tvar. Duté tvary pro ořezání byly konstruovány jako kvádry pomocí tažení z roviny ve které leží průsečnice částí fabionu (obr. 6.4).



Obr. 6.4: Konstrukce fabionu – postupný ořez dutými tvary

Plochá osmiúhelníková část stropu byla potom modelována pomocí příslušného nástroje *Strop* s využitím z výkresu získané výšky a tloušťky stropu. Je nutno poznamenat, že vzhledem k nedostatku podkladů nebylo v tomto případě řešeno konkrétní konstrukční řešení stropu. Na výkresu řezu je patrná načrtnutá trémová konstrukce a modelovaný prvek je tedy v tomto případě zřejmě pouze zavěšeným podhledem. To pro účely testování nevadí, na druhou stranu ale lze v případě potřeby v Revitu modelovat také trémové konstrukce s využitím menu *Skladba*.

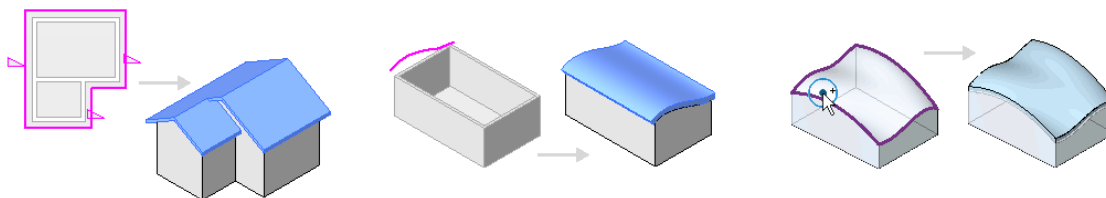
V bočních křídélkách sala terreny je celkem šest prostorů, z nichž vždy jeden na každé straně je plochostropý. Ploché stropy byly opět vytvářeny základním nástrojem jako instance systémových rodin. Zbylé čtyři prostory jsou klenuty barokní valenou klenbou. Klenby byly rekonstruovány jako dvě na sebe kolmá tažení, přičemž bylo nutné prostory pod klenbou ještě vybrat opět dvěma na sebe kolmými dutými tvary. Vzhledem k tomu, že Revit ukládá geometrii jako Compound Solid Geometry, není nutno se dále zabývat materiálem na průniku obou vzniklých těles, protože bude výsledná rodina na místě vytvořena jako sjednocení obou na sebe kolmých tvarů.



Obr. 6.5: Stropy prostorů v bočních křídélkách vzorového modelu

Střechy

Pro tvorbu střech existují v Revitu v rámci nástroje *Střecha* celkem tři funkce (obr. 6.6). První z nich se nazývá *Střecha v půdorysu* a umožňuje vytvořit střechu na základě půdorysného tvaru budovy. To je výhodné například pro tvorbu jednoduchých sedlových střeš. Druhá funkce, *Střecha vysunutím*, potom modeluje střechu vysunutím profilu a poslední funkce *Střecha na ploše* vytvoří střechu na libovolných nesvislých plochách předem vytvořených objemových modelů.

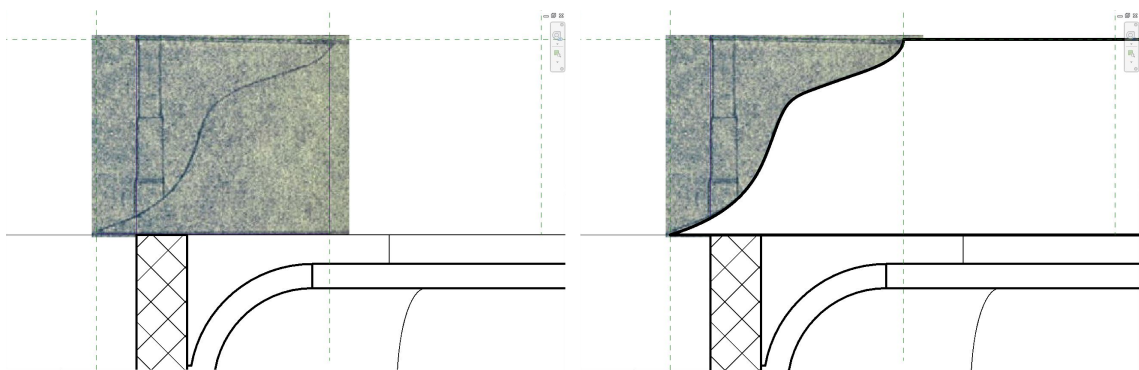


Obr. 6.6: Tři základní funkce pro tvorbu střeš v programu Revit [88]

Střední objem našeho vzorového objektu má mansardovou střechu se zvonovnicovým profilem spodní části. Proto byly pro její rekonstrukci opět před základními funkcemi upřednostněny možnosti komponent na místě. Stejně jako v případě stropu

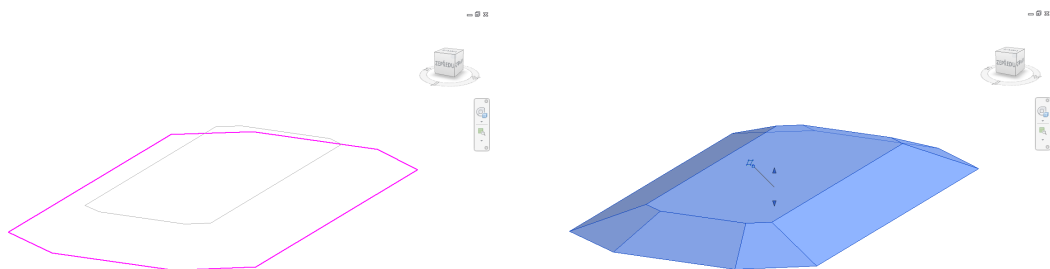
nebylo zatím modelováno vnitřní konstrukční řešení střešní části. Střechu tedy prozatím reprezentuje objemový model tvaru krytiny. Krov by ale samozřejmě bylo možné v případě potřeby domodelovat, zejména pokud by byly k dispozici další podklady a po konzultaci s odborníky.

Vzhledem k složitosti střechy byl její model rozdělen na dvě části. Spodní část pod římsou byla vytvářena kombinací tažení a vysunutí. Potřebný profil byl získán vektorizací na základě obrazového podkladu, který byl umístěn do výkresu v rovině profilu. Tento obrázek je částí georeferencovaného výkresu pohledu a ve výkresu Revitu byl zarovnán pomocí referenčních rovin. Protože je výsledný profil vně vybrané trajektorie, umožňuje program těleso správně vytvořit.



Obr. 6.7: Vložený obrazový podklad a výsledný zvonovnicový profil střechy

Horní část střechy není možné vytvořit jako jednoduché tažení, protože by se profil nacházel uvnitř trajektorie. Proto byla použita funkce *Přechod* a to dvakrát. Poprvé byl vytvářen přechod mezi dvěma osmiúhelníky (větším a menším), podruhé z menšího osmiúhelníku do obdélníku.

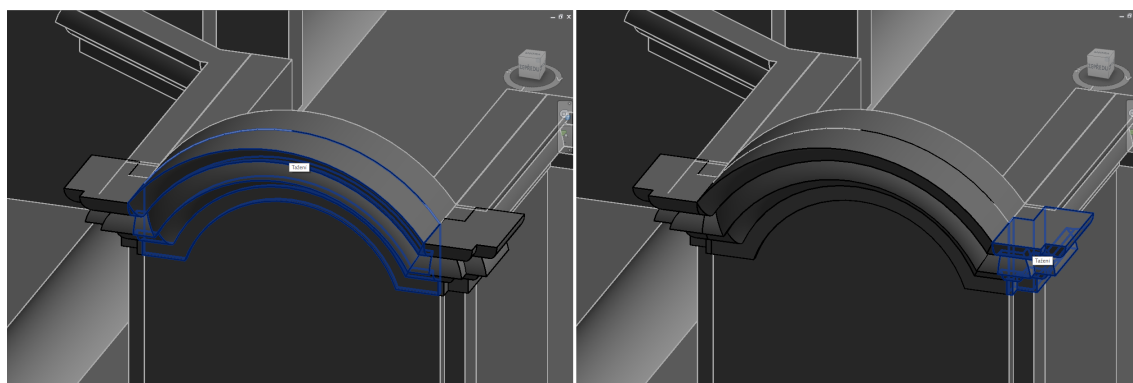


Obr. 6.8: Dva osmiúhelníkové profily a výsledné těleso vzniklé přechodem

Střechy bočních křidélek byly modelovány pomocí tažení a následného oříznutí vzniklého tvaru pomocí dutých tvarů.

Vikýře

Na vzorovém objektu se nachází celkem čtyři zděné vikýře se segmentově skrojenými křídly a segmentově vypjatou římsičkou (dva v ose středního rizalitu a dva na příčné ose středního objemu nad stříškami bočních křidélek). Základní tělesa vikýřů byla vytvářena jako komponenty na místě s kategorií rodiny *Stěny* a to pomocí vysunutí půdorysů v příslušné výšce. Vzniklé stěny se opět zcela neshodují se skutečným konstrukčním řešením vzhledem k nedostatku podkladů. V místě, kde se nachází vikýře bylo nutné odstranit části dříve vytvořeného modelu střechy pomocí dutých tvarů – vybrání. Střechy vikýřů byly modelovány opět jako komponenty na místě tažením dle profilu střechy vytvořeného na základě obrazového podkladu. Rekonstrukce ozdobné římsičky byla prováděna s využitím tažení a to nadvakrát, neboť program nebyl schopen vytvořit těleso najednou (křivka trajektorie musí ležet v jedné rovině). Boční i střední část se přitom z konstrukčních důvodů překrývají zhruba o 1 mm a jedná se proto v rámci modelu o jedinou část, která záměrně není vytvořena jako topologicky čistá. Topologickou čistotu modelu a přesné rozměry v Revitu je obecně těžké dodržet u některých specifických složitějších tvarů a to zejména kvůli způsobu ukládání geometrie, kdy je třeba všechny části modelu zkonstruovat z geometrických primitiv a není možné přidávat body, hrany a plochy ručně. Kromě toho se občas vyskytly také problémy s přichytáváním (snapping) na kresbu u objektů, které není možné jednoduše modelovat ve 2D výkresech a je nutno využít 3D pohled.

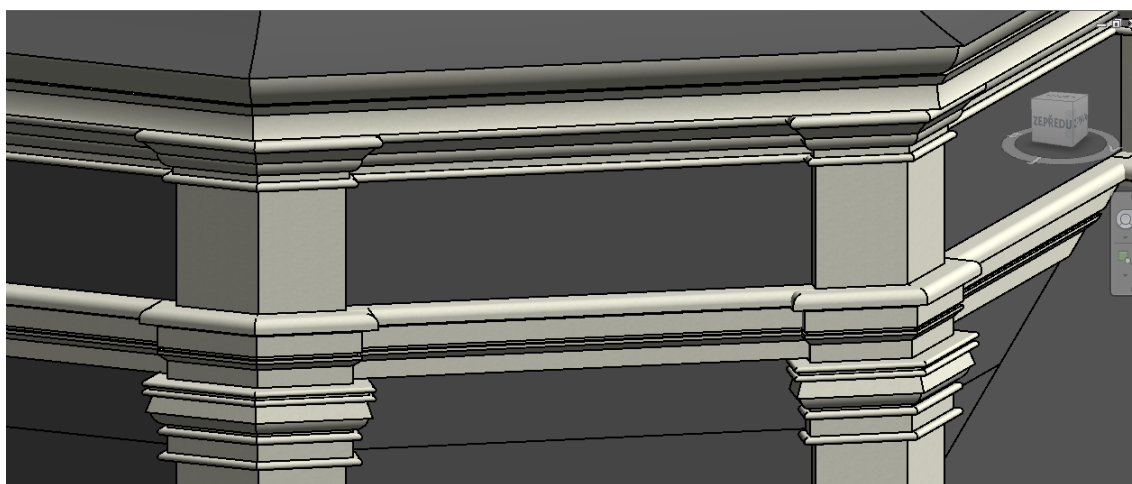


Obr. 6.9: Ozdobná římsička vikýře – vzájemně se překrývající střední a boční část

Ozdobné prvky

Ozdobné prvky na fasádě, tedy především štuková výzdoba, byly vytvářeny jako komponenty na místě s kategorií *Stěny*, která je z dostupných kategorií významem nejbližší modelovaným prvkům s tím, že bude třída ozdobných prvků vytvořena až

po převedení do GIS prostředí. Jednalo se přitom zejména o dvanáct toskánských pilastrů, z toho osm úplných a čtyři částečné nad střechami bočních křidélek, dále o průběžné kladí a korunní římsy a o lizénové rámy bočních křidélek. Základní tvary úplných pilastrů „armujících rohy rizalitu na obou průčelích“ byly modelovány jako vysunutí dle rozměrů získaných z výkresu půdorysu, částečné pilastry na bočních stěnách středního objemu byly vytvářeny tažením a nevhodné části byly odstraněny dutým tvarem vybrání. Pro tvorbu patek a hlavic pilastrů posloužilo tažení na základě profilu rekonstruovaného dle pohledových výkresů, přičemž byly tyto vytvářeny pro každý pilastr zvlášť. Stěny rizalitů nejsou zcela souměrné, kvůli čemuž je každý pilastr originálním tělesem a samostatnou rodinou a typem. Průběžné kladí, římsičky nad okny a korunní římsy středního objemu a bočních křidélek jsou opět řešeny jako tažení dle profilu získaného z pohledů na objekt, lizénové rámy bočních křidélek byly modelovány jako jednoduchá tažení podél celého půdorysu křidélek a přebytečné části byly odstraněny dutým tvarem vybrání.

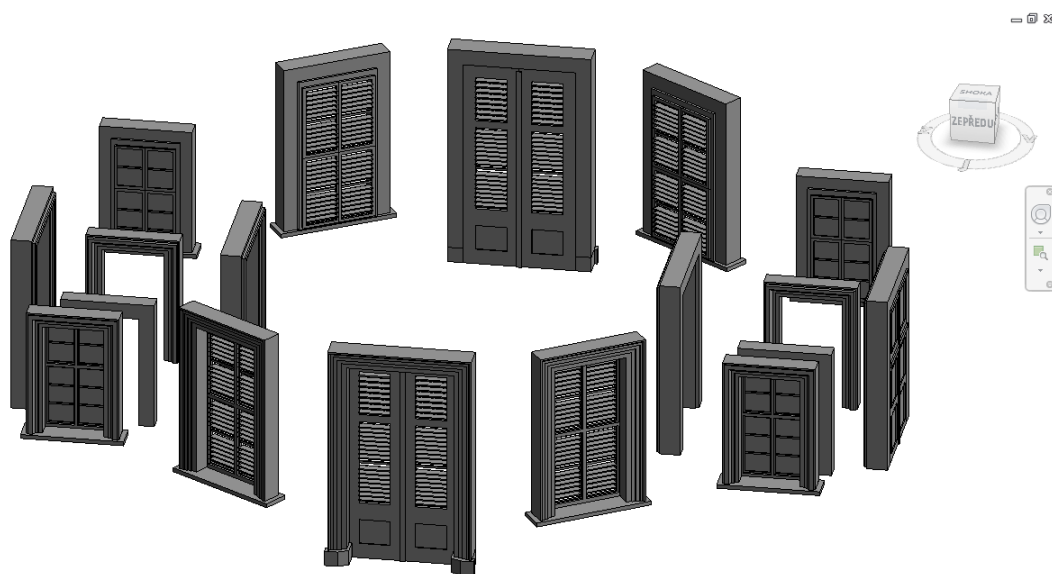


Obr. 6.10: Toskánské pilastry, průběžné kladí a korunní římsa středního objemu

Okna, dveře, otvory

Pro modelování oken a dveří se v Revitu nabízí možnost tvorby nových rodin načítatelných komponent pomocí editoru rodin. Pokud zvolíme tuto cestu, můžeme připravit parametrické modely rodin, které budou umožňovat tvorbu nových typů na základě definovaných měnitelných rozměrů, jejichž změnou vznikne nový typ (výška, šířka...). Tato možnost je vhodná v případě budov, které obsahují větší množství podobných oken či dveří, jež se drobně liší pouze v několika parametrech. Pokud má modelovaný objekt pouze několik typů stejných dveří či oken, bude tvorba rodiny uvedeným způsobem spíše nevýhodná z hlediska časové náročnosti, každopádně je

vhodné ji předem zvážit. Náš vzorový model má celkem osm oken dvou různých typů a čtyři dveře dvou různých typů. Kromě toho se v interiéru nachází šest barokních portálů opět dvou typů. V rámci každého typu jsou dle výkresů shodné rozměry a proto by nebylo ekonomické vytvářet nové rodiny pomocí editoru rodin s definicí měnitelných parametrů, které by ve výsledku zůstaly stejné. Vhodnější je v tomto případě využít opět komponenty na místě a ty následně nakopírovat vždy na všechna místa výskytu.



