

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



JERNEJ TEKAVEC

**MODEL RAZVOJA KATASTRA NEPREMIČNIN V
VEČNAMENSKI 3D-KATASTER**

DOKTORSKA DISERTACIJA

INTERDISCIPLINARNI DOKTORSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM
GRAJENO OKOLJE

Ljubljana, 2021

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



Doktorand/ka
JERNEJ TEKAVEC

**MODEL RAZVOJA KATASTRA NEPREMIČNIN V
VEČNAMENSKI 3D-KATASTER**

DOKTORSKA DISERTACIJA

**THE REAL PROPERTY CADASTRE
DEVELOPEMENT MODEL TOWARDS A
MULTIPURPOSE 3D CADASTRE**

DOCTORAL DISSERTATION

Ljubljana, april 2021

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



Mentor/-ica: izr. prof. dr. Anka Lisec.

Poročevalci za oceno doktorske disertacije:

prof. dr. Krištof Oštir,

doc. dr. Mojca Kosmatin Fras,

prof. dr. sc. Miodrag Roić, Univerza v Zagrebu, Fakulteta za geodezijo

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

»Ta stran je namenoma prazna«

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	528.44:332.21:004.942(043)
Avtor:	Jernej Tekavec, univ. dipl. inž. geod.
Mentor:	izr. prof. dr. Anka Lisec
Naslov:	Model razvoja katastra nepremičnin v večnamenski 3D-kataster
Tip dokumenta:	Doktorska disertacija
Obseg in oprema:	76 str., 2 pregl., 24 sl., 5 pril. (171 str.)
Ključne besede:	3D-kataster, podatkovne baze, 3D-analize, stavbe, večnamenski kataster, 3D-modeliranje, navigacija

Izvleček

Družbeni in tehnološki razvoj sta skupaj s procesom urbanizacije privedla do vse intenzivnejše izrabe prostora. Tradicionalni zemljiški katastrski sistemi, ki temeljijo na 2D-modelih prostora, so omejeni glede možnosti modeliranja prostorske opredelitve pravic, omejitev in odgovornosti (angl. *rights, restrictions and responsibilities* – RRR). To še posebej velja za grajeno okolje, kjer se pojavljajo potrebe po vertikalni razdelitvi prostora in 3D-opredelitvi nepremičninskih enot, na katere se nanašajo pravice, omejitve in odgovornosti. Razvoj sodobnih katastrskih sistemov je zato usmerjen v uvajanje 3D-podatkovnih modelov in tehnologij, ki omogočajo učinkovito modeliranje nepremičninskih enot v tako kompleksnem prostoru. Doktorska disertacija je usmerjena v obravnavo tehničnih vidikov razvoja večnamenskih 3D-katastrskih sistemov za stavbe. V okviru naloge smo razvili zasnovo 3D-katastrskega podatkovnega modela, ki je skladen z mednarodnim standardom LADM za področje zemljiške administracije in povezljiv s standardi za prostorske podatke (IFC, CityGML, IndoorGML), s čimer želimo prispevati k širši uporabnosti 3D-katastrskih podatkov. To smo omogočili z opredelitvijo temeljne prostorske enote za modeliranje stavb v obliki notranjega prostora. Na temelju rezultatov analize obstoječih 2D-katastrskih podatkov o stavbah smo preučili možnosti njihove uporabe za 3D-modeliranje skladno z razvitim konceptom. Razvili smo postopke za določitev topoloških odnosov med 3D-geometrijami notranjih prostorov ter opredelili grafe povezljivosti prostorov. Slednje je podatkovna osnova za izvedbo navigacije v notranjosti stavb in drugih lokacijskih storitev. Težavo pomanjkanja obstoječih 3D-katastrskih podatkov odpravljamo s proceduralnim modeliranjem, ki omogoča simulacijo 3D-katastrskih podatkov za večja območja. Na podlagi simuliranih podatkov smo izvedli in ovrednotili izbrane 3D-prostorske analize. Ugotovili smo, da tehnologije za obdelavo, shranjevanje in upravljanje 3D-prostorskih podatkov omogočajo izvedbo številnih rešitev, obenem pa izkazujejo potrebo po dodatnem razvoju in raziskavah, ki bi omogočile uporabo teh tehnologij v katastrskih sistemih. Z raziskavo smo tudi dokazali, da je mogoče ustrezno strukturirane 3D-katastrske podatke uporabiti na področjih zunaj domene zemljiške administracije. Rezultati raziskave tako prinašajo nova spoznanja, ki bodo lahko pomembno prispevala k razvoju večnamenskih 3D-katastrskih sistemov.

»Ta stran je namenoma prazna«

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTAL INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	528.44:332.21:004.942(043)
Author:	Jernej Tekavec, Geod. Eng.
Supervisor:	Assoc. Prof. Anka Lisec, Ph.D.
Title:	The real property cadastre development model towards a multipurpose 3D cadastre
Document type:	Doctoral dissertation
Scope and tools:	76 p., 2 tab., 24 fig., 5 app. (171 p.)
Keywords:	3D cadastre, database, 3D analyses, buildings, multipurpose cadastre, 3D modelling, navigation

Abstract

Societal and technological development, together with rapid urbanisation, has contributed to the growing complexity of land use. Traditional land cadastral systems, based on 2D-models of real property units, have limited capabilities for modelling and spatial delineations of rights, restrictions, and responsibilities (RRR). Particularly in an urban environment, there is an increasing requirement for the vertical delineation of the space and 3D modelling of real property units to which RRRs are related. Therefore, the focus of modern cadastral systems is on the support of the 3D data models and technologies, which enable efficient modelling of complex RRR situations. This doctoral dissertation is focused on the technical aspects of multipurpose 3D cadastral systems and is limited to buildings. First, the concept of a multipurpose 3D cadastral model was developed, following the LADM international standard for land administration domain and linked to standards for spatial data (IFC, CityGML, IndoorGML). This linking enables the usage of 3D-cadastral data in other domains and is possible mainly due to the indoor spaces being the core element of the proposed 3D-cadastral data model. Based on the analysis of the existing 2D cadastral data on buildings, we assessed data usability for 3D modelling based on the developed concept. We developed the process for obtaining the indoor connectivity graph based on the extraction of topological relationships between 3D geometries of indoor spaces aiming to contribute to the multifunctionality of cadastral systems (e.g., for indoor navigation). The lack of 3D cadastral datasets is addressed by procedural modelling, which provides the simulation of large-scale 3D cadastral datasets. The simulated dataset allows the execution and evaluation of 3D spatial analyses. The presented research suggests that the available technologies for 3D spatial data processing, storage, and maintenance already exist and make possible the development of various solutions. However, much research is still needed to enable the operational introduction of 3D cadastre. Our research has also proved that properly structured 3D-cadastral data could be used for applications beyond the land administration domain. This doctoral thesis thus introduces new knowledge that will contribute to the ongoing developments of 3D cadastral systems.

»Ta stran je namenoma prazna«

ZAHVALA

Prva in največja zahvala je namenjena mentorici izr. prof. dr. Anki Lisec.

Hvala za priložnost, da sem se leta 2015 kot sodelavec pridružil Katedri za geoinformatiko in katastre nepremičnin ter tako začel raziskovalno pot.

Hvala za odprtost pri oblikovanju in razvoju idej za raziskave.

Hvala za vse omogočene udeležbe na domačih in mednarodnih konferencah.

Hvala za pomoč pri oblikovanju in pisanju doktorske naloge, člankov in predstavitev na konferencah.

Hvala za neizčrpen optimizem, dobro voljo in podporo.

Hvala najožjima sodelavkama (najprej Barbari, potem se nama je pridružila še Urška), ker sta me in me še vedno prenašata in spodbujata. Hvala tudi vsem ostalim sodelavcem za dobro voljo, pogovore, koristne nasvete, podporo in prijetna druženja.

Velika zasluga, da mi je uspelo priti do tu, kjer sem, gre moji celotni družini. Hvala mami in očetu, da sta moj študij vedno podpirala in vedno zagovarjala pomen znanja. Hvala bratu in sestri za podporo in vse življenjske lekcije.

Zadnja (a še zdaleč ne najmanjša) zahvala gre moji ženi in življenjski sopotnici Nini. Hvala za tvojo brezpogojno podporo in hvala, ker si vedno verjela, da mi bo uspelo.