Obr. 6.11: Všechna okna a dveře vzorového modelu s portály a šambránami

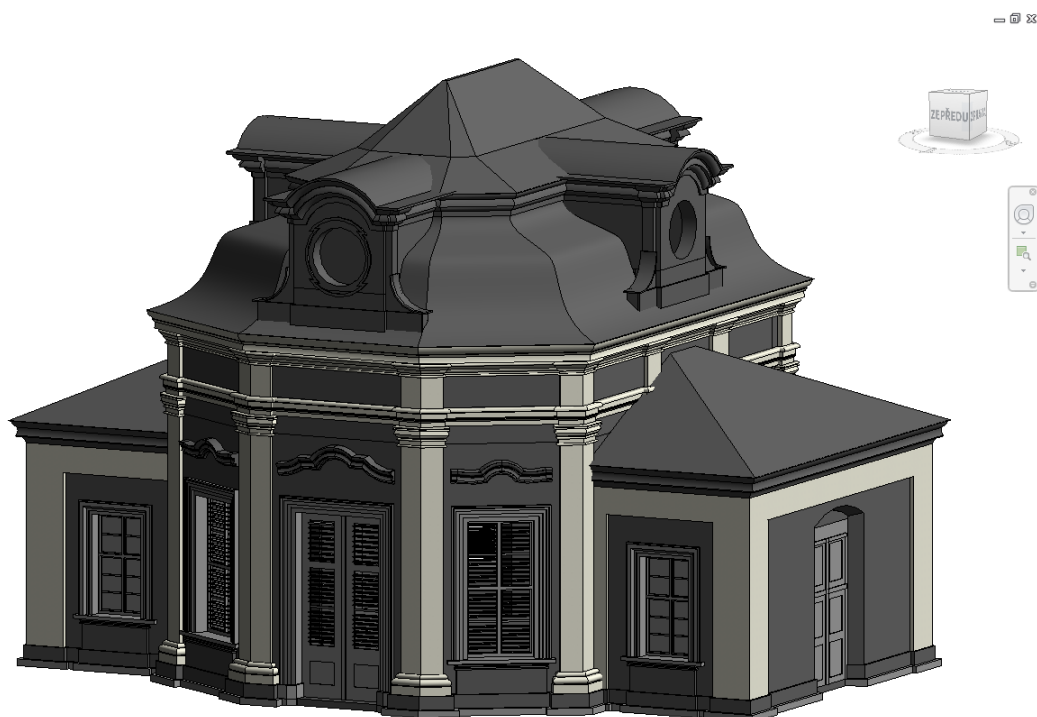
Jako první je nutno vytvořit do existujících stěn otvory pro následné umístění portálů, šambrán, oken a dveří. Podle toho, zda jsme stěny vytvořili jako systémové komponenty nebo komponenty na místě se bude mírně odlišovat i vytváření otvorů. V případě, že je stěna komponentou na místě, stačí v rámci její editace vytvořit nové duté tvary a ty následně automaticky oříznou předem vytvořené tvary stěn. Systémové komponenty takový postup neumožňují a pro vytvoření otvorů je tak nutné nejprve sestrojít otvor jako novou komponentu na místě a tou následně objekt stěny ručně oříznout s využitím funkce *Ořezat*.

Otvory pro dveře vzorového modelu byly postupně vyříznuty pomocí dutých tvarů a to tak, že nejprve bylo jako dutý tvar tažení vytvořeno místo pro pozdější vložení portálu, kdy trajektorie byla vedena po stranách a nad pozdějším portálem a poté byl zbylý kvádr pod budoucím portálem odebrán jako dutý tvar vybrání. Pro hlavní dveře v rizalitu na obou průčelích byly vytvářeny duté tvary přímo v rámci komponent na místě představujících stěny rizalitu. Naopak otvory ve stěnách bočních křídelek bylo nutno vytvořit jako zvláštní komponenty a potom jimi oříznout systémové komponenty stěn. Obdobná je situace v případě otvorů pro okna, kdy

místo pro šambrány bylo vytvářeno jako dutý tvar tažení, zbylá část stěny byl odstraněna jako dutý tvar vybrání a dále bylo vytvořeno místo pro parapet a bylo odstraněno zdivo zevnitř pod parapetem opět pomocí dvou dutých tvarů vybrání.

Portály a šambrány byly vytvářeny jako tažení s profilem načrtnutým dle dostupných výkresů, u portálů v rizalitech byly ještě vytvořeny soklíky jako vysunutí. Vzhledem k chybějící odpovídající kategorii rodin byly všechny portály a šambrány modelovány s kategorií *Dveře*, resp. *Stěny* s předpokládanou pozdější úpravou tříd v GIS. Vlastní okna byla modelována v několika krocích, přičemž nejprve vznikl rám jako vysunutí. Poté byl do rámu dutým tvarem vybrání vyříznut otvor a vysunutím byla modelována okenní křídla. Jako vysunutí poté bylo vytvořeno zasklení, případně jednotlivé rolety u oken v rizalitu. Obdobně byly vytvořeny dveře, přičemž ale byly rozděleny na křídla. Každé dveře tak v souladu s předlohou tvoří dvě stejná křídla navzájem otočená o 180 stupňů. Okenice vikýřů byly rekonstruovány přibližným způsobem jako vysunutí.

Posledními otvory vytvořenými v rámci modelu byly niky v hlavním sálu středního objemu sala terreny. Vzhledem k tomu, že jsou boční stěny středního objemu vytvořeny jako systémové komponenty, byly pro každou niku založeny nové komponenty na místě. Potřebné vybrání bylo vytvořeno pomocí rotace. Nakonec byly niky vyříznuty s využitím nástroje *Ořezat*.



Obr. 6.12: Vzorový model – výstup BIM modelování v programu Revit

6.2.3 Souřadnicové umístění

Jak již bylo popsáno v 6.1.1, Revit umožňuje práci se sdílenými souřadnicemi. Jednotlivé body v rámci objektů modelu tedy v podstatě mohou mít přiřazeny globální souřadnice. Jak tyto souřadnice pro konkrétní budovu získáme, bude záležet na dostupných podkladových datech. Protože předpokládáme využití popisované metodiky zejména pro modelování historických staveb na základě (často také historické) výkresové dokumentace, nebudeme mít většinou přímo k dispozici měřené souřadnice budovy v globálním souřadnicovém systému a budeme muset využít jiných zdrojů. V případě, že modelovaná budova ještě existuje, můžeme využít například vektorová katastrální data z RÚIAN. Pokud modelujeme již zaniklou stavbu (příp. historický stav stavby výrazně přestavěné), bude nutno využít georeferencované staré mapy odpovídajícího data vzniku a budeme samozřejmě muset počítat s nižší přesností souřadnicového umístění. Vzhledem k způsobu souřadnicového umístění v Revitu budeme potřebovat zjistit souřadnice jednoho referenčního bodu (např. rohu budovy) a dále natočení budovy. Obojí je možné bez problému zjistit ve vhodném GIS softwaru. Při zjišťování natočení budovy je nutné zohlednit to, že hodnota, kterou v Revitu nastavíme jako úhel ke skutečnému severu bude později při importu do geodatabáze interpretována jako natočení vzhledem k severu mapového okna (bez ohledu na meridiánovou konvergenci). Dle toho je třeba natočení odměřit (například pro větší přesnost dle delší strany budovy).

Před souřadnicovým umístěním je v Revitu nutno nastavit správně délkové jednotky a to na metry. Při importu modelu do geodatabáze jsou totiž vždy metry očekávány a v případě, že by v Revitu byly nastaveny milimetry, tedy jednotky v současné době ve stavebnictví obvyklé, byl by výsledek v GIS pochopitelně tisíckrát větší. Vlastní souřadnicové umístění je potom možné provést dvěma způsoby. Buď umístíme ve vhodném pohledu základní bod projektu na obraz našeho referenčního bodu a nastavíme v jeho vlastnostech rovinné souřadnice, výšku a *úhel ke skutečnému severu* nebo využijeme volby *Zadat souřadnice v bodě* a zadáme opět souřadnice, výšku a *úhlovou odchylku* přímo pro dotyčný bod budovy. Hlavní rozdíl spočívá v tom, že úhel ke skutečnému severu je levotočivý úhel od projektového severu (nahore v půdorysném pohledu na budovu), který nabývá hodnot od 0 do 360 stupňů. Naproti tomu úhlová odchylka může nabývat hodnot od 0 do 180 stupňů a je vždy nutné uvést, zda je skutečný sever na východ či na západ od projektového. Rovinné souřadnice je třeba zadávat jako záporné hodnoty souřadnic v S-JTSK obdobně jako v GIS při práci v souřadnicovém systému S-JTSK Krovak East North. Souřadnice označená v Revitu *Sever/jih* tedy samozřejmě odpovídá -X

(JTSK), souřadnice *Východ/západ* -Y (JTSK). Výšku budovy zatím zadávat nemusíme. Vzhledem k tomu, že při importu do geodatabáze není informace o výšce zachována, zadáme ji až následně v GIS softwaru (viz 6.3.4).

6.2.4 Alternativní postup modelování – Trimble SketchUp

Jak již bylo popsáno v 6.1.2, jednoduchý CAD software Trimble SketchUp nenabízí možnost parametrického modelování objemových architektonických elementů. Vše, co v programu vytvoříme, tedy bude uloženo pomocí reprezentace hranic. Pokud ale využijeme znalosti principu modelování v pokročilejším BIM softwaru a dodržíme vhodný postup, může být výsledný model po importu do geodatabáze prakticky srovnatelný s výstupem z programu Revit.

Základem pro tvorbu modelů dále rozšiřitelných o sémantické informace je pečlivé „zapouzdření“ jednotlivých architektonických elementů do *komponent*. Každý architektonický element je tedy nutné modelovat tak, aby mohl stát samostatně. Nevystačíme si tedy s modelováním pouze viditelných ploch, jak by to bylo možné při tvorbě modelů sloužících pouze pro účely vizualizace. Sousední prvky modelu tedy nesmí mít společné stěny, plochy, ve kterých se dotýkají, tedy budou v modelu uloženy dvakrát. To nemusí být ve shodě s obvyklým přístupem k topologicky čistému modelování pomocí reprezentace hranic, je to ale nezbytné pro další práci s modelem. Zatímco v Revitu jsme pro modelování používali zejména funkce *Vysunutí* a *Tažení*, analogickými nástroji ve SketchUpu budou *Tah/Tlak* a *Tažení profilu po dráze*. Je přitom nutné si uvědomit, že objekty vytvořené pomocí těchto nástrojů se na rozdíl od Revitu po ukončení funkce stanou pouze soubory explicitně uložených bodů, hran a ploch a nelze je tedy jednoduše zpětně editovat změnou parametrů (profil, trajektorie...).

Vytvořenou geometrii každého architektonického elementu uložíme jako komponentu. Každou komponentu poté můžeme klasifikovat pomocí nástroje *Klasifikátor*, do kterého importujeme klasifikační schéma IFC. Stejně jako v Revitu i zde bude nutno pro některé elementy využít dočasných tříd, pokud pro ně v IFC neexistuje odpovídající třída (ozdobné prvky aj.).

Když máme z komponent složen kompletní model budovy, pokročíme k přípravě na souřadnicové umístění. Ve SketchUpu není možno pracovat v jiném než v lokálním souřadnicovém systému, model ale můžeme umístit tak, aby bylo možné souřadnicové umístění po převodu do GIS provádět co nejjednodušeji a to i v případě, že dojde ke změně části modelu a tuto změnu bude nutno do GIS zapracovat. V GIS softwaru používaném v rámci našeho pracovního postupu (ArcScene, ArcGIS Pro) je možné exaktně provádět pouze posuny modelu, při natočení již není možné číselně

zadat přesnou úhlovou hodnotu. Ve SketchUpu tedy provedeme pouze přípravu na souřadnicové umístění a hlavně natočení modelu. K tomu je třeba zvolit vhodný referenční bod budovy a dále v GIS odměřit natočení modelu vůči severu mapového okna stejně jako v případě souř. umístění v Revitu. Dle naměřené hodnoty potom model ve SketchUpu natočíme (pozor je třeba dát na nastavení přesnosti úhlových jednotek v programu). V ideálním případě by potom bylo vhodné umístit model tak, aby byl zvolený referenční bod v počátku souřadnicového systému SketchUpu. To ale často povede k tomu, že bude model ve více kvadrantech a některé body modelu tedy budou mít záporné souřadnice v lokálním systému SketchUpu, což může způsobit rozbití geometrie po importu do GIS. Proto model umístíme s odsazením o vhodně zvolenou hodnotu, o kterou bude nutno opravit souřadnice modelu při následném posunu v GIS (viz 6.3.4).

6.3 Převod do GIS prostředí

Výsledkem první etapy pracovního procesu, která byla popsána v kapitole 6.2, je trojrozměrný model budovy, kde jsou všechny architektonické elementy, modelované dle zvolené úrovně podrobnosti, uloženy jako parametrické objemové modely. Vzhledem k tomu, že předpokládáme další převod do GIS prostředí, kde bude jednodušší práce s popisnými údaji, mají všechny prvky modelu pouze základní negeometrické atributy, přiřazené programem při jejich vytváření. Dále bude proto nutné model převést s využitím datového formátu IFC do prostorové databáze v GIS, rozdělit ho do vhodnějších tříd dle typů architektonických elementů, přiřadit jednotlivým prvkům modelu atributové informace dle dostupných podkladů, otexturovat je, souřadnicově model umístit a nakonec ho vizualizovat v rámci předem vytvořené 3D scény vzniklé procedurálním modelováním.

6.3.1 Import

Prvním krokem převodu z BIM do GIS prostředí je export ze softwaru informačního modelování budov. Před exportem je nutno zvážit, do jakého formátu budeme model exportovat. Nejvhodnější je samozřejmě použít zmiňovaný standard IFC, ten ale existuje ve více verzích, přičemž pro každou z nich je dále definováno více pohledů na model (Model View Definition, viz 1.3.1). V současné době bude patrně nejbezpečnější použít verzi IFC2x3 TC1 a pohled Coordination View 2.0, který je zaměřen na koordinaci mezi jednotlivými odvětvími stavebního procesu a mělo by se jednat o v současné době nejšířěji implementovaný pohled na model [91]. V případě

Verze IFC a pohled (MVD)	Poznámka	Zobr.	Import
IFC2x2 Singapore BCA e-Plan Check	pro export na BCA ePlan Check Server	✓	X
IFC2x2 Coordination View	koordinace mezi účastníky stavebního procesu	✓	X
IFC2x3 Basic FM Handover View	sdílení informací pro facility management	✓	✓
IFC2x3 GSA Concept Design BIM	pohled specifikovaný americkou vládou	✓	X
IFC2x3 Coordination View	koordinace mezi účastníky stavebního procesu	✓	X
IFC2x3 Coordination View 2.0	koordinace mezi účastníky stavebního procesu	✓	✓
IFC2x3 Extended FM Handover View	sdílení informací pro facility management	✓	✓
IFC4 Reference View	nástupce Coordination View v IFC4, referenční	X	X
IFC4 Design Transfer View	nástupce Coordination View v IFC4, pro editaci	X	X

Tab. 6.2: Verze a pohledy IFC exportovatelné z Revitu a jejich podpora v ArcScene

vzorového modelu bylo snahou otestovat všechny dostupné možnosti exportu z programu Revit a následně jejich akceptaci GIS programem ArcScene, resp. rozšířením Interoperability Extension.