»Ta stran je namenoma prazna«

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA	I
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMETACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	V
ZAHVALA.....	VII
KAZALO VSEBINE.....	IX
KAZALO SLIK.....	XIII
KAZALO PRILOG.....	XV
LIST OF TABLES	XVI
LIST OF FIGURES	XVII
LIST OF APPENDICES.....	XVIII
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI	XIX
1 UVOD	1
1.1 Raziskovalne hipoteze	5
1.2 Cilji	5
1.3 Struktura disertacije	6
2 PREGLED RAZISKAV.....	9
2.1 Delavnica 3D-katastrov v Delftu	9
2.2 FIG publikacija o 3D-katastrih	10
2.3 Delavnica LADM	13
2.4 Ostale aktualne raziskave	14
3 PROSTOR KOT OSNOVA ZA MODELIRANJE STAVB V 3D-KATASTRU	19
3.1 Ideja in teoretično ozadje.....	19
3.2 Metodologija raziskave.....	19
3.3 Rezultati.....	23

3.4	Razprava	28
3.5	Prispevek k znanosti.....	28
4	KATASTRSKI PODATKI KOT VIR ZA 3D-MODELIRANJE NOTRANJOSTI STAVB.....	31
4.1	Ideja in teoretično ozadje	31
4.2	Metodologija raziskave	32
4.3	Rezultati	33
4.4	Razprava	34
4.5	Prispevek k znanosti.....	35
5	SIMULACIJA PODATKOV 3D-KATASTRA S PROCEDURALNIM MODELIRANJEM	37
5.1	Ideja in teoretično ozadje	37
5.2	Metodologija raziskave	37
5.3	Rezultati	38
5.4	Razprava	40
5.5	Prispevek k znanosti.....	41
6	PRIDOBIVANJE GRAFA POVEZLJIVOSTI NA PODLAGI 3D-GEOMETRIJ Z UPORABO SFCGAL.....	43
6.1	Ideja in teoretično ozadje	43
6.2	Metodologija raziskave	43
6.3	Rezultati	46
6.4	Razprava	48
6.5	Prispevek k znanosti.....	50
7	ZAKLJUČEK	51
7.1	Zaključne ugotovitve.....	51
7.2	Sklepi	55
7.3	Prispevek k znanosti.....	57
7.4	Priložnosti za nadaljnje raziskave	58

8	POVZETEK	61
9	SUMMARY	65
	VIRI	69

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Procesni časi obdelave testnih 3D-katastrskih podatkov.....	47
Preglednica 2: Procesni časi obdelave testnega podatkovnega niza IFC.....	48

KAZALO SLIK

Slika 1: Prehodi med prostori v obliki stikajočih ploskev (zeleno).....	20
Slika 2: Dve nepremičninski enoti (rdeča in zelena) kot skupini prostorsko povezanih prostorov.	20
Slika 3: Različni načini določanja meja nepremičninskih enot v stavbah.....	21
Slika 4: Različne možnosti za potek opredelitve meje nepremičnine po zunanji strani zidu.....	21
Slika 5: Različne velikosti nepremičninskih enot zaradi različne debeline vmesnih sten (meje med nepremičninskimi enotami potekajo po sredini stene).	22
Slika 6: Primer 3D-katastrskega modela stavbe z dodatno vključeno 3D-geometrijo balkona.	23
Slika 7: Konceptualni model 3D-katastra za stavbe.....	24
Slika 8: Povezava predlaganega modela (belo) s konceptualnim modelom standarda LADM (zeleno).	24
Slika 9: SUPB izvedba logičnega model 3D-katastra za stavbe.	25
Slika 10: Razširitev osnovnega logičnega modela, ki omogoča shranjevanje 3D-geometrij z notranjimi luknjami.....	25
Slika 11: Zasnova povezave predlaganega podatkovnega modela s standardi IFC, CityGML in IndoorGML.	27
Slika 12: Splošen UML-diagram aktivnosti za 3D-modeliranje obstoječih 2D-katastrskih podatkov.....	32
Slika 13: 3D-prikaz transformiranih podatkov v obliki 3D-prostorninskih geometrij prostorov in 3D-grafa povezljivosti.	33
Slika 14: Primer etažnega načrta po vzoru načrtov v slovenskem katastru stavb.	34
Slika 15: Prvotna lokacija generiranih 3D-modelov stavb (levo) in lokacija po premiku v izhodišče lokalnega koordinatnega sistema (desno).....	38
Slika 16: Primeri različnih proceduralno generiranih 3D-modelov stavb od enonadstropne in dvonadstropne družinske hiše (1. in 2. vrsta) do več etažnih stavb z mešano rabo (od 3. do 6. vrste). 39	
Slika 17: Koncept integracije in 3D-analitike podatkov na podlagi orodij ETL.....	44
Slika 18: Graf povezljivosti prostorov z rdečimi vozlišči in zelenimi povezavami.	45
Slika 19: Graf povezljivosti prostorov z dodanimi vozlišči na prehodih med prostori.	45
Slika 20: Graf povezljivosti prostorov, pridobljen z metodo NRS-MAT, ki je primeren za načrtovanje poti.	46
Slika 21: Testni 3D-katastrski podatkovni niz, ki obsega štiri 3D-modele prostorov v notranjosti stavb.	46
Slika 22: IFC testni podatkovni niz.....	47
Slika 23: Graf povezljivosti, pridobljen z obdelavo testnega podatkovnega niza IFC z metodo NRS-MAT.....	48

Slika 24: Napake v atributnih podatkih elementa IFC <i>IfcRelSpaceBoundary</i> glede povezanosti elementov <i>IfcSpace</i> in <i>IfcDoor</i>	50
--	----

KAZALO PRILOG

PRILOGA A: Pregled raziskav na področju 3D katastra / A review of research on 3D real property cadastre

PRILOGA B: Indoor space as the basis for modelling of buildings in a 3D Cadastre

PRILOGA C: Cadastral data as a source for 3D indoor modelling

PRILOGA D: Simulating Large-Scale 3D Cadastral Dataset Using Procedural Modelling

PRILOGA E: 3D Geometry-Based Indoor Network Extraction for Navigation Applications Using SFCGAL

LIST OF TABLES

Table 1: Results of processing of the 3D cadastral datasets.....	47
Table 2: Results of processing of the IFC test dataset.....	48

LIST OF FIGURES

Figure 1: The passages between indoor spaces are realised by touching surfaces (green).	20
Figure 2: Two real property units (red and green) represented by groups of spatially linked indoor spaces.	20
Figure 3: Options for real property unit boundary placement.....	21
Figure 4: Different variants of exterior real property boundary placement.	21
Figure 5: Various sizes of legal units, presented in different colours, for the same apartments (boundaries between real property units lie in the middle of the wall).....	22
Figure 6: An example of the building geometry with legal amendment (balcony space).....	23
Figure 7: The concept of the proposed cadastral data model for buildings.....	24
Figure 8: The relation of the proposed cadastral data model (white) and LADM (green) classes.....	24
Figure 9: DBMS implementation of the proposed cadastral data model.	25
Figure 10: DBMS implementation allowing storage of solids with holes.	25
Figure 11: The concept of the integration of the proposed data model with the IFC, CityGML and IndoorGML standards.	27
Figure 12: Generalized UML activity diagram of the proposed framework.....	32
Figure 13: 3D visualization of the transformed data.....	33
Figure 14: Sample document of Slovenian Building Cadastre containing the building floor plan.....	34
Figure 15: Original placement of generated 3D building models (left) and the models after their placement to the local coordinate system origin (right).	38
Figure 16: Examples of the generated buildings ranging from the single-storey family house to multi- storey mixed-use apartment buildings.....	39
Figure 17: The concept of ETL-based data integration and 3D analytics.....	44
Figure 18: Basic node-relation structure (NRS) with red nodes and green connections.....	45
Figure 19: Node-relation structure and entrance (NRSE) navigation network with red nodes and green connections.....	45
Figure 20: The result of the NRS-MAT method – the connectivity graph suitable for path planning..	46
Figure 21: The 3D cadastral datasets.	46
Figure 22: IFC test dataset.	47
Figure 23: Navigation network derived from IFC dataset by applying the NRS-MAT method.....	48
Figure 24: Errors in <i>IfcSpace</i> and <i>IfcDoor</i> (having equal colour) relations retrieved from <i>IfcRelSpaceBoundary</i> entity.....	50

LIST OF APPENDICES

APPENDIX A: Pregled raziskav na področju 3D katastra / A review of research on 3D real property cadastre

APPENDIX B: Indoor space as the basis for modelling of buildings in a 3D Cadastre

APPENDIX C: Cadastral data as a source for 3D indoor modelling

APPENDIX D: Simulating Large-Scale 3D Cadastral Dataset Using Procedural Modelling

APPENDIX E: 3D Geometry-Based Indoor Network Extraction for Navigation Applications Using SFCGAL