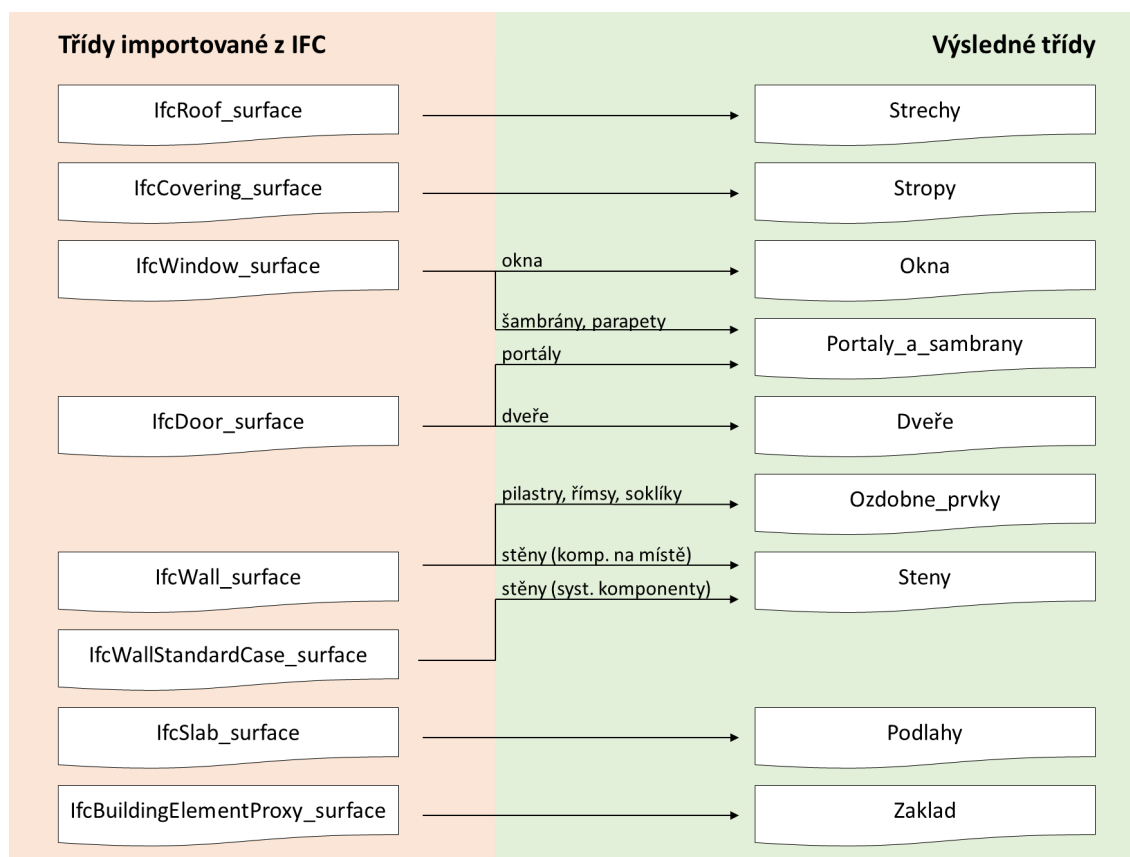
Ne příliš překvapivý výsledek testování je v tabulce 6.2. Zajímavé je, že ArcScene dokáže mimo verzi IFC4 zobrazit přímo model ve formátu IFC, i když praktičtější možností je v tomto případě import modelu a jeho konverze do ESRI geodatabáze. Takovým způsobem je možno nakládat jednak právě s verzí IFC2x3 Coordination View 2.0 a dále s pohledy vhodnými pro účely správy budov. Starší verze, stejně jako novější IFC4, nejsou podporovány. Import probíhal pomocí Interoperability Extension s využitím nástroje *Data Interoperability Tools/Quick Import*, pro export modelu z programu Revit byla využívána EXPRESS implementace IFC.

V 6.2.3 již bylo zmíněno, že v programu Revit je možné umístit model na souřadnice odpovídající poloze předlohy ve zvoleném globálním souřadnicovém systému (v ČR tedy nejčastěji v S-JTSK). Na rozdíl od GIS datasetů ale z BIM exportovaný model nenese žádné informace o tom, jaký souřadnicový systém byl použit. Toto je tedy nutné specifikovat až v GIS softwaru a to ideálně hned v dialogovém okně při importu modelu.

6.3.2 Úprava tříd a atributů

Poté, co importujeme model ve formátu IFC pomocí Interoperability Extension, získáme novou geodatabázi s třídami (feature classes) vytvořenými dle tříd existujících v rámci IFC modelu, tedy v našem případě v důsledku podle kategorií rodin použitých v Revitu. Pro nás jsou přítom nejdůležitější třídy, které obsahují geometrii, tedy 3D modely jednotlivých architektonických elementů a k nim vztážené doplňující atributy. Importovanou klasifikaci objektů do tříd architektonických elementů je vhodné dále upravit, aby lépe vystihovala strukturu modelovaného objektu. Pro ilustraci následuje popis úpravy roztřídění u prototypového modelu. Třídy obsahující modely střech, stropů, podlah a základ vzorového modelu byly převedeny

jedna k jedné, tedy prakticky pouze přejmenovány. Naproti tomu třída oken (IfcWindow_surface) byla rozdělena na modely skutečně reprezentující okna a dále na šambrány a parapety, přičemž tyto byly dále sloučeny s portály vytvořenými v rámci třídy dveří (IfcDoor_surface). Výsledná třída stěn je potom tvořena jednak stěnami, které vznikly modelováním základními nástroji Revitu jako systémové komponenty (IfcWallStandardCase_surface), jakož i stěnami vytvořenými jako komponenty na místě s kategorií rodiny *Stěny* (IfcWall_surface). Z druhé jmenované třídy byla potom oddělena samostatná třída ozdobných štukových prvků. Všechny tyto změny bylo nutné provést vzhledem k tomu, že při modelování neexistovaly v Revitu vhodnější kategorie rodin pro zatřídění modelovaných elementů. Diagram znázorňující popsanou změnu tříd prvků je na obrázku 6.13.



Obr. 6.13: Úprava klasifikace architektonických elementů po importu do geodatabáze

Po změně rozřazení architektonických elementů je vhodné zvážit přidání potřebných atributových dat. V tabulce 6.3 jsou uvedeny výsledné atributy vzorového modelu. Ty přitom lze rozdělit do tří skupin. První skupinu tvoří dva atributy vytvářené implicitně při importu modelu ve formátu IFC do geodatabáze, tedy atributy OBJECTID a Shape. Další čtyři atributy, tj. GlobalID, Tag, ObjectType a Name, byly ponechány z IFC a umožňují nám zpětně identifikovat jednotlivé elementy

v souboru IFC, respektive přímo v modelu v programu Revit. Zbytek atributů byl vytvořen ručně a je určen pro uživatelské vkládání dalších informací o jednotlivých prvcích modelu, přičemž v některých případech nahrazuje původní atributy z Revitu (například atribut Description). Atributy jsou pojmenovány v češtině, vzhledem k předpokladu že bude model prezentován hlavně v českém prostředí. Pro účely následné vizualizace budou používány pouze uživatelsky vytvořené atributy, zbylé jsou ponechány pro interní potřebu. Atribut Datace byl v případě vzorového modelu vytvořen jako textový řetězec. To je rozumné pouze s ohledem na to, že byla prakticky celá sala terrena vybudována v jednom časovém období a toto rozmezí je jedinou hodnotou v rámci celého modelu (1709 – 1711). Pro filtrování jednotlivých prvků tak tento atribut prakticky není použitelný. Pro většinu historických budov by bylo vhodnější definovat atributy, které specifikují dataci, jako jedno či více celých čísel dle podrobnosti dostupných podkladů (datum vzniku nebo vznik a zánik, atd.). To umožní při použití vhodných atributových dotazů filtrování objektů dle jejich vzniku a může být obdobou fázování v BIM softwaru.

Atribut	Typ	Poznámka
Nazev	string (100)	název architektonického elementu
Typ	string (100)	bližší určení typu v rámci třídy
Popis	string (500)	popis dle dostupných podkladů
Zdroj	string (200)	citace zdrojových dat
Odkaz	string (250)	URL na další informace
Datace	string (100)	datace vzniku architektonického elementu
OBJECTID	object ID	identifikátor vytvořený po importu do geodatabáze
Shape	geometry	formát uložení geometrie – vždy MultiPatch
GlobalID	string (22)	reference zpět do IFC
Tag	string (2048)	reference zpět do IFC
ObjectType	string (2048)	reference zpět do Revitu
Name	string (2048)	reference zpět do Revitu

Tab. 6.3: Výsledné atributy všech tříd architektonických elementů v geodatabázi

6.3.3 Materiály, texturování a opravy modelu

Informace o materiálovém složení architektonických elementů jsou důležitou součástí informačního modelu historické budovy. Kromě toho, že vyjadřují onen v literatuře často zmiňovaný „detail za povrchem“ elementů, souvisí použité materiály také s vizualizací výsledného modelu, tedy s použitými texturami. BIM softwaru, jako je Revit, umožňují podrobně nastavovat materiálové vlastnosti modelovaných prvků, které zahrnují parametry vzhledu v různých úrovních podrobnosti a dále

také vlastnosti fyzikální a tepelné. O textuře použité na povrchu elementů při vizualizaci v programu rozhoduje nastavený materiál, v případě vícevrstevných konstrukcí (např. stěny modelované jako systémové komponenty) je potom důležitý ten materiál, který se nachází na vnější straně prvku. Uvedený systém je vhodný pro modely nově navrhovaných budov, v případě památkových objektů ale nemusí vždy stačit. Pro zdobné omítky historických budov je možné využít například nástroj *Obtisk*, jeho možnosti přizpůsobení textury ale nejsou zcela ideální.

Zásadní problém potom nastává při pokusu převést materiálové informace a textury do GIS prostředí. To je zřejmě způsobeno zaměřením existujících pohledů v IFC zejména na koordinaci mezi odvětvími a hlavně na zabránění fyzickým kolizím mezi jednotlivými konstrukčními celky budov, kdy materiálové složení a vzhled nehrají nijak zásadní roli. Pro přenos informací o materiálech je v IFC k dispozici entita *IfcMaterial*, v rámci které se ale přenáší pouze obecné informace o použitém materiálu u systémových komponent, odpovídající hodnotou typu rodiny použité pro modelování. Pro přenos textur potom existuje třída *IfcSurfaceTexture* a to již od verze IFC 2x2. Pohled na model Coordination View 2.0 (IFC2x3), nejlépe použitelný pro převod mezi BIM a GIS programy, ale tuto třídu neimplementuje. Třída je sice dostupná v pohledech verze IFC4 Reference View a Design Transfer View, ty ale zase nejsou podporovány GIS softwarem a je otázka, zda by třídu byl vůbec schopen využít při exportu program Revit [91].

Řešením může být v případě materiálů přiřazovat vlastnosti jednotlivých prvků modelu až v GIS prostředí jako hodnoty vhodně vytvořených atributů. Volba atributů bude záviset na zvolené podrobnosti modelu a zejména na dostupných podkladových datech, ve výsledku by ale měla umožnit jak získání základního přehledu o materiálech modelovaných prvků a filtraci elementů dle materiálu, tak v případě dostatečného množství atributů i komplexnější analýzy. Obdobně je třeba postupovat při texturování modelu, to znamená texturovat elementy až po importu do GIS. Materiálové složení uchovávané v rámci atributových dat v geodatabázi přitom samozřejmě nijak neovlivní vzhled modelu. Situace je složitější také proto, že GIS software není obecně přizpůsoben pro texturování modelů, stejně jako příliš nepočítá s předchozím 3D modelováním. Ve webových návodech lze najít různé příklady použití formátů FBX či COLLADA DAE pro převod texturovaného modelu z Revitu do GIS¹. Vzhledem k tomu, že se v takovém případě ztratí struktura modelu, tedy rozdělení na architektonické elementy, je pro nás však takový postup samozřejmě zcela nepřijatelný.

¹např.: <https://community.esri.com/thread/188318-bim-to-cityengine-workflows>



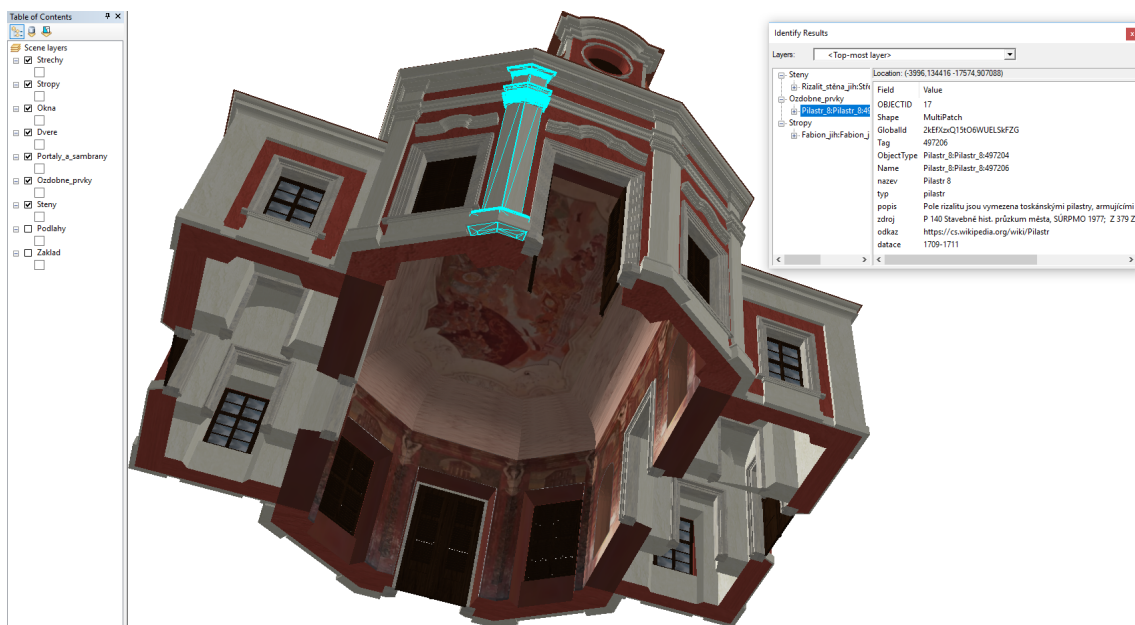
Obr. 6.14: Příprava textur interiéru vzorového modelu v programu SketchUp

Podklady pro náš vzorový model materiálové složení částí budovy popisují spíše okrajově a soustředí se spíše na architektonické řešení objektu. Proto jsou případné informace o materiálech ve výsledném modelu obsaženy pouze v rámci atributu Popis. V případě potřeby lze ale samozřejmě přidat další atributy, které mohou specifikovat použité materiály a jejich vlastnosti podrobně. Pro texturování modelu byl potom použit program CityEngine, který je sice primárně určen pro procedurální modelování rozsáhlejší zástavby, jak je ostatně jasně patrné z předchozích kapitol, disponuje ale také možností ručního texturování objektů, což lze využít i pro účely informačního modelu.

Pro přenos mezi GIS softwarem ArcScene a CityEnginem a naopak byla využita ESRI geodatabáze, přičemž při exportu nebyly přepisovány třídy výchozí databáze, ale z důvodu bezpečného zachování dat byla vytvářena geodatabáze nová. Vzhledem k omezeným možnostem CityEnginu bylo možné texturování provádět přímo s využitím nástroje *Shape Texturing Tool* pouze v jednodušších případech v exteriéru budovy, pro tvorbu textur interiéru bylo nutno obrazové podklady nejprve transformovat na rozměry texturovaných objektů. Pro tyto účely byl použit program SketchUp, kde byly textury transformovány s využitím zabudované (zřejmě) projektivní transformace na rohy vnitřních stěn a jejich částí, které byly vymodelovány jako plochy na základě vnitřních rozměrů sala terreny. Alternativně by pro tyto účely bylo možné využít s větší přesností software pro tvorbu fotoplánů, jako

je například jednoduchý SIMphoto². Přitom je třeba si uvědomit, že použitá textura může být prostou fotografií stěn jako v případě vzorového objektu, může se ale jednat také o kompozici s dalšími daty, jako je například digitální model reliéfu stěny, vyjádřený pomocí vrstevnic nebo stínování, což by přineslo další informační hodnotu do modelu.

Po importu modelu v geodatabázi do softwaru CityEngine byly objeveny některé plochy, které se nesprávně zobrazovaly z důvodu jejich převrácených normál. Dále bylo nalezeno několik nesprávně vytvořených ploch v místech, která byla při modelování v Revitu vyříznuta pomocí dutých tvarů. Oba typy chyb byly pravděpodobně způsobeny převodem objemových modelů v BIM na objekty uložené pomocí reprezentace hranic v geodatabázi. Pomocí základních nástrojů pro 3D modelování v CityEnginu lze tyto problémy odstranit a to v prvním případě převrácením normál a v případě druhém ručním odstraněním nevhodných ploch. CityEngine tak v tomto případě může zastoupit software pro 3D editaci, který jinak v GIS chybí, i když je využitelný opravdu pouze pro základní operace a opravy.