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

BIM	Informacijsko modeliranje stavb (angl. <i>Building Information Modelling</i>)
ETL	<i>Extract Transform Load</i> (angl.)
FIG	Mednarodna zveza geodetov (fran. <i>Fédération Internationale des Géomètres</i>)
GIS	Geografski informacijski sistem
GML	Označevalni jezik za prostorske podatke (angl. <i>Geography Markup Language</i>)
IFC	<i>Industry Foundation Classes</i> (angl.)
INSPIRE	Infrastruktura za prostorske informacije v Evropi (angl. <i>Infrastructure for spatial information in Europe</i>)
ISO	Mednarodna organizacija za standardizacijo (angl. <i>International Organization for Standardization</i>)
LADM	Model področja zemljiške administracije (angl. <i>Land Administration Domain Model</i>)
LOD	Stopnja podrobnosti (angl. <i>Level of Detail</i>)
OGC	<i>Open Geospatial Consortium</i> (angl.)
RRR	Pravice, omejitve in odgovornosti (angl. <i>Rights, Restrictions and Responsibilities</i>)
SQL	Strukturiran poizvedovalni jezik (angl. <i>Structured Query Language</i>)
SUPB	Sistem za upravljanje podatkovne baze (angl. <i>Database Management System – DBMS</i>)
UML	Standardni jezik za modeliranje (angl. <i>Unified Modelling Language</i>)
XML	Razširjeni označevalni jezik (angl. <i>eXtensible Modelling Language</i>)

»Ta stran je namenoma prazna«

1 UVOD

Prostor, v katerem živimo, opredeljujejo najmanj tri prostorske razsežnosti. Človekovo dojetanje prostora na Zemlji se pogosto deli na horizontalno in vertikalno komponento, ki ju opredeljuje smer težnosti. Z vidika obvladovanja prostora, s tem pa tudi z vidika modeliranja prostora v obliki zemljevidov, je bila v preteklosti človeku in družbi veliko pomembnejša horizontalna razsežnost prostora, ki je bila podlaga za številne vrste razdelitve prostora v obliki držav, regij, občin ter drugih območij upravljanja. Slednje velja tudi za sisteme katastrov zemljišč oziroma nepremičnin, ki so izrednega pomena za upravljanje zemljišč in širše prostora. Delno lahko razlog za modeliranje prostora v dveh razsežnostih iščemo v omejenih tehnoloških rešitvah v preteklosti. Razvoj sodobnih geoinformacijskih tehnologij pa je v zadnjih dveh desetletjih omogočil učinkovito opisovanje in modeliranje prostora v treh razsežnostih.

Modeliranje kompleksnega naravnega grajenega okolja v prostorskih informacijskih sistemih prinaša mnogo znanstvenih in razvojnih izzivov na mednarodni ravni (Lee in Zlatanova, 2009; Kolbe in sod., 2011; Abdul-Rahman, 2016). Eden od njih je vse večja težavnost evidentiranja lastništva in drugih pravnih dejstev na nepremičninah na podlagi tradicionalnih pristopov, ki temeljijo na 2D-podatkovnih modelih (Stoter, 2004; Paulsson, 2007; Aien, 2013; Drobež, 2016). Pridobivanje in vzdrževanje prostorskih podatkov za zagotavljanje kakovostnih nepremičninskih evidenc je pomembna dejavnost vsake države. V zadnjih letih se v povezavi z navedenim uvaja trend podatkovno bogatih, večnamenskih nepremičninskih evidenc, ki poleg osnovnega davčno-pravnega namena služijo tudi drugim potrebam. Vsekakor pa je velik izziv, kako postopoma razviti oziroma nadgraditi obstoječe 2D-katastrske sisteme.

Katastrski sistemi imajo v različnih državah zelo raznoliko zgodovino. Razvoj katastrov je na eni strani sledil družbenim potrebam po obvladovanju prostora in upravljanju zemljišč, na drugi strani pa je bil močno zaznamovan z razvojem tehnologij merjenja in opisovanja prostora. Razvoj tehnologij za zajem, obdelavo in prikazovanje prostorskih podatkov, vključno z razvojem računalništva in informatike, je v devetdesetih letih preteklega stoletja sprožil prva realna razmišljanja in raziskave glede uvedbe tretje razsežnosti oziroma tretje dimenzije v katastrske sisteme (Kaufmann, 1998; Stoter, 2000), za kar se je uveljavil izraz 3D-kataster. Pomembna prelomnica je prva delavnica na temo 3D-katastrov pod okriljem mednarodne zveze geodetov FIG (fran. *Fédération Internationale des Géomètres*), saj je spodbudila sistematične in usklajene raziskave na tem področju, prinesla je tudi delitev področja in raziskav na tehnične, pravne in administrativne vidike uvajanja 3D-katastra (Stoter in Salzmann, 2001; Huml, 2001; Molen, 2001).

Zamisel o razvoju 3D-katastra v osnovi izhaja iz potrebe po prostorski opredelitvi območij pravic, omejitev in odgovornosti (angl. *rights, restrictions and responsibilities*, v nadaljevanju uporabljamo tudi

mednarodno uveljavljeno okrajšavo RRR) v treh razsežnostih (3D). V naravnem okolju je ta potreba najizrazitejša na območjih, kjer je treba pravno urediti pravice, omejitve in odgovornosti glede izkoriščanja rudnih bogastev pod zemljo ali na morju. Še očitnejša pa je v grajenem okolju, kjer predvsem v večjih in tehnološko naprednih mestih zasedenost oziroma raba prostora postajata vse gostejši in kompleksnejši. Tako je na istem položaju v horizontalnem smislu lahko prostor v mestu zaseden s stavbami z več nepremičninskimi enotami, predori in mostovi prometne infrastrukture, drugimi objekti gospodarske javne infrastrukture, garažami itd. V takšnih primerih tradicionalni 2D-katastrski sistemi težko zadovoljijo potrebe po učinkoviti in jasni opredelitvi nepremičninskih enot, na katere se nanašajo pravice, omejitve in odgovornosti. Katastrski sistemi za urejanje opisanih situacij posegajo po različnih rešitvah, ki razmeroma dobro rešujejo opisano problematiko. Najpogostejša instrumenta, ki se uporabljata za to in ju pozna tudi slovenski pravni sistem, sta vzpostavitev različnih vrst služnosti in vzpostavitev etažne lastnine.

Etažna lastnina je pravni instrument, ki omogoča razdelitev območij lastninske pravice na nepremičninah tudi v vertikalnem smislu. Uporablja se za ureditev lastninskih in drugih stvarnopravnih razmerij v stavbah, ki obsegajo več samostojnih funkcionalnih in nepremičninskih enot. Etažno lastnino pozna večina držav po svetu, ki imajo razvit sistem registracije stvarnih pravic, omejitev in odgovornosti na delih stavb. V tehničnem smislu se dokumentacija za vzpostavitev etažne lastnine razlikuje med državami, a v vseh primerih temelji na predstavitvi prostora oziroma delov stavb v dveh razsežnostih (2D). Tako se kot prostorska referenca pogosto pojavljajo različne oblike 2D-etažnih načrtov, kjer so v kontekstu fizičnih elementov stavbe označena območja nepremičninskih enot. Trenutno še nobena država na svetu na operativni ravni nima razvitega celovitega 3D-katastrskega sistema (Kalogianni in sod., 2020). V nekaterih državah obstajajo delne rešitve oziroma so bili in so v izvedbi različni prototipi in pilotni projekti v tej smeri (Stoter in sod., 2017; Larsson, Paasch in Paulsson, 2020). Kot že omenjeno, je problematika 3D-katastra večplastna in vključuje tehnične, pravne in administrativne vidike. Celovitega 3D-katastrskega sistema tako ni mogoče vzpostaviti z razvojem in rešitvami le na enem področju. Nekaterne države (na primer Švedska in zvezna država Victoria v Avstraliji) imajo urejeno pravno podlago za registracijo 3D-nepremičninskih enot, a v tehničnem smislu registracijo pravic, omejitev in odgovornosti trenutno izvajajo na 2D-modelih nepremičninskih enot (Rajabifard, Atazadeh in Kalantari, 2018; Larsson, Paasch in Paulsson, 2020).

Čeprav je mogoče veliko večino primerov, ki zahtevajo vertikalno razdelitev prostora za registracijo pravic, omejitev in odgovornosti na nepremičninah, rešiti z uporabo obstoječih 2D-tehnoloških rešitev, obseg in vsebina dosedanjih raziskav in dejavnosti kažejo, da so raziskave na tem področju zelo pomembne. Ključne so predvsem za razvoj celovitih rešitev, ki bi prispevale k preglednosti registracije nepremičnin in tudi k večkratni uporabi oziroma večfunkcionalnosti katastrskih sistemov. Ena od ključnih omejitev 2D-katastrov je nejasnost opredelitve nepremičninskih enot v prostoru, ki so temelj

za opredelitev pravic, omejitev in odgovornosti v 3D-prostoru. Poleg tega uporaba 2D-tehnologij prinaša nekatere poenostavitve, ki lahko v kompleksnih primerih vodijo v pomanjkljive opise 3D-prostorskega obsega pravic, omejitev in odgovornosti. Vse navedeno med drugim neposredno vpliva na pravno varnost imetnikov stvarnih in drugih pravic na nepremičninah.

Dodatno je pomembno izpostaviti priložnosti in prednosti, ki jih prinašajo 3D-tehnologije na področju geoprostorske podatkovne znanosti. Ključna prednost je v dejstvu, da lahko v 3D-katastrskem sistemu opišemo dejanski 3D-prostorski obseg pravic, omejitev in odgovornosti na nepremičninah ter s tem zagotovimo večjo pravno varnost vseh deležnikov. 3D-prostorski podatki pa vsebujejo tudi več dodatnih prostorskih informacij, kar povečuje njihovo uporabnost za različne namene na področjih izven domene katastra. Razvoj 3D-katastrskih sistemov je tako ključen za povezovanje z drugimi domenami geoprostorske podatkovne znanosti, ki prav tako napredujejo v smeri uvedbe 3D-tehnologij. Med njimi je pomembno izpostaviti zelo aktualni področji informacijskega modeliranja stavb (angl. *building information modeling*, v nadaljevanju BIM) in 3D-topografskega modeliranja mest. V širšem kontekstu je vsa navedena področja mogoče povezati s konceptom pametnih mest (angl. *smart cities*), ki ima velik razvojni potencial.

3D-prostorski podatki pa ne prinašajo sprememb in izzivov le na področju prostorskih podatkovnih modelov, temveč tudi na področju prostorskih analiz in upodobitev. Topološka pravila med grafičnimi gradniki 3D-modelov stvarnosti, ki so pogoj za izvedbo prostorskih analiz, so veliko bolj zapletena in obširna kot pri 2D-modelih. Zahtevnejše je upravljanje in vzdrževanje ter nadzor kakovosti podatkov. Poleg tega omogoča uporaba 3D-modelov prostora znotraj prostorskih (geografskih) informacijskih sistemov analize in operacije, ki pri 2D-modelih niso mogoče. V povezavi s tem je na mednarodni ravni pomembna raziskovalna tema, ki se ukvarja z razvojem topološko urejenih 3D-modelov prostora (Kolbe, 2009; Gröger in Plümer, 2012; Boguslawski in Gold, 2016). Dodatno je veliko znanstveno-raziskovalne pozornosti namenjene kontinuiranemu razvoju oziroma nadgradnji tradicionalnih 2D-podatkovnih modelov v topografiji in nepremičninski administraciji v večnamenski 3D-podatkovni model prostora (Aien in sod., 2013; Stoter, Ploeger in Oosterom, 2013).

Še neraziskano področje je razvoj večnamenskega 3D-katastra, ki zahteva topološko modeliranje stavb in delov stavb. Tak katastrski podatkovni model bi poleg razdelitve prostora na nepremičninske enote v 3D-okolju omogočal napredne prostorske analize v 3D-okolju ter lokacijske storitve tudi v samih stavbah. To področje je tema te doktorske raziskovalne naloge.

V doktorski raziskavi se osredotočamo na prostorsko-podatkovno področje 3D-katastra, kjer obravnavamo problematiko modeliranja prostorskih podatkov v 3D-katastrskih sistemih, namenjenih registraciji pravic, omejitev in odgovornosti v stavbah. Stavbe so posebno področje 3D-katastrov, kjer ima fizična komponenta prostora v obliki fizičnih elementov stavbe pomembno vlogo pri opredelitvi

nepremičninskih enot, s tem pa tudi prostorskih enot, na katere se nanašajo pravice, omejitve in odgovornosti. Stavbe so posebne tudi z vidika zajema in modeliranja prostorskih podatkov. Z vidika večnamenske vloge katastra so stavbe nadalje zanimive glede možnosti uporabe katastrskih podatkov na drugih področjih.

Glavni cilj doktorske disertacije je bil razviti prostorski podatkovni model 3D-katastra, ki je povezljiv s standardnimi podatkovnimi modeli drugih področij, ki se nanašajo na modeliranje stavb v prostorskih informacijskih sistemih. Glavni namen je bil razviti 3D-katastrski podatkovni model za stavbe, ki bi ga bilo mogoče uporabiti tudi na področjih izven domene katastrov, kar je temeljna ideja večnamenskega katastra. Pri tem smo se osredotočili predvsem na povezljivost podatkov 3D-katastra s podatkovnimi modeli na področjih informacijskega modeliranja stavb BIM in 3D-topografskega modeliranja. Primarni namen uporabe podatkov BIM je spremljanje in podatkovna podpora načrtovanju, gradnji in vzdrževanju gradbenih objektov, kar zahteva izjemno širok in kompleksen podatkovni model. V prostorskem smislu so podatki in procesi na področju BIM osredotočeni na posamezno stavbo, v čemer se razlikujejo od 3D-topografskih podatkov, ki obsegajo večja območja na ravni mest oziroma držav. Temeljna razlika med področjema izvira iz načina pridobivanja oziroma izvora podatkov ter iz same podrobnosti modeliranja prostorskih entitet. Podatki BIM nastajajo in se spreminjajo v celotni življenjski dobi stavbe, vključno s fazo načrtovanja; v tej prvi fazi imamo torej podatke o stavbi, ki v prostoru še ne obstaja, se pa morajo potem podatki seveda posodabljeni. 3D-topografsko modeliranje je usmerjeno v modeliranje obstoječih elementov prostora, vendar praviloma za večja območja, z manj podrobnostmi o posamezni prostorski entiteti. Posledično se področji razlikujeta v osnovnih konceptih podatkovnega modeliranja. Z vidika 3D-katastra sta obe področji zanimivi, saj sta lahko pomemben vir podatkov ali pa so podatki katastra lahko pomemben vir za obe navedeni domeni. V doktorski nalogi tako podatkovni model 3D-katastra razvijamo na konceptu podrobnih podatkov o fizičnih lastnosti stavb BIM ter s tem naslavljamo izziv povezljivosti fizičnih enot stavbe z abstraktnimi (nepremičninskimi) enotami stavbe. Z vidika večnamenskega 3D-katastra se nadalje ukvarjamo z izzivom možnosti uporabe tako zasnovanega 3D-katastrskega podatkovnega modela na širšem geoinformacijskem področju.

Na mednarodni ravni se že močno uveljavlja ideja povezovanja podatkov BIM in podatkov prostorskih informacijskih sistemov, kar je v strokovni javnosti poznano kot koncept GeoBIM (Arroyo Oho in sod., 2018; Norado in sod., 2020). V tem povezovanju vidimo priložnost tudi za sodobni 3D-katastrski podatkovni model. Poleg ideje povezovanja podatkov BIM in 3D-katastra je velik izziv razviti 3D-podatkovni model katastra, ki bo sledil ideji večnamenskega katastra. Pri tem se v raziskavi osredotočamo predvsem na priložnosti uporabe 3D-podatkov katastra za napredne prostorske analize v prostorskih informacijskih sistemih. V ta namen smo katastrski podatkovni model razvijali skladno s standardom CityGML, ki je namenjen 3D-prostorskemu modeliranju mest in pokrajine na način, da je podatke mogoče uporabljati za različne prostorske analize v 3D-okolju (Kolbe, König in Nagel, 2011).

Dodatno smo posebej obravnavali izzive podrobnega modeliranja notranjosti stavb, kar zahteva 3D-kataster, in možnosti uporabe teh podatkov, torej modelov notranjosti stavb, za namene navigacije v notranjosti stavbe.

1.1 Raziskovalne hipoteze

Doktorska disertacija temelji na obravnavi vprašanja:

»Ali je mogoče in na kakšen način je mogoče nadgraditi tradicionalni katastrski vektorski podatkovni model, ki temelji na 2D-grafičnem modelu realnega sveta, v večnamenski 3D-kataster?«

Raziskovalni hipotezi sta oblikovani na temelju pregleda aktualnih raziskav in sta bili hkrati vodilo za izvedbo raziskave v okviru doktorske disertacije:

- Hipoteza 1: *Tradicionalni 2D-vektorski katastrski podatkovni model je mogoče nadgraditi s 3D-vektorskim podatkovnim modelom, v katerem se lahko izognemo modeliranju stavb po etažah, ki je uveljavljeno v 2D-katastru.*

Naša domneva je, da je mogoče razviti 3D-modele stavb in delov stavb, ki omogočajo evidentiranje opisnih podatkov na nepremičninskih enotah in grafično vizualizacijo v 3D-prostorskem informacijskem okolju, ne da bi se omejevali na modeliranje stavbe po etažah.