Obr. 6.15: Texturovaný model v prostředí ArcScene (skryté podlahy a základ)

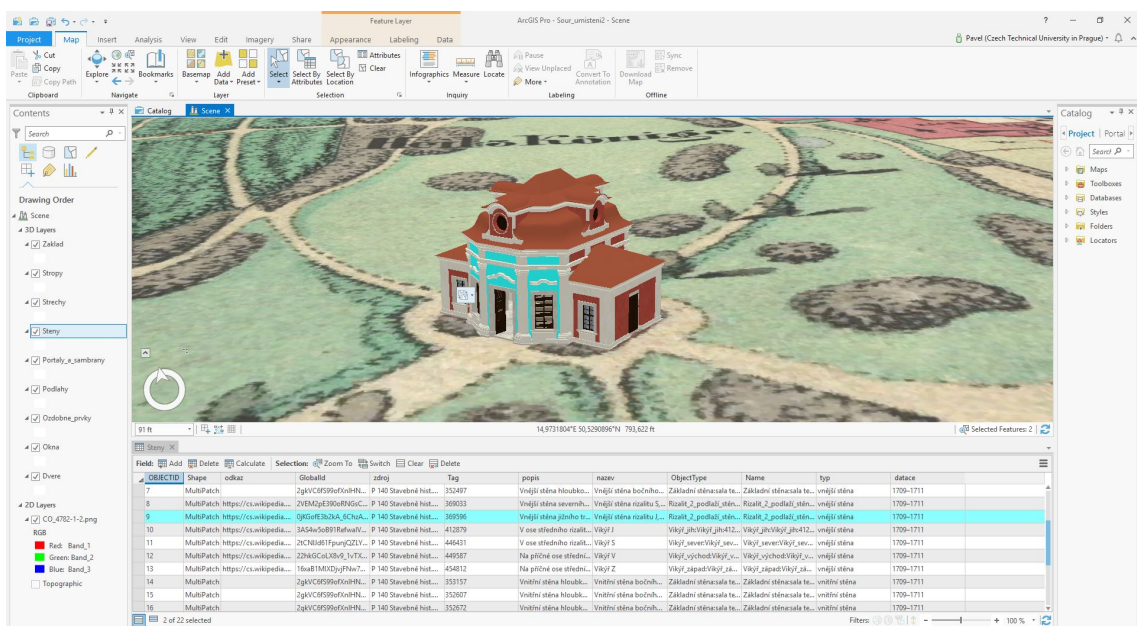
6.3.4 Oprava souřadnicového umístění

Jak již bylo popsáno v 6.2, funkce pro práci s globálními souřadnicovými systémy v BIM softwaru v současné době neodpovídají pokročilým možnostem v GIS. V jednoduchých CAD programech potom lze pracovat pouze v lokálním souřadnicovém

²<http://lfgm.fsv.cvut.cz/hodac/simphoto/>

systému. Pokud jsme ale postupovali dle výše uvedených doporučení, dostaneme po importu model již připravený tak, aby bylo souřadnicové umístění v GIS, případně pouze jeho oprava co nejjednodušší. Zásadním rozdílem samozřejmě bude, zda proběhlo předchozí 3D modelování v BIM programu Revit nebo v CADu SketchUp.

V prvním případě po importu obdržíme model správně umístěný v rovinných souřadnicích a natočený dle skutečného severu, opravit tak budeme muset pouze jeho výškové umístění. V případě modelu z programu SketchUp je model pouze správně natočen, je tedy třeba opravit jak výšku, tak umístění v rovinném souřadnicovém systému. V obou případech nám dobře poslouží ArcGIS Pro a funkce *Move To* (Edit/Tools/Move To), která umožňuje posun modelu ve třech souřadnicích o zvolenou hodnotu *Delta*. Výšku modelu, resp. jeho referenčního bodu zjistíme nejlépe z vhodného digitálního modelu terénu. Pokud rekonstruujeme současný stav budovy, můžeme využít větší přesnosti současných výškových podkladů, v případě rekonstrukce stavu předlohy v minulosti se budeme muset spokojit s menší přesností digitálního modelu terénu odvozeného na základě vhodné staré mapy. Rovinné souřadnice referenčního bodu budovy u modelu ze SketchUpu získáme nejlépe z katastrálních podkladů stejně jako v případě souř. umístění v programu Revit (viz 6.2.3). Při posunu modelu je přitom nutno pamatovat na to, že referenční bod nemůže být ve SketchUpu umístěn v počátku lokálních souřadnic, ale musí být odsazený o vhodnou hodnotu tak, aby byl celý v jednom kvadrantu (6.2.4). Cílové souřadnice je tedy nutno o tuto hodnotu opravit.



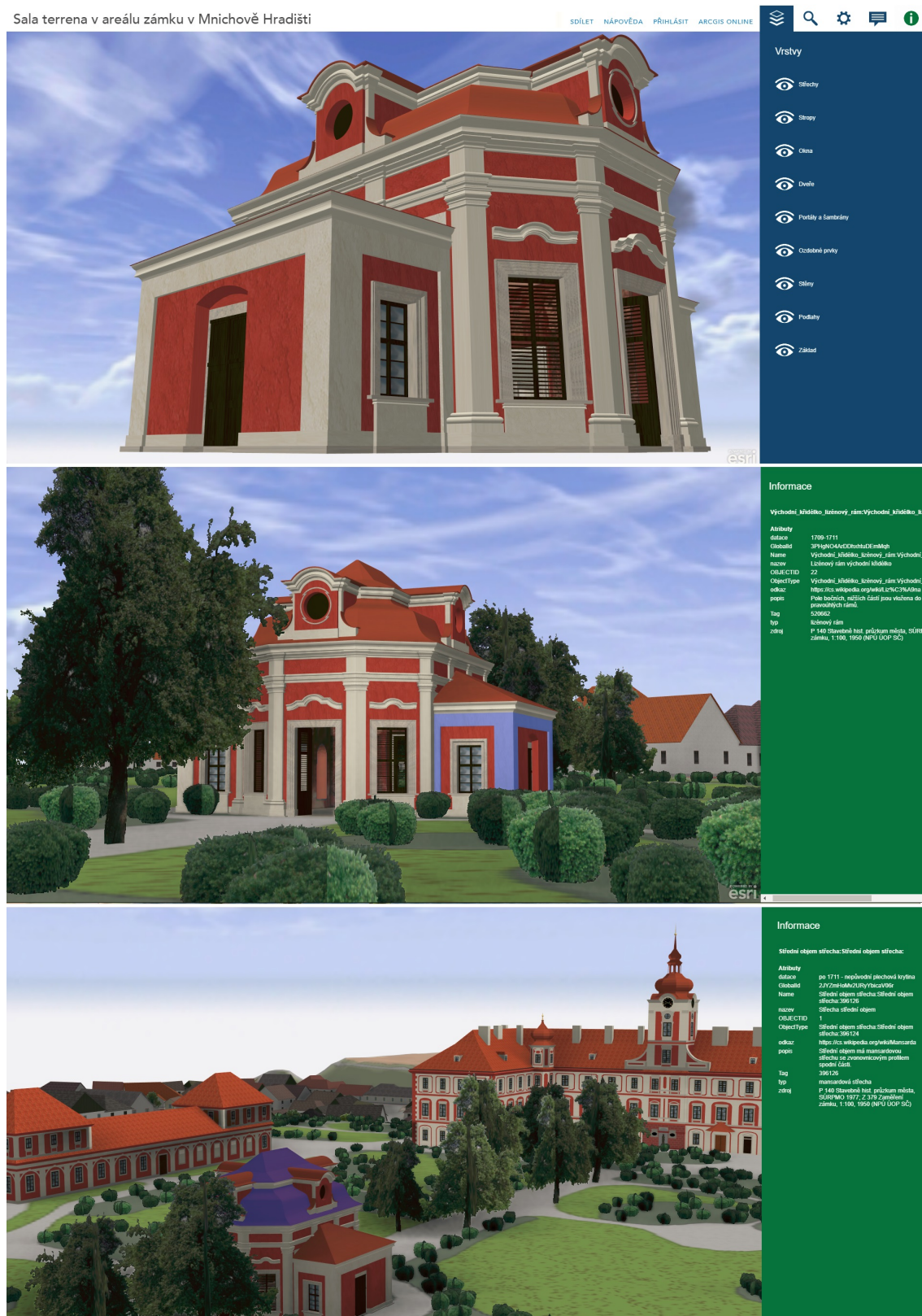
Obr. 6.16: Souřadnicově umístěný model v prostředí ArcGIS Pro

6.3.5 Vizualizace

Výsledkem postupu popsaného výše je jednoduchý souřadnicově umístěný informační model historické budovy. Pro potřeby prezentace dat je tedy možné vytvářet webové vizualizace jak samotné budovy, tak modelu v kontextu okolního terénu a zástavby. K tvorbě webových scén je z programů v rámci našeho pracovního postupu možné využít buď ArcGIS Pro nebo CityEngine. S ohledem na stabilnější výsledky při publikaci volíme v našem případě druhý jmenovaný.

Pro publikaci 3D scén existují v zásadě dva přístupy. První možností je exportovat model jako celek do jednoho souboru a ten potom na webu zobrazovat pomocí vhodném prohlížeče. V případě CityEnginu je tímto způsobem možné exportovat model do formátu 3WS, který je zobrazovatelný vlastním softwarem CityEngine Web Viewer. Nevýhodou tohoto přístupu je nutnost nejprve načíst celý model do paměti před jeho zobrazením, což je nevhodné z hlediska uživatelské přívětivosti zejména u rozsáhlejších modelů.

Pokročilejší možností je proto exportovat model po jednotlivých třídách jako vrstvy 3D scény a tyto vrstvy potom publikovat jako webové služby. Ze CityEnginu je takovým způsobem možné exportovat balík SLPK (Scene Layer Package) a ten potom publikovat a prohlížet pomocí aplikace 3D Scene Viewer. Při prohlížení jsou tyto vrstvy načítány dynamicky obdobně jako u klasických 2D webových služeb, což je pro uživatele výrazně příjemnější. Zatímco v případě dosud publikovaných scén vzniklých procedurálním modelováním (5.4) byl prozatím využíván první přístup, pro další výstupy bude používána možnost druhá. Ta přinese lepší výsledky při sdílení rozsáhlejších scén obsahujících složité modely s původem v BIM.



Obr. 6.17: Vzorový model ve webové scéně (ukázka identifikace prvků na dolních dvou obrázcích)

7 Diskuze

V první kapitole této práce byl představen pojem BIM, tedy informační modelování budov a dále byl zkoumán vztah tohoto odvětví s geografickými informačními systémy. Přitom je možné říci, že snaha o definování oblastí, kde by BIM a GIS mohly spolupracovat, je v současné době stále velmi aktuálním tématem, což je pochopitelné a souvisí s nástupem využívání informačního modelování ve stavebnictví. Důležité je, že pod pojmem BIM si nelze představovat jeden konkrétní softwarový produkt. BIM je zejména nástroj komunikace mezi programy jednotlivých účastníků stavebního procesu například prostřednictvím výměnných formátů, jako je IFC. GIS software by tedy z tohoto pohledu mohl sloužit jako jeden z nástrojů, který umožňuje posuzovat navrhovanou budovu v širším geoprostorovém kontextu. Odborná literatura potom nachází možné využití v územním plánování, při výběru lokality stavby, analýzách viditelnosti, posuzování interakce mezi budovami a okolím, případně pro plánování bezpečnosti práce na staveništi i plánování dopravní infrastruktury.

Na druhou stranu již vytvořené informační modely dokončených staveb mohou být použity pro plnění 3D modelů měst např. ve formátu CityGML. Takové modely lze dále využít pro krizové plánování a řízení, tvorbu simulátorů, kombinovanou outdoor/indoor navigaci a v neposlední řadě pro vizualizace. Hlavní využití může vytvořený BIM model nalézt při správě a údržbě budov. GIS se v takovém případě uplatní zejména, je-li třeba spravovat větší skupinu budov, typicky například univerzitní kampus, případně tovární komplexy. Zvláštní oblastí je vytváření modelů již existujících staveb, speciálně památkových objektů. Modely, které tak vzniknou, mohou nalézt stejné uplatnění jako ty, které byly vytvořeny v rámci návrhu a realizace nových staveb. S oblastí geomatiky potom u modelování již existujících staveb úzce souvisí i samotná tvorba modelu s využitím existujících výkresů, geodetických měření, fotogrammetrie a laserového skenování.

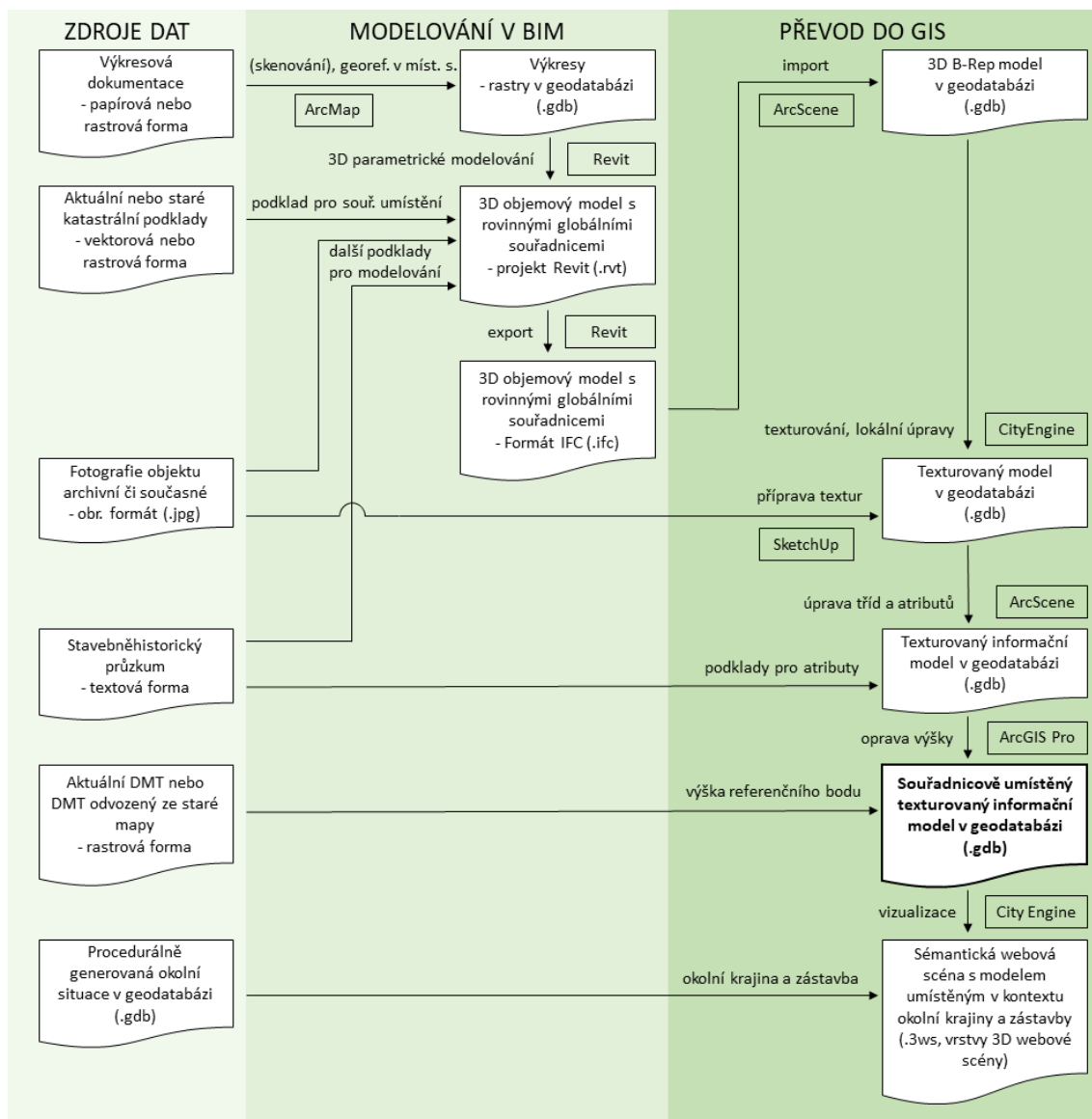
Za v současné době nejslibnější téma pro další výzkum je tedy možné označit tvorbu informačních modelů historických staveb – památkových objektů. Výsledné modely přitom mohou najít uplatnění pro uchovávání výsledků stavebněhistorických průzkumů, při správě budovy, tj. ve facility managementu různé úrovně od správy ploch až po pokročilé modely včetně veškerého zařízení a dále při rekonstrukci památek. Proto byla stěžejní část této práce věnována právě praktickému výzkumu možností BIM a GIS softwaru při informačním modelování historických budov.

7.1 Shrnutí pracovního postupu a výsledků

Z popisu pracovního postupu tvorby informačního modelu památkového objektu (viz 6) je patrné, že v souladu se závěry z rešerše v současné době nevystačíme s jedním softwarovým nástrojem, ale pro dosažení požadované funkcionality musíme využít kombinaci několika specializovaných programů. V našem případě navrhovaný pracovní postup zahrnuje BIM/CAD nástroje Autodesk Revit, Trimble SketchUp a GIS produkty ESRI ArcMap, ArcScene, ArcGIS Pro a CityEngine, které je třeba postupně použít dle schématu, které bylo popsáno výše a je přehledně zakresleno na obrázku 7.1.