- Hipoteza 2: *3D-podatkovni model katastra nepremičnin, ki temelji na topoloških pravilih povezovanja grafičnih gradnikov, razširja možnosti uporabe podatkov nepremičninskih evidenc in podpira idejo večnamenskosti katastra.*

Večnamenskost pri tem obravnavamo z vidika možnosti uporabe 3D-katastrskih podatkov za izvedbo zahtevnih 3D-prostorskih analiz, ki jih tradicionalni 2D-podatkovni model ne omogoča.

1.2 Cilji

Raziskovalno delo v okviru doktorske disertacije so usmerjali cilji, ki so bili oblikovani na podlagi predstavljene problematike in z namenom preverjanja pravilnosti postavljenih hipotez.

Prvi sklop ciljev je teoretične narave in v prvi vrsti obsega analizo stanja in trendov na področju sodobnih nepremičninskih evidenc ter pregled obstoječih raziskav na temo opredelitve 3D-podatkovnih modelov za 3D-kataster. Nadalje smo se usmerili v razvoj konceptualnega in logičnega modela večnamenskega 3D-katastra za stavbe. Pri razvoju modela je bila med ključnimi vodili povezljivost s standardnim modelom LADM in standardnimi modeli drugih, sorodnih področij, ki obravnavajo modeliranje fizičnega vidika stavb. Namen uporabe teh modelov je sicer izven domene katastra, povezljivost z njimi pa povečuje možnosti uporabe podatkov 3D-katastra, kar ustreza definiciji

večnamenskega katastra. V obravnavo smo vključili tudi podatke o stavbah v obstoječih 2D-katastrskih sistemih, za katere je bil cilj določiti njihovo uporabnost pri prehodu na 3D-katastrski sistem. Navedeni cilji in usmeritve so namenjeni predvsem preverjanju trditev v prvi hipotezi.

Za namene preverjanja pravilnosti druge hipoteze, ki se osredotoča na uporabnost topološko povezanih grafičnih gradnikov razvitega 3D-podatkovnega modela, smo razvili 3D-podatkovni model stavb ter postopke analitičnih funkcij, ki jih je mogoče izvajati nad takimi podatki. Poleg povezave s standardnim podatkovnim modelom, ki je namenjen izvajanju mrežnih analiz, je bil cilj raziskave opredeliti in razviti postopke, ki ob uporabi 3D-prostorskih analiz omogočajo pretvorbo podatkov v obliko, primerno za izvedbo mrežnih analiz v notranjosti stavb, kar je izrednega pomena za lokacijske storitve znotraj stavb.

Poleg teoretičnih ciljev smo v okviru doktorske disertacije uresničevali praktične cilje, ki so osredotočeni na območje Slovenije. Ti cilji obsegajo analizo in opredelitev slovenskih katastrskih podatkov, ki so ključni za prehod iz obstoječega sistema na 3D-katastrski sistem, in v nadaljevanju razvoj fizičnega modela 3D-katastra za neko območje, na katerem je mogoče izvesti razvite postopke podatkovnih pretvorb, ki omogočajo opravljanje mrežnih in drugih 3D-prostorskih analiz.

1.3 Struktura disertacije

Doktorsko disertacijo sestavlja sedem poglavij. Uvodnemu poglavju, kjer so podana izhodišča, hipoteze in osnovne usmeritve raziskave, sledi drugo poglavje, ki je namenjeno pregledu literature na področju 3D-katastra. Jedro poglavja je pregledni znanstveni članek v prilogi A (Tekavec, Ferlan in Lisec, 2018). Članek obravnava razvoj področja 3D-katastro od prvih raziskav do leta 2018. Nadaljevanje poglavja je namenjeno podrobnemu opisu raziskovalnih dejavnosti na tem področju po letu 2018. Znanstveni članek je dostopen v angleškem in slovenskem jeziku, zato povzetka vsebine ni vključenega v poglavje. Pregled literature dopolnjujejo podrobni pregledi področij, ki so sestavni del izvernih znanstvenih člankov, vključenih v doktorsko disertacijo (priloge B–E).

Tretje poglavje je osrednji del doktorske disertacije, kjer je opisan razvoj 3D-katastrskega modela za stavbe. V poglavju je podan povzetek izvirnega znanstvenega članka iz priloge B (Tekavec, Čeh in Lisec, 2020), kjer smo razvili konceptualno zasnovo za 3D-modeliranje stavb za namene 3D-katastra nepremičnin. Pri tem je osnovna enota modeliranja stavb 3D-notranji prostor.

Četrto poglavje je namenjeno obravnavi obstoječih katastrskih podatkov o stavbah v 2D-katastrskih sistemih. V poglavju povzemamo vsebino izvirnega znanstvenega članka, ki je v prilogi C (Tekavec in Lisec, 2020a). V članku je opisan razvoj postopkov, ki omogočajo pretvorbo obstoječih 2D-katastrskih podatkov o stavbah v obliki etažnih načrtov v 3D-podatkovni model, ki je primeren za izvedbo mrežnih

analiz. Enako smo zasnovali tudi koncept večnamenskega 3D-katastra, katerega podatke bi bilo mogoče uporabiti za navigacijo znotraj stavb. Predstavljena je analiza obstoječih podatkov, ki omogoča identifikacijo manjkajočih oziroma pomanjkljivih podatkov za izvedbo 3D-modeliranja.

V petem poglavju je povzetek izvirnega znanstvenega članka, ki je v prilogi D (Tekavec, Liseč in Rodrigues, 2020). V tem delu raziskave smo uporabili proceduralno modeliranje za simulacijo podatkov 3D-katastra na večjih območjih. S proceduralnim modeliranjem, postopki pretvorb in povezovanjem z realnimi katastrskimi podatki je izdelana simulacija fizičnega modela 3D-katastra za primer stavb za celotno območje Slovenije.

Zadnje (šesto) vsebinsko poglavje obravnava pretvorbo podatkov v doktorski disertaciji razvitega 3D-katastrskega modela v 3D-graf povezljivosti, ki je podatkovna osnova za izvedbo mrežnih analiz. Vsebina poglavja povzema vsebino izvirnega znanstvenega članka iz priloge E (Tekavec in Liseč, 2020b). Topološki odnosi med 3D-geometrijami prostorov v stavbah so določeni s 3D-prostorskimi funkcijami. Predstavljena je rešitev, ki omogoča uporabo 3D-prostorskih funkcij v kombinaciji z različnimi podatkovnimi viri, s tem pa smo prikazali tudi možnost uporabe katastrskih podatkov za lokacijske storitve znotraj stavb.

Doktorsko disertacijo zaključuje sedmo poglavje z zaključnimi ugotovitvami rezultatov opravljene raziskave, z obravnavo postavljenih hipotez in usmeritvami za prihodnje raziskave.

»Ta stran je namenoma prazna«

2 PREGLED RAZISKAV

Poglavje je namenjeno predstavitvi raziskav na področju obravnavne tematike, to je na področju 3D-katastra. Podroben pregled objav na mednarodni ravni je podan v preglednem znanstvenem članku, ki je v prilogi A (Tekavec, Ferlan in Lisec, 2018), v tem poglavju pa vključujemo pregled aktualnih raziskav in dejavnosti na področju 3D-katastrov po letu 2018.

Raziskave zadnjih let na področju 3D-katastra sledijo trendom, ki so izpostavljeni v preglednem članku v prilogi A (Tekavec, Ferlan in Lisec, 2018). V letu 2018 je bila izvedena mednarodna konferenca pod okriljem mednarodnega združenja FIG, delovne skupine za 3D-katastre. Prav tako je v letu 2018 v okviru FIG izšla publikacija *Best Practices 3D Cadastres* (Oosterom, 2018), ki v petih poglavjih celovito povzema pretekle raziskave in podaja ključne usmeritve za raziskave in razvoj v prihodnje. Poleg navedenega je v zadnjem obdobju raziskovanje zaznamovala prihajajoča revizija standarda LADM (ISO, 2012). Zadnji del poglavja je namenjen pregledu ostalih raziskav v tem obdobju, kjer so v ospredju predvsem tehnično usmerjene tematike, povezane z informacijskim modeliranjem stavb.

2.1 Delavnica 3D-katastrov v Delftu

Na mednarodni delavnici v Delftu leta 2018 so bili predstavljeni rezultati aktualnih raziskav v obliki 31 prispevkov. Prispevki pokrivajo velik del tematik, ki so povezane s 3D-katastri, vendar med njimi prevladujejo prispevki (devet), ki obravnavajo tehnični vidik razvoja 3D-katastrov, predvsem glede podatkovnih modelov in integracije podatkov. Tehnično usmerjenih je tudi dvanajst prispevkov, ki obravnavajo študije možnosti uvedbe 3D-katastrov v posameznih državah, ter dva prispevka o vizualizaciji 3D-katastrskih podatkov. Poleg prispevkov, ki se nanašajo na uvedbo 3D-katastra v posameznih državah, zasledimo obravnavo organizacijskih vidikov 3D-katastrov še v dveh prispevkih. V šestih prispevkih so se avtorji ukvarjali z različnimi vidiki povezave mednarodnega standarda LADM (ISO, 2012) in 3D-katastra. Najmanj je bilo prispevkov (dva) s pravnega področja, kar je opazno že v preteklosti in na kar sta že opozarjala Paulsson in Paasch (2013). Preseneča tudi, da je le en prispevek usmerjen v obravnavo podatkov BIM kot možnega vira podatkov za 3D-kataster (Atazadeh in sod., 2018).

Izbrani vsebinsko dopolnjeni in razširjeni prispevki s konference v Delftu so bili objavljeni v posebni izdaji revije *Land Use Policy* (Oosterom in sod., 2020). Med objavami je članek (Tekavec in Lisec, 2020b), ki je kot sestavni del vključen v doktorsko disertacijo in podaja možnosti 3D-modeliranja obstoječih 2D-katastrskih podatkov za potrebe navigacije v notranjosti stavb. Predlagani proces 3D-modeliranja notranjosti stavb omogoča oceno obstoječega sistema pridobivanja katastrskih podatkov v smislu prepoznavanja manjkajočih oziroma pomanjkljivih podatkov, ki bi omogočili enolično določitev

3D-nepremičninskih enot. Z navigacijo v notranjosti stavb je povezan tudi članek Alattasa in sod. (2020), v katerem avtorji z uporabo konceptualnega modela povezave standardov LADM in IndoorGML (OGC, 2014) predlagajo razvoj podatkovne baze in 3D-analizo gibanja posameznikov in skupin v stavbah. Izzivi pretvorbe obstoječih 2D-katastrskih načrtov v 3D-modele nepremičninskih enot so za primer Švedske opisani v Larsson, Paasch in Paulsson (2020). Avtorji ugotavljajo, da je za dejansko uveljavitev 3D-katastrskega sistema potrebna poleg tehničnih rešitev tudi sprememba zakonodaje. Na širšem področju geoinformatike se v zadnjih letih krepijo raziskave, povezane s pridobivanjem informacij iz množičnih virov (angl. *crowdsourcing*) (Triglav Čekada in Lisec, 2019). Razvoj teh raziskav spodbuja predvsem visok strošek zajemanja prostorskih podatkov, kar je marsikdaj vzrok za neažurnost podatkov. Z uvedbo različnih kontrolnih mehanizmov in uporabniku prijaznih rešitev je mogoče ta pristop uporabiti na številnih področjih. Gkeli, Potsiou in Ioannidis (2020) so razvili rešitev za zajem in predstavitev 3D-nepremičninskih enot s pametnimi telefoni v realnem času. Griffith-Charles in Sutherland (2020) v raziskavi obravnavata problematiko urejanja pravic na revnih in gosto poseljenih urbanih območjih. Analizirala sta primernost tehnologij daljinskega zaznavanja za identifikacijo meja med nepremičninskimi enotami in ugotovila, da je potrebna dodatna kontrola s terestričnimi meritvami. Razvoj katastrskih sistemov v smeri podpore 3D-nepremičninskih enot obravnavajo Vučić in sod. (2020) za Hrvaško, Sladić, Radulović in Govedarica (2020) za Srbijo ter Asghari, Kalantari in Rajabifard (2020) za zvezno državo Victoria v Avstraliji. Karabin in sod. (2020) primerjajo pristope osmih evropskih držav glede ureditve pravic na predorih. Alberdi in Erba (2020) sta razvila koncept modeliranja 3D-nepremičninskih vodnih objektov v okviru argentinske zakonodaje, ki podpira spreminjanje njihove geometrije skozi čas. Za manjše območje mesta Brisbane v Avstraliji so Cemellini in sod. (2020) izdelali prototip 3D-katastra z mešanimi 2D- in 3D-modeli nepremičninskih enot. Predlagana je shema podatkovne baze in izveden je test spletne rešitve za 3D-vizualizacijo podatkov. Organizacijske izzive uvajanja 3D-katastra v institucijah obravnavajo Ghawana in sod. (2020) za mesto Delhi v Indiji. Avtorji ugotavljajo, da administrativni procesi niso na stopnji razvoja, ki bi omogočila podporo upravljanju s 3D-podatki o nepremičninah. Kitsakis in Dimopoulou (2020) na primeru projekta cevovoda analizirata vključevanje 3D-pravnih omejitev v katastrske sisteme in ekonomske posledice tega. V zvezi s prihajajočo revizijo standarda LADM Kalognani in sod. (2020) predlagajo za izboljšanje podatkovne medopravilnosti izboljšave v smeri 3D-katastra, Kara in sod. (2020) pa se osredotočajo na vključevanje 3D-lastnosti nepremičnin v evidence in modele vrednotenja nepremičnin.

2.2 Publikacija FIG o 3D-katastrih

Publikacija *Best Practices 3D Cadastres* (Oosterom, 2018) je rezultat sodelovanja številnih ključnih raziskovalcev, ki so aktivno vključeni v delovanje delovne skupine *3D Cadastres* pod okriljem mednarodnega združenja geodetov FIG. Publikacija združuje pet ločenih poglavij, ki so v prvi obliki nastala kot pregledna poročila na peti delavnici leta 2016 v Atenah. Publikacija je izdana v skrajšani in

razširjeni različici in je namenjena celovitemu pregledu raziskav na področju 3D-katastrov. Poleg slednjega so v zadnjem delu vsakega poglavja izpostavljena ključna odprta vprašanja in predstavljene usmeritve za prihodnje raziskave. Zaradi njene celovitosti in tematik, ki sovpadajo s tematiko te doktorske disertacije, je v nadaljevanju podrobneje povzeta vsebina posameznih poglavij.

Prvo poglavje obravnavane publikacije je posvečeno pravnim vidikom 3D-katastra. Osrednji del je namenjen primerjavi pravnih instrumentov, ki omogočajo reševanje primerov, kjer se pojavljajo potrebe po 3D-razmejitvi pravic, omejitev in odgovornosti na nepremičninah. Avtorji poudarjajo pomanjkanje primerjalnih raziskav med različnimi državami in pravnimi sistemi, saj se pravne ureditve po posameznih državah med seboj občutno razlikujejo. Te razlike prinašajo veliko omejitev, saj zmanjšujejo uporabnost rezultatov raziskav. Rezultati analize pravnega okvira v petnajstih državah razkrivajo velike razlike med državami glede podpore 3D-registracije nepremičninskih enot v sistemih zemljiške administracije, ki se giblje od operativnega uvajanja 3D-katastrskih sistemov (Nizozemska, nekatere zvezne države Avstralije in izbrana mesta na Kitajskem) do stagnacije razvoja na obstoječih 2D-sistemih registracije. Sicer je v vseh analiziranih državah mogoče pravno razmejiti nepremičnine v 3D. Večinoma so te rešitve v obliki etažne lastnine, a se to ureja v okviru 2D-katastrskih sistemov. Glede pravne ureditve 3D-registracije nepremičnin so izpostavljene Švedska ter zvezni državi Queensland in Victoria v Avstraliji, kjer so 3D-nepremičninske enote pravno opredeljene, vendar sistem za njihovo registracijo podpira le 2D-modeliranje v obliki 2D-načrtov v tlorisni ali izometrični projekciji. Avtorji ugotavljajo, da trenutno ni države, v kateri bi pravni sistem opredeljeval 3D-nepremičninsko enoto in kjer bi hkrati katastrski sistem dovoljeval registracijo v obliki 3D-geometrije.

Drugo poglavje se navezuje na vsebino predhodnega, saj obravnava primere držav, ki poskušajo operativno uveljaviti 3D-katastrske sisteme. V študijo primerov je vključenih sedem držav, za katere so podrobneje opisani njihovi pristopi in rešitve. Avtorji analizirajo različne pristope za opredelitev 3D-nepremičninskih enot. Poudarjena so tehnična in pravna vprašanja, ki se pojavljajo pri prehodu na 3D-katastrski sistem.