Kombinace většího množství softwarových produktů s sebou většinou nese problémy při komunikaci jednotlivých nástrojů, což v případě 3D modelování platí dvojnásob. Na druhou stranu v případě testování našeho pracovního postupu se vyskytlo poměrně málo problémů s přenosem dat. Největší komplikací byl dle očekávání převod z BIM do GIS prostředí. Při něm došlo zřejmě vlivem převodu geometrie z implicitní reprezentace pomocí objemových modelů (CSG) na jednodušší reprezentaci hranic (B-Rep) v GIS k chybnému zobrazení několika ploch a k převrácení normál u některých z nich. Tento problém však bylo vcelku jednoduché odstranit. Díky tomu, že je výsledný model uložen jako soubor architektonických elementů v GIS databázi a je editovatelný i po jednotlivých plochách, bylo možné provést opravy výrazně lépe než u statických modelů importovaných v grafických formátech, jako je COLLADA DAE nebo OBJ.

Relativní bezproblémovost předávání dat je dána použitým postupem, kdy je pro převod z BIM do GIS vybrán ISO standard IFC, který by měl být ve verzi IFC2x3 Coordination View 2.0 vcelku bezpečně podporován softwarovými nástroji různých odvětví. Pro komunikaci jednotlivých GIS nástrojů je potom vždy používána ESRI geodatabáze a typ ukládání 3D geometrie multipatch, který se (mírně oproti očekávání) ukázal být bezpečným formátem i pro přenos složité podrobně texturované geometrie. Většina prací zabývajících se informačním modelováním s texturami zatím nepočítá a to zřejmě zejména pro jejich náročný převod z BIM do GIS. Klasický postup 3D modelování, kdy je texturování provedeno v modelovacím programu a model je poté exportován do 3D formátů, jako je COLLADA DAE, OBJ nebo FBX, v případě sémantického modelování a převodu pomocí IFC není možné využít, protože nejvíce používané verze a pohledy IFC textury nepodporují. Popsaný pracovní postup proto představuje ojedinělý přístup, kdy je pro umístění textur použit až GIS software s tím, že je podkladové obrázky nejprve nutno připravit v externím programu (SketchUp, SIMphoto...). To sice nepředstavuje příliš přímočarý postup,



Obr. 7.1: Pracovní postup tvorby informačního modelu historické budovy

ale zdá se, že se v současné době jedná o jedinou možnost, jak získat strukturovaný informační model včetně atributů a textur umístěný v GIS prostředí.

Ze schématu je patrné, že pro tvorbu modelu je třeba v podstatě pouze jeden software, tedy BIM Autodesk Revit (příp. CAD SketchUp pro alternativní postup modelování – 6.2.4). Naproti tomu pro integraci a dokončení modelu v GIS je nezbytné využít tři nástrojů od jednoho dodavatele, tedy ArcScene, CityEngine a ArcGIS Pro (plus externí SketchUp příp. SIMphoto pro přípravu textur), z nichž všechny jsou určeny pro práci s 3D daty v GIS, ale žádný z nich nezabezpečuje plnou funkcionalitu, která by byla potřebná pro přizpůsobení a správu modelu v prostoro-
vé geodatabázi. To ukazuje, že co se týče detailní trojrozměrné reprezentace, jsou

GIS prostředky stále pozadu za CAD/BIM nástroji používanými ve stavebnictví. V případě ESRI je pravděpodobné, že vývoj půjde směrem k integraci všech potřebných funkcí do ArcGIS Pro a bude snahou nabízet jeden produkt bez ohledu to, zda bude uživatel pracovat s 2D nebo 3D daty. Co se týče práce se složitými 3D modely, jejich editace a přesouvání, je ale i tento produkt oproti BIM programům stále na začátku.

Navržený pracovní postup v současné době počítá s poměrně nákladnými softwarovými nástroji. Jak už bylo popsáno v kapitole 6.1, je nyní výrazně snadnější nahradit levnějšími alternativami použitý BIM software než GIS programy. Použitý BIM Revit by tak mohl s výraznou úsporou zastoupit dostupný CAD SketchUp. S ohledem na to, že přiřazení atributových informací a konečnou úpravu tříd provádíme až následně v GIS, nevyžadujeme pokročilou správu atributů od modelovacího nástroje. Jediným výrazným nedostatkem je tak způsob uložení geometrie pomocí reprezentace hranic, kdy jednou vytvořené modely architektonických elementů jsou uloženy explicitně jako body, hrany a plochy a není možná jejich jednoduchá úprava změnou profilu, trajektorie či jiných parametrů. Částečně je problém možno řešit pečlivým „zapouzdřením“ jednotlivých elementů do komponent, přičemž je třeba každý prvek modelovat tak, aby mohl existovat nezávisle na prvcích ostatních (např. bez společných ploch). Výsledné prvky je potom možné klasifikovat do tříd dle IFC (v podstatě obdoba začlenění do kategorií rodin v Revitu), takže po exportu do IFC a následném importu do GIS získáme velmi podobný výsledek, protože transformací do GIS stejně dojde k převodu na reprezentaci hranic. Program SketchUp by bylo tímto způsobem možné využívat, zejména pokud rekonstruujeme podobu budovy spíše v menším měřítku, tedy s nižší úrovní rozpracovanosti.

Náhrada komerčního GIS řešení je poněkud náročnější a mohla by spočívat například ve využití prostorové databáze PostGIS, schématu 3D City Database a digitálním glóbu Cesium, příprava podkladových 2D dat by mohla probíhat v alternativním GIS softwaru, jako je QGIS. Protože se jedná o poměrně náročný a ne příliš prozkoumaný postup, mohl by být prozatímním mezistupněm export vytvořeného modelu dle standardu CityGML, ať už jako solitéru nebo včetně modelu okolí. Tak by sice byl pro převod modelu do GIS a potřebné úpravy využíván komerční software, výsledek by ale mohli používat i uživatelé bez přístupu k nákladným programům.

Z představeného pracovního postupu je možné získat v podstatě tři výstupy. Prvním je 3D model vytvořený v BIM softwaru Revit, jenž je k dispozici jednak jako projekt v jeho nativním formátu RVT a dále jako výhodnější model ve formátu IFC, který je možno buď prohlížet v jednoduchých prohlížečkách IFC nebo importovat do pokročilejších softwarových nástrojů. Výstupem, ke kterému se dostaneme

na konci pracovního postupu je naopak webová scéna, obsahující jak samotný model, tak okolní zástavbu a krajinu modelovanou procedurálně nebo také v programu SketchUp dle postupu na obrázku 5.1. Nejdůležitějším výstupem je ale model, který webové scéně předchází a to trojrozměrný texturovaný informační model historické budovy v prostorové databázi. Ten je složen z dílčích modelů jednotlivých architektonických elementů, jejichž reprezentace obsahují také sémantické informace. U každého objektu tedy víme, o jaký architektonický element se jedná, jakého je typu a dále další atributy podle dostupných podkladů a zvolené podrobnosti modelu.

Jak podrobný model jsme tedy schopni vytvořit na základě prezentovaného pracovního postupu? To bude pochopitelně záležet zejména na tom, jak podrobná budeme mít podkladová data. Je možné říci, že typický výstup, jakým je prototypový model, dosahuje úrovně podrobnosti LOD4 dle CityGML, neboť je modelován jako podrobný architektonický model včetně otvorů, tedy oken a dveří a je u něj reprezentován i interiér. Dle BIM úrovní rozpracovanosti podle AIA by se mohlo jednat o model s LOD 200 – 300. Prvky, ke kterým nebyly k dispozici další informace jsou sice modelovány pouze schematicky a generalizovaně, většina elementů je ale modelována přesně, co se týče rozměru (přesně dle přesnosti podkladových výkresů) a všechny stavební elementy mají přiřazeny negeometrické popisné informace. Dle Foxeho (obr. 4.1) se ale jedná pouze o první úroveň informačního modelu, jelikož není modelováno vnitřní zařízení a systémy uvnitř budovy. Z hlediska využitelnosti dle strany 47 se jedná spíše o informační systém pro zájemce o památky z řad veřejnosti a tomu odpovídá i výsledný způsob prezentace v rámci webové scény. Je ale třeba říci, že se uvedené týká prototypového modelu, který je zamýšlen spíše jako objekt pro testování existujících technologií. Pomocí navrhovaného postupu by bylo možné modelovat a spravovat i modely s výrazně větší úrovní rozpracovanosti. Nakonec i v případě vzorového modelu je možné případně přidávat další detail na základě dostupnosti dalších pramenů nebo po konzultaci z odborníky z řad architektů.

Primárním podkladem pro popsání pracovního postupu je výkresová dokumentace objektu. Je tedy možné říci, že je postup využitelný jak pro stále existující historické budovy, tak pro objekty již zaniklé, pokud k nim máme dostupná podkladová data. Těmi jsou tedy zejména výkresy pro určení tvaru a rozměrů budovy, žádoucí jsou ale také historické fotografie jako další podklad pro modelování a jako zdroj pro tvorbu textur. Dostačující mohou být přitom také archivní kresby, malby nebo náčrtky, které jsou sice pro tvorbu textur méně vhodné, mohou být ale použity pro zjištění barevnosti objektu, na základě čehož lze vytvořit textury nefotografické. Nezbytné jsou dále zdroje atributových dat, tedy v českém prostředí například textová část stavebněhistorických průzkumů. Nad rámec této práce je popis využití moderních

metod sběru dat o objektu, jako je digitální fotogrammetrie nebo laserové skenování a automatizovaná tvorba modelu na jejich základě. Na druhou stranu je v současné době obvyklý postup, kdy je model vytvářen ručně i na základě těchto dat, přičemž je mračno bodů používáno pouze jako podklad pro získání rozměrů objektu například s využitím vhodně volených řezů a neprobíhá tedy automatické mapování architektonických elementů podle předpřipravených knihoven. V takovém případě je tvorba modelu analogická modelování na základě výkresové dokumentace (ruční tvorba elementů a skládání výsledného celku z nich) a popsany pracovní postup se může také uplatnit.

7.2 Porovnání s požadavky na informační model

V kapitole 4.1 byla na základě rešerše shrnuta požadovaná funkcionální informačního systému pro správu výsledného informačního modelu historické budovy. Pojdme se nyní podívat na to, jak odpovídá těmto požadavkům systém navržený dle popsaného pracovního postupu.

Jako první požadavek byla uvedena možnost definování vzájemných a hierarchických vztahů mezi objekty modelu. V tabulce přetištěné zde na obrázku 4.2 tvrdí Saygi a Remondino [34], že touto funkcí disponují pouze GIS nástroje. S tím není možno zcela souhlasit, protože v programu Revit, použitým v našem pracovním postupu, jsou v případě využití základních nástrojů pro modelování architektonických elementů vytvářeny hierarchické vztahy mezi hostovanými komponentami (okna, dveře...) a jejich hostiteli (stěny, střechy...). Na druhou stranu ale tato funkčnost zmizí, pokud vytváříme prvky modelu jako komponenty na místě, což bude v případě historických budov obvyklejší. Potebný je také přenos těchto vztahů skrze formát IFC. Proto je tedy v tomto případě pravdou výhodnost GIS softwaru. Cílovým formátem našeho pracovního postupu je v tuto chvíli ESRI geodatabáze a v rámci ní můžeme vytvářet kromě geometrických tříd, obsahujících v našem případě architektonické prvky modelu, také třídy vztahů (relationship classes). Pomocí volby vhodných atributů a tvorby tříd vztahů je proto možné definovat vzájemné a hierarchické vztahy mezi objekty modelu. Ve vzorovém modelu nebylo zatím uvedené realizováno, ale je v rámci možností použitých nástrojů a bude předmětem dalšího výzkumu.

Správu popisných informací nabízí jak BIM, tak GIS software. Výhodou uložení modelu v prostorové databázi GIS je ale definice libovolných atributů různých předem definovaných datových typů, což je pro ukládání různorodých informací o historických objektech zásadní. Ke každému prvku modelu lze přidávat a dále prohlížet

kromě popisných informací další dokumenty, jako jsou např. fotografie, výkresy a náčrtky detailů, audio obsah nebo textové dokumenty ve formátu PDF (v námi používaném softwaru ESRI buď jako *přílohy* (attachments) nebo v případě obrázků také přímo jako hodnoty atributů v atributové tabulce). V GIS softwaru je dokonce samozřejmostí provádění atributových a prostorových dotazů. Tím je zajištěna funkcionální dle bodů 2, 6 a 7. požadavků na informační systém.

V rámci námi použitého GIS softwaru lze prohlížet výsledný model jak v dvourozměrných pohledech (ArcMap), tak ve třírozměrné vizualizaci (ArcScene, ArcGIS Pro, CityEngine, webové scény). Bezproblémový přenos dat mezi aplikacemi je zajištěn uložením modelu v geodatabázi. Jak ve 2D, tak ve 3D je možné identifikovat jednotlivé prvky modelu a prohlížet tak k nim vztažené atributové informace. K dispozici jsou i funkce pro jednoduché měření délek, ve 2D lze pro takový účel použít opět software ArcMap, ve 3D je tato funkce k dispozici pouze v programu ArcGIS Pro. Vzhledem ke svému zaměření musí GIS umět pracovat i se „4. rozměrem“, tedy s údaji o čase. Jak bylo popsáno výše, vzorový model má údaj o vzniku jednotlivých prvků uložen jako textový atribut, v praxi bude ale zřejmě nejvýhodnější používat dva celočíselné atributy, z nichž jeden bude popisovat dobu vzniku prvku budovy a druhý jeho zánik. Filtrováním elementů je možné pracovat vždy s prvky, které existovaly v určitém bodě v čase. Funkcemi pro prohlížení 2D a 3D dat a možnostmi práce s daty s časovou složkou jsou splněny požadavky z bodů 3 a 5.

Je tedy možné říci, že většinu funkcí, které od informačního systému historické budovy vyžadujeme, BIM model integrovaný v GIS splňuje. V kapitole 4.1 ale můžeme nalézt ještě dva požadavky, jejichž splnění by pouze s pomocí GIS bylo složitější. Jedná se o nástroje pro 3D editaci a funkce pro automatický export dat do podoby výkresové dokumentace. Funkce, které v současné době poskytuje 3D GIS pro editaci dat, jsou vhodné nanejvýš pro posun modelu na odpovídající souřadnicové umístění (u nás v ArcGIS Pro) nebo drobné opravy chybné geometrie (CityEngine), rozhodně je však nemůžeme považovat za dostačující. S tím bylo ostatně počítáno a jedná se o jeden ze závěrů rešeršní části. Chybějící nástroje pro tvorbu 3D modelu proto v pracovním postupu nahrazujeme BIM softwarem. Vytvořený objekt je potom převeden do GIS a zde můžeme naplno využít jeho předností pro správu modelu. Jak ale postupovat, pokud chceme již vytvořený a převedený model upravit? Takový případ může pochopitelně nastat a může k němu dojít i tehdy, když modelujeme již neexistující budovu třeba jen proto, že získáme nový zdroj dat, pomocí kterého model můžeme zpřesnit.

Při tvorbě prototypového modelu byl ze zkušebních důvodů v první fázi modelován pouze exteriér budovy, ten byl převeden do GIS a teprve poté byl v BIM

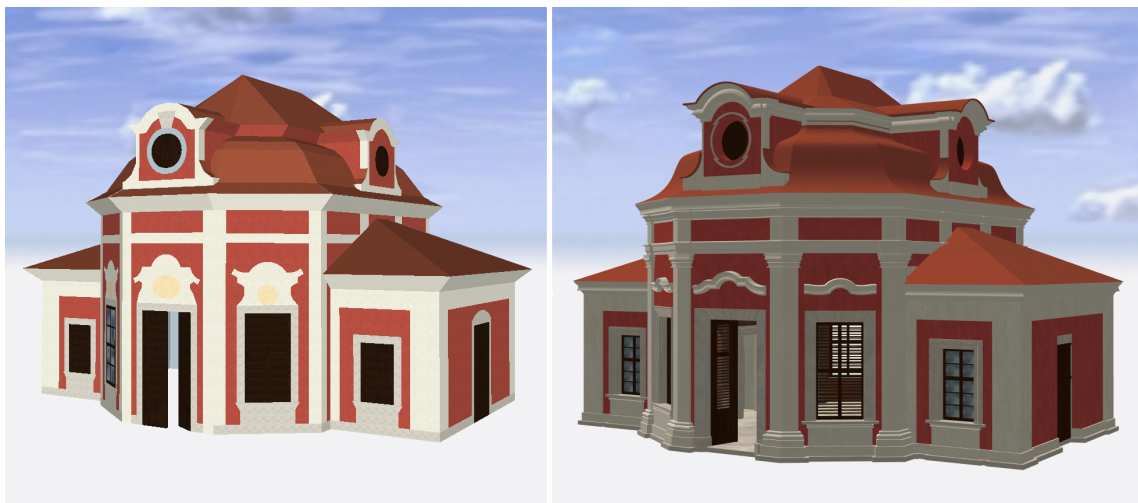
programu domodelován vnitřek budovy a opět importován. Je tedy ověřeno, že model může být postupně vylepšován, přičemž nové prvky jsou převedeny pomocí formátu IFC do GIS, kde jsou zkopírovány do již existujících tříd modelu (kde případně nahradí předchozí verze elementů), dále jsou jim přiděleny atributy a v programu CityEngine jsou texturovány. Zřejmou nevýhodou tohoto postupu je to, že správa změn modelu v geodatabázi je výhradně na uživateli, který musí evidovat, jaké změny provedl v BIM modelovacím nástroji a jaké prvky má tedy opravit na modelu v GIS prostředí. Pozor je třeba dávat také na souřadnicové umístění modelu, aby byly nově vkládané prvky umístěné na správné místo v rámci původního celku. Toho je v našem případě možné dosáhnout buď souřadnicovým umístěním v BIM (sdílené souřadnice v Revitu) nebo v případě alternativního postupu modelování v CAD programu SketchUp vhodným umístěním modelu v lokálních souřadnicích, které usnadní pozdější souřadnicové umístění v GIS (viz 6.2.4 a 6.3.4).