Ena izmed osrednjih tematik na področju 3D-katastrov je 3D-modeliranje nepremičninskih enot, čemur je namenjeno tretje poglavje. Avtorji navedejo različne možnosti izvedbe katastrskega informacijskega sistema, ki vključuje 3D-nepremičninske enote. Te se razlikujejo predvsem po zahtevnosti izvedbe. Kot najpreprostejši način izvedbe je predstavljena vpeljava 2D-tlorisov 3D-nepremičninskih enot brez shranjevanja podatkov v 3D-obliki. Podatki o 3D-nepremičninskih enotah so lahko shranjeni v ločenem sistemu od ostalih podatkov, ki modelirajo zemljiške parcele v 2D-okolju. Naslednja možnost je shranjevanje v obliki tlorisov skupaj z drugimi 2D-podatki, ki imajo vzpostavljeno povezavo na dokument v drugi obliki, kot sta primera CAD ali PDF, ki vsebuje 3D-geometrije. Shranjevanje skupaj s podatki o parcelah v 2D-obliki je mogoče tudi, če 3D-nepremičninske enote predstavimo s približkom,

ki predstavlja zgornjo in spodnjo ploskev, ali s pretvorbo vseh modelov nepremičnin (vključno z 2D-parcelami) v 3D-obliko. Kot najprimernejša in hkrati tudi najbolj kompleksna je predstavljena rešitev, ko 2D- in 3D-modele nepremičninskih enot združimo v enem informacijskem sistemu, kjer ohranjamo njihovo izvorno geometrijsko obliko (Thompson, 2015). Avtorji poudarjajo vlogo četrte dimenzije, to je časa, pri registraciji nepremičnin, za kar se je uveljavil izraz 4D-kataster. Tudi v tem primeru podajo različne rešitve v okviru informacijskih sistemov (Oosterom in sod., 2006). V nadaljevanju avtorji predstavijo standardne 3D-podatkovne modele z različnih področij in možnosti njihove uporabe za potrebe 3D-katastra. Podrobneje so opisani standardizirani podatkovni modeli LADM, *INSPIRE Data specifications on cadastral parcels* (INSPIRE, 2009), GML (ISO, 2007), CityGML (OGC, 2012), InfraGML (OGC, 2016), IndoorGML (OGC, 2014) in IFC (ISO, 2013). Izpostavljena je združitev rešitev, ki jih predlagata standarda LADM in IndoorGML, kar obravnavamo v nadaljevanju te doktorske disertacije. LADM kot konceptualni model za sistem zemljiške administracije omogoča opredelitev podatkovnega okvira oziroma profila sistema zemljiške administracije za posamezno državo, s katerim lahko katastrski podatkovni model posamezne države povežemo s koncepti LADM. V literaturi (Oosterom in Lemmen, 2015) zasledimo pozive za izdelavo takšnih profilov, saj se s tem povečuje mednarodna primerljivost in izmenjava podatkov. V publikaciji so podrobneje opisani profili petih izbranih držav. V zaključku poglavja so navedeni glavni cilji za prihajajočo revizijo standarda LADM.

Najbolj tehnično usmerjeno poglavje je namenjeno pregledu rešitev glede sistemov za upravljanje podatkovnih baz SUPB (angl. *Database Management System – DBMS*) za potrebe 3D-katastra. Opisani so načini za shranjevanje podatkov o 3D-modelih prostorskih objektov v SUPB v vektorski in rastrski obliki ter v obliki oblakov točk. Nadalje so predstavljene rešitve za prostorsko indeksiranje shranjenih podatkov, ki omogočajo učinkovit dostop do shranjenih podatkov v SUPB. Če želimo shranjevati podatke o 3D-geometriji v podatkovni bazi, mora ta podpirati 3D-podatkovne tipe ter operacije z njimi. Tu je poudarek na 3D-prostorninah oziroma telesih (angl. *solid geometries*), ki so omejena z robnimi ploskvami zaprtega poliedra. Tega sestavljajo medsebojno povezane 2D-ploskve v 3D-prostoru. Pri uporabi kompleksnih geometrijskih gradnikov za modeliranje nepremičninskih enot je zagotavljanje skladnosti geometrij s pravili modeliranja ključnega pomena (Kazar in sod., 2008; Ledoux, 2013). Kompleksnejši kot je geometrijski podatkovni tip, kompleksnejša so pravila in posledično je težje zagotavljati skladnost z njimi. Tako so tudi v tistih SUPB, ki podpirajo shranjevanje 3D-geometrij v obliki prostorninskih teles, operacije za preverjanje skladnosti s pravili zelo pomanjkljive. Velik del napak pri 3D-geometrijah se pojavlja zaradi nedoslednosti v topoloških odnosih med posameznimi sestavinami geometrije (robnimi ploskvami). Kot primer lahko izpostavimo prostorninsko telo, pri katerem se posamezne mejne ploskve ne stikajo. Takšno telo ni skladno s pravili osnovne topologije, saj ne ustreza pogoju zaprtosti. Takšne napake se večkrat označujejo z izrazom »vodotesnost« prostorninskih teles. 3D-topološki modeli takšne napake lahko preprečijo, saj so zasnovani tako, da uporabljajo geometrijo nižje kompleksnosti (točka) in preko topoloških odnosov med njimi definirajo

kompleksne geometrijske gradnike, med njimi tudi prostorninska telesa. 3D-topološki modeli stavb so že bili razviti, vendar praviloma niso zasnovani tako, da bi bili povezani v SUPB in bi bili hkrati usklajeni s standardom LADM. Standard LADM obravnava domeno zemljiške administracije, ki sicer predlaga relativno široke možnosti modeliranja geometrije in topologije, ne predpisuje pa podrobneje načina zapisa podatkov. Zulkifli in sod. (2015) so podali pregled značilnosti 3D-topoloških modelov, ki jih obravnavajo v povezavi s standardom LADM. Med razširjenimi SUPB sta dva, ki podpirata shranjevanje in upravljanje 3D-geometrij v obliki prostorninskih teles. Gre za *Oracle Spatial* in *PostgreSQL* z razširitvijo *PostGIS*, ki je uporabljena in podrobneje analizirana v tej doktorski disertaciji. Oba SUPB omogočata poleg podatkovnih tipov tudi osnovne analitične operacije s shranjenimi 3D-geometrijami, vendar je nabor teh operacij v primerjavi s tistimi, ki omogočajo upravljanje z 2D-podatki, zelo omejen. Poglavje je sklenjeno s pregledom novih trendov glede shranjevanja prostorskih podatkov v podatkovnih bazah.

Zadnje poglavje je namenjeno pregledu področja 3D-vizualizacije katastrskih podatkov. Gre za pomembno tematiko na področju 3D-katastrov, saj omogoča prav 3D-vizualizacija prostorsko interpretacijo katastrskih podatkov. Poudarjeni so ključni izzivi, ki jih za vizualizacijo prinaša uvedba 3D-katastra. Med njimi je ključna težava prekrivanje vsebine, ki povzroči, da pogosto ne moremo prikazati vseh 3D-nepremičninskih enot na enem prikazu. Slednje je mogoče reševati z izbiranjem in prikazovanjem le izbranih 3D-nepremičninskih enot, uporabo žičnega prikaza, uvedbo prosojnosti, premikanjem, poenostavljanjem prikaza na talne površine (Shojaei in sod., 2014; Wang, 2015). Prekrivanje vsebine je težavno tudi ob vključitvi topografskih elementov, ki 3D-nepremičninskim elementom dodajo prostorski kontekst, a jih obenem zakrijejo. 3D-vizualizacija podatkov prinaša dodatne izzive zaradi večje zahtevnosti za uporabo, težje ocene položaja, usmerjenosti in globine ter različnega merila prikaza zaradi perspektive. Poleg navedenih izzivov avtorji navajajo tudi ključne zahteve uporabnikov, ki so značilne za katastrske sisteme, med katerimi je glavna nedvoumna identifikacija položaja in oblike izbrane nepremičninske enote ter njenih sosed. Izvedbo 3D-vizualizacij omogočajo različne platforme, od katerih so v zadnjem času v vzponu in razvoju predvsem spletne, ki omogočajo dostop širokemu krogu uporabnikov. Med novimi tehnologijami sta izpostavljeni tehnologiji navidezne in obogatene resničnosti. V kombinaciji s 3D-katastrskimi podatki lahko ti tehnologiji omogočita učinkovitejšo interpretacijo podatkov, saj se po načinu delovanja približujeta človekovemu naravnemu dožemanju prostora.