Stejně jako pro 3D modelování, také pro automatizovanou tvorbu výkresové dokumentace z dat modelu je v současné době vhodnější využít BIM software, který by v ideálním případě měl být schopen generovat výkresy s minimálním zásahem uživatele. Je tedy možné říci, že v rámci prezentovaného postupu existují nástroje, které společně zajišťují veškerou požadovanou funkcionalitu představenou v rešeršní části. Ideově je přitom přístup počítající s využitím konkrétních předností většího množství softwarových nástrojů v souladu se závěry nalezených vědeckých prací. Na druhou stranu ale samozřejmě v případě využívání většího množství programů musíme čelit problémům se zajištěním konzistence dat a to zejména mezi BIM a GIS softwarem, protože v rámci GIS části postupu pracujeme stále s jedním modelem v geodatabázi. Také toto je tedy jedna s příležitostmi k dalšímu výzkumu, který by měl být v tomto ohledu zaměřen zejména na zjednodušení převodu modelu upraveného na novou verzi v BIM do georeferencovaného protějšku v GIS. Částečně přitom zřejmě tento problém bude řešit postupná narůstající kompatibilita BIM a GIS, tedy zlepšující se funkce pro souřadnicové umístění v BIM a naopak podpora novějších verzí IFC ze strany GIS produktů.

7.3 Rozdílné přístupy k 3D modelování

V posledních letech je tvorba 3D modelů památkových objektů poměrně módní záležitostí a trojrozměrnou vizualizaci lze nalézt také pro celou řadu historických budov na našem území. Jedná se většinou o modely hradů či zámků vytvořené běžným ručním 3D modelováním a to zejména v programu SketchUp, kde navazují na tradici modelů vzniklých pro 3D glóbus Google Earth. Stejným způsobem byly ostatně

modelovány i významné budovy prezentované později v rámci procedurálně generovaných 3D scén jako součást projektu NAKI „Historický fotografický materiál“, popsaného v kapitole 5. V tomto projektu vznikly i modely budov v areálu zámku Mnichovo Hradiště včetně barokní sala terreny (ještě klasickým přístupem modelování pouze viditelných ploch), která následně sloužila jako prototypový objekt pro testování pracovního postupu tvorby informačního modelu historické budovy. Díky tomu máme k dispozici dva 3D modely téhož památkového objektu vytvořené s různou podrobností a různým přístupem a můžeme tak srovnat časovou náročnost modelování a zejména vlastnosti obou modelů. Tím vynikne zásadní odlišnost informačního modelování budov od klasické 3D vizualizace.



Obr. 7.2: Srovnání 3D modelů vzorového objektu vytvořených různými postupy

Porovnání obou modelů je vidět na obrázku 7.2. Z obrázků je na první pohled patrná různá úroveň detailu obou modelů, hlavní odlišnosti ale pouhý pohled na obrázky neodhalí. Pojďme tedy nyní srovnat oba modely více do hloubky.

Model vlevo byl vytvořen v programu SketchUp a následně pro účely vizualizace exportován do formátu KMZ. Modelování probíhalo klasicky a byl tedy přitom brán zřetel pouze na viditelné plochy exteriéru předlohy. Jedná se tak vlastně pouze o schématický vnější plášť budovy, který je v souladu se způsobem ukládání geometrie ve SketchUpu a formátu KMZ uložen pouze pomocí svých hranic, tedy jako jednotlivé body, hrany a plochy. V rámci výsledného modelu tak není možné identifikovat jednotlivé konstrukční prvky a atributové informace tak může nést pouze budova jako celek. Proto může model sloužit pouze pro účely vizualizace a nemělo velký smysl přidávat do něj výrazně větší detail. Dosažená úroveň podrobnosti byla proto zvolena tak, aby odpovídala dalším modelům v areálu zámku a procedurálně

generovanému okolí a s ohledem na rozumnou časovou náročnost modelování. Model je tak vhodný spíše k prohlížení v menším měřítku v rámci výsledné 3D scény. Vytvořit kompletní model včetně texturování trvalo pouze 8,5 hodiny, soubor KMZ má velikost 173 kB.

Naproti tomu model vpravo byl modelován výše popsaným pracovním postupem s využitím BIM programu Revit a následně převeden do ESRI geodatabáze. BIM přístup je založen na skládání modelu z architektonických komponent a vede tedy uživatele od začátku k rozdělování modelu na funkční prvky. Ty jsou přitom vytvářeny jako objemové modely a jsou ukládány implicitně na základě parametrů. Tento způsob uložení geometrie se sice převodem do GIS ztratí a v geodatabázi je model uložen opět pomocí reprezentace hranic. Důležité ale je, že jsou v modelu pomocí svých hranic reprezentovány jednotlivé prvky a geometrie každého architektonického elementu je nezávislá na prvcích ostatních. Pokud tedy máme dva sousední architektonické elementy, budou oba kompletně ohraničeny „vlastními“ plochami a v místech, kde se dotýkají budou tedy definovány dvě samostatné plochy. Rozdělení na elementy tedy zůstává i v GIS prostředí a můžeme tak identifikovat jednotlivé části modelu a přidělovat jim sémantické informace. Uvedený přístup k modelování přirozeně vede k většímu zachycování detailu a protože není modelován pouze vnější plášť ale objemové modely ohraničujících stěn a stropů, přechází postupně modelování i do interiéru. Výsledek tak je možné prohlížet ve velkém přiblížení a kromě vizuálního vjemu lze dotazovat komponenty na atributové informace a při vhodně navrženém modelu provádět i další analýzy na základě atributů a prostorové informace. Větší důraz na detail a strukturování modelu samozřejmě přináší větší časovou náročnost. Celkově tvorba modelu zabrala 135 hodin, z toho 95 hodin připadá na samotné modelování v BIM, zbylých 40 hodin potom trval import do GIS, texturování a úpravu tříd a atributů. Výsledná geodatabáze zabere 78 MB na disku, webová scéna exportovaná pro účely vizualizace potom 6,8 MB.

Je tedy patrné, že oba modely se výrazně liší svými vlastnostmi a také časovou náročností jejich tvorby. Je jasné, že uvedený příklad je poměrně extrémní, protože je porovnáván velmi jednoduchý model určený pro vizualizaci v malém měřítku/přiblížení a informační model s detailně zpracovanou geometrií. V praxi by samozřejmě i klasický 3D model mohl být vytvořen výrazně detailněji a naopak i informační model budovy může zachycovat předlohu schematičtěji s větším důrazem na atributové informace a doplňující podklady. Přesto však lze prohlásit, že pokud budeme 3D rekonstrukci historické budovy zpracovávat na základě pravidel informačního modelování budov a pracovního postupu představeného v této práci, musíme počítat s výrazně větší časovou dotací nutnou pro modelování samotné i pro vyhledávání

a studium dostupných podkladů. Odměnou za větší úsilí bude podrobnější mnohostranně využitelný model, který kromě vzhledu objektu umožní lépe pochopit i jeho vnitřní strukturu a stavební vývoj.

7.4 Přínosy navrhovaného postupu

V kapitole 2 byly představeny příbuzné práce zabývající se informačním modelováním historických budov. Porovnejme nyní výstupy těchto prací s navrhovaným pracovním postupem. První skupinu tvoří snahy zaměřené na 3D modelování, kde je většinou hlavním cílem rekonstrukce předlohy na základě mračen bodů vzniklých laserovým skenováním nebo digitální fotogrammetrií [35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43]. Tyto práce popisují zejména tvorbu knihoven modelů stavebních prvků pro převod nestrukturovaného mračen bodů do podoby parametrického 3D modelu. Náš pracovní postup je naproti tomu založen na využití již existující 2D výkresové dokumentace. Tím je podobný spíše pracem [34, 44, 45, 46, 47], přičemž přidává zpracování výkresové dokumentace metodami digitální kartografie a to nejen situací a půdorysů, ale také pohledů a řezů, což umožňuje lepší orientaci v modelu již na základě georeferencovaných výkresů. Když srovnáme přednosti obou přístupů, je jasné, že modelování na základě mračen bodů je výrazně přesnější a umožňuje věrně zachytit trojrozměrnou strukturu předlohy i tam, kde již dvourozměrné výkresy nedostačují. Na druhou stranu takový přístup pochopitelně neumožňuje rekonstrukci historického stavu budov nebo dokonce již zaniklých objektů. V takovém případě je využití archivní plánové dokumentace jedinou možností. Stejně tak je náš přístup výhodný, pokud modelujeme budovu, u které byla 2D dokumentace již vyhotovena pro jiný účel a bylo by zbytečné a neekonomické provádět nové zaměření.

Pokračujme nyní k převodu vytvořeného parametrického 3D modelu do GIS prostředí. Některé na tuto problematiku zaměřené práce využívají jako prostředníka 3D GIS formát CityGML [48, 49, 50]. Oproti tomu náš postup počítá s BIM standardem IFC. Z kvalitativního hlediska se jedná o srovnatelná řešení, na druhou stranu je možné říci, že je pro informační modelování budov v současné době zřejmě výhodnější druhý jmenovaný přístup. Hlavním důvodem je reprezentace geometrie, názorně je problém ukázán na obrázku 1.7. Zatímco CityGML popisuje model pomocí ohraničujících ploch (a například i vnější a vnitřní plochy jednotlivých stěn jsou různými prvky), v IFC odpovídají objekty funkčním celkům ve skutečné budově. Ačkoliv po převodu do GIS nutně stejně dojde k degradaci geometrie na reprezentaci hranic (B-Rep), jednotlivé funkční celky (stěny, ozdobné prvky, okna, dveře. . .) jsou stále představovány vždy jedním prvkem v databázi nezávislým na ostatních (např.

bez společných ploch). To je zásadní pro následné přiřazování a správu informací o jednotlivých objektech.

Nejblíže navrhovanému postupu jsou práce [46, 47, 52]. Všechny tyto práce využívají pro přenos hotového modelu do prostorové databáze formát IFC, přičemž první dvě jsou také založeny na využití dvourozměrných výkresů jako podkladů. Náš pracovní postup přidává důraz na fotorealistické texturování, které je důležité pro vizualizaci výsledného modelu. Texturování je třeba provádět až v GIS prostředí vzhledem k problematickému přenosu textur prostřednictvím IFC. Navíc bylo v kapitole 6.2.4 představeno modelování s využitím levnější alternativy – softwaru Trimble SketchUp. Přitom je při vhodně zvoleném postupu zachováno rozdělení modelu do samostatně stojících prvků a možnost přesnějšího souřadnicového umístění. Poslední přínos potom odlišuje náš postup od všech nalezených prací uvažujících informační modelování budov, neboť spojuje tvorbu jednoduchého informačního modelu s procedurálním modelováním okolní situace na základě mapových podkladů a fotografií. To je přínosné zejména pro rekonstrukci historického stavu zastavěných oblastí a umožňuje zasadit památkový objekt do kontextu okolní zástavby a krajiny. Výsledek je potom možno publikovat jako jednu celkovou webovou scénu včetně podrobného modelu zájmové budovy.

Závěr

V současné době je většinou dokumentace existujících budov vedena ve výkresové formě. Dvourozměrné výkresy přitom obsahují pouze geometrii bez sémantiky, atributových dat a vyjádření vztahů mezi jednotlivými architektonickými prvky, přičemž tyto doplňující informace jsou velmi důležité pro správu historických budov a případně i pro plánování jejich rekonstrukce. V oblasti architektury a stavitelství se sice rychle rozvíjí tvorba sémanticky obohacených modelů budov, nyní používané postupy jsou ale vhodné spíše pro návrh a konstrukci nových staveb. Proto tato disertační práce zkoumala možnosti využití BIM a GIS pro informační modelování historických budov. V souladu s cíly práce navrženými v úvodu byl nejprve prozkoumán vztah BIM a GIS obecně. Popsány byly základní charakteristiky BIM, hlavní standardy v obou oblastech, možné oblasti spolupráce a překážky společného využití. Dále byla provedena rešerše vědeckých prací využívajících postupy z obou odvětví pro informační modelování historických budov. Představena byla také v současné době dostupná softwarová řešení vhodná pro tyto účely. Hlavním výstupem z práce jsou potom dva pracovní postupy, navržené na základě komplexní rešerše světových vědeckých publikací a softwarových řešení, které se snaží vhodně zkombinovat nástroje z obou odvětví tak, aby byly maximálně využity přednosti jednotlivých konkrétních programů. Lze tedy říci, že cíle vytyčené v úvodu byly splněny.

Stěžejní pracovní postup prezentovaný v kapitole 6 je zaměřen na 3D rekonstrukci historického objektu na základě výkresové dokumentace a využívá BIM software pro 3D modelování a GIS nástroje pro obohacení modelu atributy, texturování, správu výsledku v prostorové databázi a jeho vizualizace na webu. Druhý pracovní postup prezentovaný v kapitole 5 je zaměřen na časově úspornou 3D rekonstrukci krajiny a zástavby v okolí významných historických budov a využívá kombinaci CAD nástrojů a procedurálního modelování. Jako podkladová data pro tento postup jsou použity digitální modely terénu a archivní či současné mapové podklady. Kombinací obou postupů je možné vytvářet vizualizace zastavěných oblastí s různou úrovní podrobnosti jednotlivých budov. To v praxi znamená, že běžná zástavba je reprezentována procedurálně vytvořenými modely s jednoduchými základními atributy (např. spalnost či nespalnost budov), významnější objekty jsou vytvořeny v jednoduchém CAD nástroji a jejich virtuální modely obsahují stručné informace o předloze a její historii. Nakonec nejcennější památky jsou jednoduchými informačními modely s původem v BIM, které jsou strukturovány dle použitých architektonických elementů a v rámci vizualizace je tedy na atributy dotazovatelný každý takový prvek.

Celý postup byl testován na vzorovém modelu významné barokní památky a jednotlivé kroky tvorby tohoto prototypu byly v práci také dokumentovány a mohou

sloužit jako podrobnější návod pro další využití postupu. Vzhledem k charakteru předpokládaných vstupních dat (existující 2D výkresy) je postup využitelný jak pro modelování současného vzhladu památkových objektů a jejich okolí, tak pro rekonstrukci stavu historického na základě starých map a plánů nebo při dostatku podkladových dat i pro tvorbu modelů již zaniklých budov. Modely přitom nejsou omezeny na konkrétní úroveň podrobnosti nebo měřítko a pracovní postup je tedy využitelný pro podrobné modely, které budou rozděleny na jednotlivé architektonické elementy i na modely rozsáhlejších objektů, u nichž je třeba spravovat informace o větších funkčních celcích.

Je možné říci, že kompletní kombinace pracovních postupů a uvedené komplexní spojení BIM, GIS a procedurálního modelování pro tvorbu 3D scén jsou na základě rešerše v současné době ojedinělé. Přínos práce ale leží také obecně v prozkoumání možností výměny dat mezi jednotlivými použitými BIM a GIS nástroji, což bude s rozvojem informačního modelování budov ve stavebnictví stále důležitějším tématem, protože geografické informační systémy budou významným nástrojem pro posuzování nově navrhovaných stejně jako již existujících budov v širším geoprostorovém kontextu.

Popisovaná kombinace softwarových nástrojů v podstatě splňuje požadavky, které byly formulovány v rešeršní části. Na druhou stranu rozhodně existují záležitosti, které by měly být dále vylepšeny. Prvním tématem pro další výzkum je nahrazení alespoň části použitých programů levnějšími alternativami, s čímž souvisí otázka zpřístupnění výsledných dat dalším uživatelům bez nutnosti vlastnit nákladné programové vybavení. Modelovací část by tak mohla být při dodržení vhodného postupu realizována v dostupném CAD programu SketchUp, což již bylo též testováno, naopak výsledek by mohl být exportován z ESRI geodatabáze do formátu CityGML. Výhledově by bylo možné prozkoumat možnosti webové vizualizace s využitím open-source digitálních glóbulů, jako je například Cesium. Zásadní je také studium pokročilejších možností aktualizace modelu v GIS prostředí po provedení změn v BIM a obecně také komunikace BIM a GIS pro potřeby zpětného generování výkresové dokumentace z modelu. V postupu procedurálního modelování okolní krajiny by bylo vhodné zpřesnit soubory pravidel pro dosažení kvalitnějších a přitom hodnověrných výstupů. Pozornost je třeba věnovat také novým technologiím webové prezentace, které umožní vizualizovat větší území bez nutnosti zdlouhavého načítání kompletních 3D scén naráz ještě před jejich zobrazením.

Použité zdroje

- [1] ČERNÝ, Martin a kolektiv autorů. *BIM příručka*. Praha: Odborná rada pro BIM o.s., 2013. ISBN 978-80-260-5296-8.
- [2] MATĚJKA, Petr. *Přednášky předmětu BIM – Informační modelování*. 2014. ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra ekonomiky a řízení ve stavebnictví. Dostupné z: <http://k126.fsv.cvut.cz/?p=45&cid=89>
- [3] ČERNÝ, Martin. *GIS analýzy v prostředí informačních modelů staveb*. Brno, 2014. 112 s., 4 s. příl. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie. Vedoucí práce doc. RNDr. Lubomil Pospíšil, CSc..
- [4] ISIKDAG, Umit, Ghassan AOUAD, Jason UNDERWOOD a Song WU. Building information models: a review on storage and exchange mechanisms. *Bringing ITC Knowledge to Work*. 2007. Dostupné z: <http://itc.scix.net/data/works/att/w78-2007-020-068b-Isikdag.pdf>
- [5] ZLATANOVA, S., J. STOTER, U. ISIKDAG. *Standards for Exchange and Storage of 3D Information: Challenges and Opportunities for Emergency Response*. 22. červen 2012. Dostupné z: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:a7d1e4a4-3155-43ce-81d4-6ad6cfc26617>
- [6] DONKERS, S. *Automatic generation of CityGML LoD3 building models from IFC models*. 2013. Delft University of Technology. Dostupné z: <http://oatd.org/oatd/record?record=oai%5C:tudelft.nl%5C:uuid%5C:31380219-f8e8-4c66-a2dc-548c3680bb8d>
- [7] OPEN GEOSPATIAL CONSORTIUM. *City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard*, version: 2.0.0. 2012. Dostupné z: <http://www.opengis.net/spec/citygml/2.0>
- [8] KOLBE, Thomas H., Gerhard GRÖGER a Lutz PLÜMER. CityGML: Interoperable Access to 3D City Models. In: Peter VAN OOSTEROM, Siyka ZLATANOVA a Elfriede M. FENDEL, ed. *Geo-information for Disaster Management*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005, s. 883 – 899. ISBN 978-3-540-24988-7. Dostupné z: doi:10.1007/3-540-27468-5_63
- [9] KOLBE, Thomas H. Representing and Exchanging 3D City Models with CityGML. In: Jiyeong LEE a Sisi ZLATANOVA, ed. *3D Geo-Information Sciences*. Springer Berlin Heidelberg, 2009, Lecture Notes in Geoinformation and

- Cartography, s. 15 – 31. ISBN 978-3-540-87395-2. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-540-87395-2_2
- [10] KOLBE, T. H. a G. GRÖGER. Towards unified 3D city models. In: *Proc. of the ISPRS Comm. IV Joint Workshop on Challenges in Geospatial Analysis*. 2004. Dostupné z: <http://mediatum.ub.tum.de/doc/1145769/1145769.pdf>
- [11] NAGEL, Claus a Thomas H. KOLBE. Internationale Standardisierung und Verbreitung von CityGML. 2010. Dostupné z: http://www.3d-stadtmodelle.org/3d-stadtmodelleq_2010/14_Nagel_CityGML_international.pdf
- [12] CZERWINSKI, Angela, Thomas H. KOLBE, Lutz PLÜMER a Elke STÖCKER-MEIER. Spatial data infrastructure techniques for flexible noise mapping strategies. In: *Proc. of the 20th International Conference on Environmental Informatics-Managing Environmental Knowledge. Graz*. 2006. Dostupné z: <http://enviroinfo.eu/sites/default/files/pdfs/vol114/0099.pdf>
- [13] SCHULTE, C., COORS, V.: Development of a CityGML ADE for dynamic 3D flood information. 2009.
- [14] BLEIFUSS, Rosina, Andreas DONAUBAUER, Jan LIEBSCHER a Markus SEITL. Entwicklung einer CityGML-Erweiterung für das Facility Management am Beispiel Landeshauptstadt München. In: *Symposium angewandte Geoinformatik (AGIT)*. 2009.
- [15] LAAT, Ruben de a Léon van BERLO. Integration of BIM and GIS: The Development of the CityGML GeoBIM Extension. In: Thomas H. KOLBE, Gerhard KÖNIG a Claus NAGEL, ed. *Advances in 3D Geo-Information Sciences*. Springer Berlin Heidelberg, 2011, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, s. 211 – 225. ISBN 978-3-642-12669-7. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-642-12670-3_13
- [16] BECKER, T., C. NAGEL a T. H. KOLBE. Integrated 3D modeling of multi-utility networks and their interdependencies for critical infrastructure analysis. In: *Advances in 3D Geo-Information Sciences*. Springer, 2011, s. 1 – 20. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-642-12670-3_1
- [17] ÇAGDAŞ, Volkan. An Application Domain Extension to CityGML for immovable property taxation: A Turkish case study. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2013, roč. 21, s. 545 – 555. ISSN 0303-2434. Dostupné z: doi:10.1016/j.jag.2012.07.013

- [18] LOGOTHETIS, S., A. DELINASIOU a E. STYLIANIDIS. Building Information Modelling for Cultural Heritage: A review. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2015, roč. II, č. 5, s. 177 – 183. ISSN 2194-9042. Dostupné z: doi:10.5194/isprsannals-II-5-W3-177-2015
- [19] FOXE, David M. Building Information Modeling for Constructing the Past and Its Future. *APT Bulletin*. 2010, roč. 41, č. 4, s. 39 – 45. ISSN 0848-8525.
- [20] TOBIÁŠ, Pavel. An Investigation into the Possibilities of BIM and GIS Cooperation and Utilization of GIS in the BIM Process. *Geoinformatics FCE CTU*. 2015, 14(1), 65 – 78. ISSN 1802-2669. Dostupné z: doi:10.14311/gi.14.1.5
- [21] HIJAZI, Ihab, Manfred EHLERS, Sisi ZLATANOVA a Umit ISIKDAG. IFC to CityGML transformation framework for geo-analysis: a water utility network case. In: *3D GeoInfo, Proceedings of the 4th International Workshop on 3D Geo-Information, Ghent: Ghent University*. Citeseer, 2009, s. 123 – 127.
- [22] HIJAZI, I., M. EHLERS a S. ZLATANOVA. Bim for geo-analysis (BIM4GEOA): Set up of 3D information system with open source software and open specification (OS). *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. 2010, roč. 38, č. 4, s. 45 – 49. ISSN 1574-0846.
- [23] ISIKDAG, Umit, Jason UNDERWOOD a Ghassan AOUAD. An investigation into the applicability of building information models in geospatial environment in support of site selection and fire response management processes. *Advanced Engineering Informatics*. 2008, roč. 22, č. 4, PLM Challenges, s. 504 – 519. ISSN 1474-0346. Dostupné z: doi:10.1016/j.aei.2008.06.001
- [24] ISIKDAG, U., J. UNDERWOOD, G. AOUAD a N. TRODD. Investigating the role of building information models as a part of an integrated data layer: A fire response management case. *Architectural Engineering and Design Management*. 2007, roč. 3, č. 2, s. 124 – 142. ISSN 1752-7589.
- [25] ISIKDAG, U., S. ZLATANOVA a J. UNDERWOOD. A BIM-Oriented Model for supporting indoor navigation requirements. *COMPUTERS ENVIRONMENT AND URBAN SYSTEMS*. 2013, roč. 41, s. 112 – 123. ISSN 0198-9715. Dostupné z: doi:10.1016/j.compenvurbsys.2013.05.001
- [26] BENNER, J., A. GEIGER a K. LEINEMANN. Flexible generation of semantic 3D building models. In: *Proceedings of the 1st international workshop on next*

- generation 3D city models, Bonn.* 2005, s. 17 – 22. Dostupné z: http://iai-typo3.iai.fzk.de/www-extern-kit/fileadmin/Image_Archive/Bauwerke/Geo-Informationssysteme/Veroeffentlichungen/NextGeneration3DCityModels.pdf
- [27] WANG, Jun, Lei HOU, Heap-Yih CHONG, Xin LIU, Xiangyu WANG a Jun GUO. A Cooperative System of GIS and BIM for Traffic Planning: A High-Rise Building Case Study. In: Yuhua LUO, ed. *Cooperative Design, Visualization, and Engineering*. Springer International Publishing, 2014, Lecture Notes in Computer Science, 8683, s. 143 – 150. ISBN 978-3-319-10831-5. Dostupné z: [doi:10.1007/978-3-319-10831-5_20](https://doi.org/10.1007/978-3-319-10831-5_20)
- [28] BANSAL, V. K. Application of geographic information systems in construction safety planning. *International Journal of Project Management*. 2011, roč. 29, č. 1, s. 66 – 77. ISSN 0263-7863. Dostupné z: [doi:10.1016/j.ijproman.2010.01.007](https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2010.01.007)
- [29] BORRMANN, A. From GIS to BIM and back again – A Spatial Query Language for 3D building models and 3D city models. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences – ISPRS Archives*. 2010, roč. 38, č. 4, s. 19 – 26. ISSN 1574-0846.
- [30] BORRMANN, André a Ernst RANK. Topological analysis of 3D building models using a spatial query language. *Advanced Engineering Informatics*. 2009, roč. 23, č. 4, s. 370 – 385. ISSN 1474-0346. Dostupné z: [doi: 10.1016/j.aei.2009.06.001](https://doi.org/10.1016/j.aei.2009.06.001)
- [31] ISIKDAG, Umit a Sisi ZLATANOVA. Towards defining a framework for automatic generation of buildings in CityGML using building information models. In: *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*. 2009, s. 79 – 96. ISBN 978-3-540-87394-5. Dostupné z: [doi:10.1007/978-3-540-87395-2_6](https://doi.org/10.1007/978-3-540-87395-2_6)
- [32] TOBIÁŠ, Pavel. BIM, GIS and semantic models of cultural heritage buildings. *Geoinformatics FCE CTU*. 2016, 15(2), 27 – 42. ISSN 1802-2669. Dostupné z: [doi:10.14311/gi.15.2.3](https://doi.org/10.14311/gi.15.2.3)
- [33] LÓPEZ, Facundo José, Pedro M. LERONES, José LLAMAS, Jaime GÓMEZ-GARCÍA-BERMEJO a Eduardo ZALAMA. A Review of Heritage Building Information Modeling (H-BIM). *Multimodal Technologies and Interaction*. 2018, 2(2), 21. Dostupné z: [doi:10.3390/mti2020021](https://doi.org/10.3390/mti2020021)
- [34] SAYGI, G. a F. REMONDINO. Management of Architectural Heritage Information in BIM and GIS: State-of-the-art and Future Perspectives. *International Journal of Heritage in the Digital Era*. 2013, roč. 2, č. 4, s. 695 – 714. ISSN 2047-4970. Dostupné z: [doi: 10.1260/2047-4970.2.4.695](https://doi.org/10.1260/2047-4970.2.4.695)

- [35] FAI, Stephen, Katie GRAHAM, Todd DUCKWORTH, Nevil WOOD a Ramtin ATTAR. Building Information Modeling and Heritage Documentation. In: *XXIII CIPA International Symposium, Prague, Czech Republic*, 12th- 16th September. 2011.
- [36] MURPHY, Maurice, Eugene MCGOVERN a Sara PAVIA. Historic building information modelling (HBIM). *Structural Survey*. 2009, roč. 27, č. 4, s. 311 – 327. ISSN 0263-080X. Dostupné z: doi:10.1108/02630800910985108
- [37] MURPHY, Maurice, Eugene MCGOVERN a Sara PAVIA. Historic Building Information Modelling – Adding intelligence to laser and image based surveys of European classical architecture. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2013, roč. 76, Terrestrial 3D modelling, s. 89 – 102. ISSN 0924-2716. Dostupné z: doi:10.1016/j.isprsjprs.2012.11.006
- [38] ORENI, D., R. BRUMANA, A. GEORGOPOULOS a B. CUCA. HBIM for Conservation and Management of Built Heritage: Towards a Library of Vaults and Wooden Beam Floors. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2013, roč. II – 5/W1, s. 215 – 221. ISSN 2194-9050. Dostupné z: doi:10.5194/isprsannals-II-5-W1-215-2013
- [39] APOLLONIO, Fabrizio Ivan, Marco GAIANI a Zheng SUN. BIM-based Modeling and Data Enrichment of Classical Architectural Buildings. *SCIRES-IT*. 2012, roč. 2, č. 2, s. 41 – 62. ISSN 2239-4303. Dostupné z: doi:10.2423/i22394303v2n2p41
- [40] BRUMANA, Raffaella, Daniela ORENI, Anna RAIMONDI, Andreas GEORGOPOULOS a Angeliki BREGIANNI. From survey to HBIM for documentation, dissemination and management of built heritage: The case study of St. Maria in Scaria d'Intelvi. In: *The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (IEEE) Conference Proceedings*. 2013, s. 497. Dostupné z: doi:10.1109/digitalheritage.2013.6743789
- [41] BAIK, A., A. ALITANY, J. BOEHM a S. ROBSON. Jeddah Historical Building Information Modelling „JHBIM”– Object Library. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2014, roč. II – 5, s. 41 – 47. ISSN 2194-9050. Dostupné z: doi:10.5194/isprsannals-II-5-41-2014
- [42] YAJING, Di a Wu CONG. Research on the Building Information Model of the stone building for heritages conservation with the outer south gate of the Ta Keo Temple as an example. In: *2011 International Conference on Electric*

- Technology and Civil Engineering (ICETCE)*. 2011, s. 1488 – 1491. Dostupné z: doi:10.1109/ICETCE.2011.5776479
- [43] GARAGNANI, Simone. Semantic Building Information Modeling and high definition surveys for Cultural Heritage sites. *DISEGNARECON*. 2012, Special Issue, DoCo 2012, s. 297 – 302.
- [44] SAYGI, G., G. AGUGIARO, M. HAMAMCIOGLU-TURAN a F. REMONDINO. Evaluation of GIS and BIM Roles for the Information Management of Historical Buildings. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2013, roč. II – 5/W1, s. 283 – 288. ISSN 2194-9050. Dostupné z: doi:10.5194/isprsannals-II-5-W1-283-2013
- [45] BOEYKENS, Stefan, Caroline HIMPE a Bob MARTENS. A Case Study of Using BIM in Historical Reconstruction. The Vinohrady Synagogue in Prague. In: *Digital Physicality | Physical Digitality*. eCAADe and CVUT, Faculty of Architecture, 2012, s. 729 – 738. ISBN 978-9-4912070-3-7. Dostupné z: <https://lirias.kuleuven.be/handle/123456789/350340>
- [46] VACCA, G., E. QUAQUERO, D. PILI a M. BRANDOLINI. GIS-HBIM Integration for the Management of Historical Buildings. *ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2018, XLII-2, 1129 – 1135. ISSN 2194-9034. Dostupné z: doi:10.5194/isprs-archives-XLII-2-1129-2018
- [47] MATRONE, F., E. COLUCCI, V. DE RUVO, A. LINGUA a A. SPANO. HBIM in a Semantic 3D GIS Database. *ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2019, XLII-2/W11, 857 – 865. ISSN 2194-9034. Dostupné z: doi:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-857-2019
- [48] DORE, C. a M. MURPHY. Integration of Historic Building Information Modeling (HBIM) and 3D GIS for recording and managing cultural heritage sites. *IEEE*, 2012, s. 369 – 376. ISBN 978-1-4673-2564-6. Dostupné z: doi:10.1109/VSM2012.6365947
- [49] JEDLIČKA, Karel, Otakar ČERBA a Pavel HÁJEK. Creation of Information-Rich 3D Model in Geographic Information System – Case Study at the Castle Kozel. In: *13th SGEM GeoConference on Informatics, Geoinformatics And Remote Sensing*. 2013. Dostupné z: doi:10.5593/sgem2013/bb2.v1/s11.010

- [50] JEDLIČKA, Karel a Pavel HÁJEK. *Large scale virtual geographic environment of the castle Kozel – best practice example*. 2014.
- [51] CENTOFANTI, M., R. CONTINENZA, S. BRUSAPORCI a I. TRIZIO. The architectural information system SIArch3D-univaq for analysis and preservation of architectural heritage. *ISPRS Archives*. 2011, roč. 38, č. 5, s. 9 – 14. ISSN 1682-1750. Dostupné z: doi:10.5194/isprsarchives-XXXVIII-5-W16-9-2011
- [52] ELLUL, Claire, Gareth BOYES, Charles THOMSON a Dietmar BACKES. Towards Integrating BIM and GIS – An End-to-End Example from Point Cloud to Analysis. In: Alias ABDUL-RAHMAN, ed. *Advances in 3D Geoinformation*. Springer International Publishing, 2017, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, s. 495 – 512. ISBN 978-3-319-25691-7. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-25691-7_28
- [53] SAN JOSÉ-ALONSO, J. I., J. FINAT, J. D. PÉREZ-MONEO, J. J. FERNÁNDEZ-MARTÍN a J. MARTÍNEZ-RUBIO. Information and knowledge systems for integrated models in Cultural Heritage. In: *Proceedings of the 3rd ISPRS International Workshop 3D-ARCH 2009*. Citeseer, 2009, s. 5.
- [54] ATTAR, Ramtin, Venk PRABHU, Michael GLUECK a Azam KHAN. 210 King Street: A Dataset for Integrated Performance Assessment. In: *Proceedings of the 2010 Spring Simulation Multiconference*. San Diego, CA, USA: Society for Computer Simulation International, 2010, s. 177:1 – 177:4. SpringSim '10. ISBN 978-1-4503-0069-8. Dostupné z: doi:10.1145/1878537.1878722
- [55] ACHILLE, C., F. FASSI a L. FREGONESE. 4 Years history: From 2D to BIM for CH: The main spire on Milan Cathedral. In: *2012 18th International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM)*. 2012, s. 377 – 382. Dostupné z: doi:10.1109/VSM.2012.6365948
- [56] TOMMASI, C., C. ACHILLE a F. FASSI. From Point Cloud to Bim: a Modeling Challenge in the Cultural Heritage Field. *ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2016, 41B5, 429 – 436. Dostupné z: doi:10.5194/isprs-archives-XLI-B5-429-2016
- [57] CAMPANARO, Danilo Marco, Giacomo LANDESCHI, Nicolás DELL'UNTO a Anne-Marie LEANDER TOUATI. 3D GIS for cultural heritage restoration: A 'white box' workflow. *Journal of Cultural Heritage*. 2016, 18, 321 – 332. ISSN 1296-2074. Dostupné z: doi:10.1016/j.culher.2015.09.006

- [58] POPELKA, Stanislav a Alžběta BRYCHTOVÁ. The historical 3D Map of Lost Olomouc Fortress Creation. In: *Proceedings of the 19th international conference on geography and geoinformatics: challenge for practise and education*. 2012. ISBN 978-80-210-5799-9.
- [59] HÁJEK, Pavel, Karel JEDLIČKA, Martina VICHROVÁ a Radek FIALA. Conceptual approach of information rich 3D model about the Terežín Memorial. *Geoinformatics FCE CTU*. 2013, 11, 49 – 62. ISSN 1802-2669.
- [60] BRŮNA, V., J. CAJTHAML, J. ELZNICOVÁ, J. HAVLÍČEK, A. MÜLLER, PACINA J. a R. ZIMOVÁ. *Paměť krajiny Ústeckého kraje ukrytá v mapových archivech: metody rekonstrukce a zpracování dat v oblastech zaniklých obcí*. 1. vyd. 2015. ISBN 978-80-7414-981-8.
- [61] GATTA, Giorgia, Elisabetta ARIOTI a Gabriele BITELLI. Geomatics science applied to cartographic heritage and archive sources: A new way to explore the XIXth century Gregorian Cadastre of Bologna (Italy), an ante-litteram 3D GIS. *Journal of Cultural Heritage*. 2017, 23, 68 – 76. ISSN 1296-2074. Dostupné z: doi:10.1016/j.culher.2016.06.009
- [62] HAEGLER, Simon, Pascal MÜLLER a Luc Van GOOL. Procedural Modeling for Digital Cultural Heritage. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*. 2009, roč. 2009, č. 1. ISSN 1687-5281. Dostupné z: doi:10.1155/2009/852392
- [63] MÜLLER, Pascal, Peter WONKA, Simon HAEGLER, Andreas ULMER a Luc VAN GOOL. Procedural modeling of buildings. *ACM Transactions on Graphics*. 2006, roč. 25, č. 3, s. 614 – 623. ISSN 0730-0301. Dostupné z: doi:10.1145/1141911.1141931
- [64] MELICHAR, Bořivoj. *Jazyky a překlady*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2003. 2. přepracované vydání. ISBN 80-01-02776-7.
- [65] STINY, George a James GIPS. Shape Grammars and the Generative Specification of Painting and Sculpture. In: *IFIP Congress 71 in Ljubljana, Yugoslavia*. The Best Computer Papers of 1971. 1972, s. 125 – 135. Dostupné z: doi:10.1.1.151.7931
- [66] MERZ, Otakar. *Vytváření formálních popisů budov*. Praha, 2012. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, katedra počítačů. Vedoucí práce: RNDr. Elena Dušková.

- [67] SMELIK, Ruben M., Tim TUTENEL, Rafael BIDARRA a Bedrich BENES. A survey on procedural modelling for virtual worlds. In: *Computer Graphics Forum*. Wiley Online Library, 2014, s. 31 – 50. Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/cgf.12276/full>
- [68] JESUS, Diego, António COELHO a António Augusto SOUSA. Towards Interactive Procedural Modelling of Buildings. In: *Proceedings of the 31st Spring Conference on Computer Graphics*. New York, NY, USA: ACM, 2015, s. 109 – 112. SCCG '15. ISBN 978-1-4503-3693-2. Dostupné z: doi:10.1145/2788539.2788554
- [69] PARISH, Yoav I. H. a Pascal MÜLLER. Procedural Modeling of Cities. In: *Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York, NY, USA: ACM, 2001, s. 301 – 308. SIGGRAPH '01. ISBN 1-58113-374-X. Dostupné z: doi:10.1145/383259.383292
- [70] MULLER, Pascal. Procedural Modeling of Cities. In: *ACM SIGGRAPH 2006 Courses*. New York, NY, USA: ACM, 2006, s. 139 – 184. SIGGRAPH '06. ISBN 1-59593-364-6. Dostupné z: doi:10.1145/1185657.1185716
- [71] WONKA, Peter, Michael WIMMER, François SILLION a William RIBARSKY. Instant Architecture. In: *ACM SIGGRAPH 2003 Papers*. New York, NY, USA: ACM, 2003, s. 669 – 670. SIGGRAPH '03. ISBN 1-58113-709-5. Dostupné z: doi:10.1145/1201775.882324
- [72] EDVARDSSON, Kristinn Nikulás. *3d GIS modeling using ESRI's CityEngine, A case study from the University Jaume I in Castellon de la Plana Spain*. 2013. University Jaume I in Castellon de la Plana Spain.
- [73] SCHWARZ, Michael a Pascal MÜLLER. Advanced Procedural Modeling of Architecture. *ACM Trans. Graph.* 2015, 34(4), 107:1 – 107:12. ISSN 0730-0301. Dostupné z: doi:10.1145/2766956
- [74] CALOGERO, Erica, Jaime KAMINSKI a David ARNOLD. Using procedural modeling to explore alternative designs for the Louvre. *Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)*. 2013, roč. 6, č. 4, s. 1 – 22. ISSN 1556-4673. Dostupné z: doi:10.1145/2532630.2512883
- [75] ESRI R&D CENTER ZURICH. *CityEngine help*. 2021. Dostupné z: <https://doc.arcgis.com/en/cityengine/latest/help/cityengine-help-intro.htm>
- [76] WATSON, B., P. MULLER, P. WONKA, C. SEXTON, O. VERYOVKA a A. FULLER. Procedural Urban Modeling in Practice. *IEEE Computer Graphics*

- and Applications*. 2008, roč. 28, č. 3, s. 18 – 26. ISSN 0272-1716. Dostupné z: doi:10.1109/MCG.2008.58
- [77] RODRIGUES, N., L. MAGALHAES, J. MOURA a A. CHALMERS. Reconstruction and generation of virtual heritage sites. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*. 2014, roč. 1, č. 3 – 4, s. 92 – 102. ISSN 2212-0548. Dostupné z: doi:10.1016/j.daach.2014.06.003
- [78] QUATTRINI, Ramona a Eleonora BALEANI. Theoretical background and historical analysis for 3D reconstruction model. Villa Thiene at Cicogna. *Journal of Cultural Heritage*. 2015, 16(1), 119 – 125. ISSN 1296-2074. Dostupné z: doi:10.1016/j.culher.2014.01.009
- [79] LAYCOCK, R. G., D. DRINKWATER a A. M. DAY. Exploring Cultural Heritage Sites Through Space and Time. *Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)*. 2008, roč. 1, č. 2, s. 11:1 – 11:15. ISSN 1556-4673. Dostupné z: doi:10.1145/1434763.1434768
- [80] LAYCOCK, S. D., P. G. BROWN, R. G. LAYCOCK a A. M. DAY. Aligning archive maps and extracting footprints for analysis of historic urban environments. *Computers & Graphics*. 2011, 35(2), 242 – 249. ISSN 0097-8493. Dostupné z: doi:10.1016/j.cag.2011.01.002
- [81] BELLOTTI, Francesco, Riccardo BERTA, Rosario CARDONA a Alessandro DE GLORIA. An architectural approach to efficient 3D urban modeling. *Computers & Graphics*. 2011, 35(5), 1001 – 1012. ISSN 0097-8493. Dostupné z: doi:10.1016/j.cag.2011.07.004
- [82] PERRIN, Laurent, Nathalie BEAUVAIS a Marta PUPPO. Procedural landscape modeling with geographic information: the IMAGIS approach. *Landscape and Urban Planning*. 2001, 54(1), 33 – 47.
- [83] MACEK, Petr. *Standardní nedestruktivní stavebněhistorický průzkum*. 2. doplněné vyd. Praha: Nakladatelství Jalta, 2001. Příloha časopisu Zprávy památkové péče, roč. 61. Vydavatel: Státní ústav památkové péče v Praze. ISBN 80-86234-22-3. Dostupné z: <http://pamatky-facvut.cz/download/dokumenty/standardni.pdf>
- [84] ČÚZK. *ZABAGED – výškopis – úvod*. 2018. Dostupné z: <http://geoportal.cuzk.cz>

- [85] TOBIÁŠ, Pavel, Jiří CAJTHAML a Jiří KREJČÍ. Rapid reconstruction of historical urban landscape: The surroundings of Czech chateaux and castles. *Journal of Cultural Heritage*. 2018, 30, 1 – 9. ISSN 1296-2074. Dostupné z: doi:10.1016/j.culher.2017.09.020
- [86] TOBIÁŠ, Pavel a Jiří CAJTHAML. Models of cultural heritage buildings in a procedurally generated geospatial environment. *Transactions in GIS*. 2020, 25(2), 1104 – 1122. ISSN 1467-9671. Dostupné z: doi:10.1111/tgis.12727
- [87] SÚRPMO. *Stavebně hist. průzkum města Mnichovo Hradiště*. 1977. Archiv NPÚ ÚOP SČ, inv. č. P 140.
- [88] Autodesk. Autodesk Revit 2017. *Autodesk Knowledge Network*. 2018. Dostupné z: <http://help.autodesk.com/view/RVT/2017/CSY/>
- [89] BIMscape. *The Complete Beginner's Guide to Autodesk Revit Architecture*. 2018. Dostupné z: <http://bimscape.com/beginners-guide-to-revit-architecture/>
- [90] ESRI. *The Multipatch Geometry Type*. An Esri White Paper. 2008. Dostupné z: <https://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/multipatch-geometry-type.pdf>
- [91] buildingSMART. *IFC Specifications*. 2018. Dostupné z: <http://www.buildingsmart-tech.org/specifications>

Seznam obrázků

1.1	Definice BIM dle [1]	14
1.2	Životní cyklus stavby [2]	16
1.3	Možnosti reprezentace geometrie v IFC [6]	19
1.4	Částečný UML diagram IFC [6]	19
1.5	Podrobnost modelu budovy dle různých LOD [7]	22
1.6	Překryt oblastí zájmu geomatiky a architektury podle [6]	26
1.7	Reprezentace geometrie v BIM a 3D GIS [15]	28
2.1	Příklady parametrických objektů z knihovny HBIM [37]	31
2.2	Tvorba a vizualizace 3D modelu na základě mračna bodů [41]	32
2.3	Architektonické elementy rozlišené v modelu dle stavebních etap [40]	34
3.1	Traviny vymodelované pomocí L-systémů (zdroj: Wikipedie)	36
3.2	Chomského koncept bezkontextové gramatiky a její adaptace pro budovu dle Stinyho a Müllera [74]	36
3.3	Tvar, jak je definován v CGA [75]	37
3.4	Příklad rozdělení fasády na části pomocí pravidla pro rozdělení [63]	40
3.5	Příklad rozdělení hrubého objemového modelu na díly [75]	41
3.6	Prostředí pro hru Need for Speed bylo vytvořeno s využitím CGA [76]	42
3.7	Vizualizace projektu Rome Reborn (zdroj: https://www.romereborn.org/)	44
4.1	Úrovně BIM podle [19]	46
4.2	Porovnání možností BIM a GIS [34]	49
4.3	Rozdělení modelu na jednotlivé architektonické komponenty [34]	50
4.4	UML diagram tříd a vztahů mezi komponentami budovy [44]	52
5.1	Postup tvorby 3D webových scén s využitím procedurálního modelování	56
5.2	Vlevo: hodnoty pixelů NoData (černá barva na okraji, ideální případ), vpravo: hodnota NoData interpretovaná při vizualizaci jako nulová výška	59
5.3	3D scéna s texturou na DMT – vpravo rastrový obraz staré mapy a vlevo její vektorová podoba	60
5.4	Jednotlivé vrstvy 3D scény – shora: statický 3D model zámku, proc. generované budovy, proc. generované stromy, polygony vodních ploch, vektorová mapa převedená do rastru jako textura DMT, digitální model terénu	62
5.5	Výňatek z původně používaného souboru pravidel (nahore) a výsledný soubor pravidel (dole)	63
5.6	Příklady 3D scén vzniklých v rámci projektu NAKI „Historický fotografický materiál“	68

6.1	Nástroje pro tvorbu tažené geometrie (Revit, komponenta na místě)	74
6.2	Výkresy v místním systému a jejich překrývání (ArcMap)	80
6.3	Půdorys prvního podlaží vzorového objektu, šrafováním je rozlišen použitý modelovací nástroj	82
6.4	Konstrukce fabionu – postupný ořez dutými tvary	83
6.5	Stropy prostorů v bočních křídélkách vzorového modelu	84
6.6	Tři základní funkce pro tvorbu střech v programu Revit [88]	84
6.7	Vložený obrazový podklad a výsledný zvonovnicový profil střechy	85
6.8	Dva osmiúhelníkové profily a výsledné těleso vzniklé přechodem	85
6.9	Ozdobná římsička vikýře – vzájemně se překrývající střední a boční část	86
6.10	Toskánské pilastry, průběžné kladí a korunní římsa středního objemu	87
6.11	Všechna okna a dveře vzorového modelu s portály a šambránami	88
6.12	Vzorový model – výstup BIM modelování v programu Revit	89
6.13	Úprava klasifikace architektonických elementů po importu do geoda- tabáze	94
6.14	Příprava textur interiéru vzorového modelu v programu SketchUp	97
6.15	Texturovaný model v prostředí ArcScene (skryté podlahy a základ)	98
6.16	Souřadnicově umístěný model v prostředí ArcGIS Pro	99
6.17	Vzorový model ve webové scéně (ukázka identifikace prvků na dolních dvou obrázcích)	101
7.1	Pracovní postup tvorby informačního modelu historické budovy	105
7.2	Srovnání 3D modelů vzorového objektu vytvořených různými postupy	111

Seznam tabulek

1.1	Dostupné nástroje pro informační modelování budov (upraveno z [18])	24
2.1	Současné snahy o modelování historických památek (rozšířeno z [34])	30
4.1	Úrovně rozpracovanosti (LOD) v BIM [1]	46
6.1	Přibl. cena nástrojů v době psaní této práce dle webů výrobce či dodavatele	76
6.2	Verze a pohledy IFC exportovatelné z Revitu a jejich podpora v Arc- Scene	93
6.3	Výsledné atributy všech tříd architektonických elementů v geodatabázi	95

Seznam příloh na CD

1. Text disertační práce ve formátu PDF: `tobias_pavel_2021_disertace.pdf`
2. Teze k disertační práci ve formátu PDF: `tobias_pavel_2021_teze.pdf`
3. Poster ve formátu PDF: `tobias_pavel_2021_poster.pdf`