2.3 Delavnica LADM

Zadnje obdobje raziskav na področju 3D-katastra so med drugim zaznamovale raziskave, povezane z revizijo standarda LADM. Zadnja delavnica je bila organizirana leta 2019 v Maleziji. Predstavljene so bile številne študije glede uporabe standarda LADM v Maleziji (Rajabifard in sod., 2019), Indoneziji

(Indrajit in sod., 2019), Kolumbiji (Morales in sod., 2019), Savdski Arabiji (Alattas in sod., 2019), Singapurju (Yan in sod., 2019) in Izraelu (Shnaidman in sod., 2019). Kalogianni in sod. (2019) so analizirali 23 profilov LADM izbranih držav in na podlagi rezultatov analize razvili metodologijo za razvoj v prihodnje. Zulkifli, Rahman in Siew (2019) so za primer profila LADM za Malezijo izdelali podatkovno shemo za shranjevanje 3D-podatkov o etažni lastnini v SUPB in koncept prenosa podatkov iz obstoječe rešitve XML v odprtokodni SUPB *PostgreSQL*. V zvezi s profili posameznih držav so Oukes, Lemmen in Folmer (2019) obravnavali in zasnovali okvir za raziskave v smeri izboljšave medopravilnosti na področju katastrskih sistemov, ki temelji na uporabi standarda LADM.

2.4 Ostale aktualne raziskave

V zadnjih letih je na področju 3D-katastra zaznati povečano število raziskav, ki z različnih vidikov obravnavajo BIM. Eden od glavnih ciljev vpeljave okolja BIM je zagotovitev enotne in celovite informacijske podpore skozi celoten življenjski cikel gradnje in vzdrževanja stavb. Iz tega razloga je smiselno v okolje BIM vključiti tudi podatke in procese za upravljanje pravic, omejitev in odgovornosti na nepremičninah. Med ključnimi težavami so razlike med podatkovnimi modeli in procesi. Knoth in sod. (2018) primerjajo tri podatkovne modele, ki so bili razviti za potrebe izmenjave informacij med standardoma IFC in CityGML. Na podlagi primerjave in s ciljem čim večje enostavnosti so razvili model, ki zajema njihove skupne elemente in ga je mogoče razširiti za različne namene. Za študijo primera uporabijo primer 3D-katastra, ki ga razširijo s povezavo na ustrezne elemente standarda LADM. Fizične strukture stavbe (zidovi, vrata, okna in plošče) in prostore povežejo z razredi *LA_LegalSpaceBuildingUnit*, *LA_BAUnit* in *LA_BoundaryFace* standarda LADM. Elementi so v modelu preko kompozicije povezani z nadstropjem, ta pa s stavbo. Podatkovni model je problematičen z vidika kompozicije elementov v nadstropja, saj obstaja veliko primerov, ko je določanje nadstropja za posamezno stavbo problematično tako za prostore kot tudi za posamezne fizične elemente stavbe. Rajabifard, Atazadeh in Kalantari (2018) so ocenjevali možnost modeliranja pravnih razmerij na nepremičninah v prostoru v okviru obstoječih podatkovnih modelov za namene razvoja 3D-registracije nepremičnin v zvezni državi Victoria v Avstraliji. Avtorji podatkovne modele razdelijo glede na njihov namen na fizične, pravne in združene. Ugotavljajo, da so podatkovni modeli CityGML, IndoorGML in IFC preko ustreznih razširitev lahko primerni za vključevanje podatkov o pravicah, omejitvah in odgovornostih na nepremičninah (RRR). Še bolj pa so primerni kot vir podatkov za podatkovne modele, ki združujejo fizične in pravne elemente prostora. Med možnostmi za povezovanje podatkovnih modelov so avtorji analizirali povezavo standardov LADM in IndoorGML. Izpostavili so potrebo po raziskavah v podporo 3D-prostorskim analizam, čemur v delu sledi tudi raziskovalno delo v okviru te doktorske disertacije. V nekaterih državah potekajo projekti, ki proučujejo možnosti združevanja področij informacijskega modeliranja stavb BIM in geografskih informacijskih sistemov GIS. Tematika je aktualna predvsem na področjih prostorskega planiranja in gradnje. Eden takšnih projektov je bil

projekt GeoBIM na Nizozemskem (Ohori in sod., 2018), kjer so raziskovali načine, kako vključiti podatke GIS v BIM in nasprotno. Rajabifard, Atazadeh in Kalantari (2019) so v obširnem delu celovito obravnavali BIM v okviru upravljanja pravnih razmerij v urbanem okolju. V knjigi so opisane možnosti, kako je BIM mogoče uporabiti za prehod sistemov zemljiške administracije iz 2D v 3D. Avtorji predstavijo različne pristope za razširitev podatkovnega modela IFC s ciljem vključitve podatkov o pravicah, omejitvah in odgovornostih na nepremičninah. Opisani pristop ima veliko prednosti, saj omogoča hkratno in združeno obravnavanje pravnih in fizičnih vidikov upravljanja stavbe. S tem je omogočena tudi učinkovitejša vizualna interpretacija obsega pravnih dejstev v prostoru. Posebej so obravnavane različne možnosti opredelitve mej pravic in drugih pravnih režimov na nepremičninah glede na fizične strukture stavbe, ki so modelirane v okolju BIM. Podobno raziskavo so izvedli Sun in sod. (2019). Predlagana konceptualna združitev podatkovnih modelov LADM in IFC je izvedena na praktičnem primeru, ki izhaja iz švedske pravne ureditve področja zemljiške administracije. Avtorji ugotovijo, da je združitev mogoča tako na konceptualni kot tudi na izvedbeni ravni ter da prispeva k jasnejši interpretaciji prostorske opredelitve pravic, omejitev in odgovornosti na nepremičninah. Sun in Paulsson (2020) sta za švedski primer upravljanja pravic in drugih pravnih režimov na nepremičninah z vidika BIM razvila priročnik z informacijami (angl. *Information Delivery Manual*), ki vključuje vse faze projekta od planiranja, prek razdelitve pravic, pridobivanja gradbenega dovoljenja, gradnje do končnega upravljanja stavbe po izgradnji. Olafat in sod. (2019) se osredotočajo na študijo procesa razdelitve pravic, omejitev in odgovornosti v stavbah ob uporabi podatkov in procesov BIM. Študija se nanaša na pravno in sistemsko ureditev avstralske zvezne države Victoria. Avtorji poudarjajo, da bi sistem razdelitve pravic, omejitev in odgovornosti na nepremičninah, ki temelji na okolju 3D-BIM, omogočil neposredno vpeljavo 3D-katastrskega sistema. Izhajajoč iz rešitev za modeliranje nepremičninskih enot za 3D-kataster v okolju BIM, ki so jih predstavili Rajabifard, Atazadeh in Kalantari (2019), so Atazadeh in sod. (2019) razvili poizvedbe na podlagi podatkovne sheme IFC, ki so namenjene poizvedovanju o pravicah v stavbi, razmerjih med njimi in odnosom med njimi ter fizičnimi elementi stavbe. Pridobiti je mogoče tudi podatke o fizičnih elementih stavbe, ki omejujejo oziroma sestavljajo posamezno nepremičninsko enoto. Tako razvito okolje omogoča poleg vključitve podatkov o pravicah, omejitvah in odgovornostih na nepremičninah v BIM tudi osnovne prostorske analize. Podobno so Barzegar in sod. (2020) razvili 3D-poizvedbe v okolju BIM, ki omogočajo pridobivanje ploskev fizičnih elementov, ki predstavljajo meje pravic in drugih pravnih dejstev v stavbah. Avtorji razlikujejo štiri vrste mej: notranjo, zunanjo, vmesno in drugo. Za identifikacijo vrste mej avtorji uporabljajo preseke linij v smereh normalnih vektorjev ploskev.

Intenziteta razvoja 3D-katastra se po državah razlikuje, raznolike pa so tudi smeri razvoja. S tem je precej oteženo spremljanje razvoja 3D-katastra po državah, posledično so zmanjšane možnosti za sodelovanje ter usklajen razvoj 3D-katastrov na mednarodni ravni. V zvezi s slednjim Stoter, Biljecki in Ho (2020) predlagajo vpeljavo stopenj podrobnosti (angl. *level of detail* – LOD), kar izhaja iz

konceptov topografskega modeliranja prostora v okviru standarda CityGML. Avtorji predlagajo koncept stopnje izvedbe (angl. *level of implementation* – LOI), ki se nanaša na tri poglobitve vidike razvoja 3D-katastrov, in sicer tehnološki, pravni in organizacijski vidik. Skupek posameznih stopenj izvedbe za vsak posamezen vidik sistem umešča v 3D-matriko, ki daje celovit pregled nad stopnjo razvitosti posameznega 3D-katastrskega sistema. Ta lahko glede na svojo umestitev v matriki lažje načrtuje nadaljnje razvojne korake. Zanimiva je nedavna primerjava katastrskih sistemov Nizozemske, zvezne države Victoria v Avstraliji in Singapurja (Stoter, Ho in Biljecki, 2019). Ti sistemi so med najbolj naprednimi v smislu uveljavljanja 3D-registracije nepremičnin. Avtorji poudarijo njihove trende, izzive in pomanjkljivosti. Iz rezultatov primerjave vidimo, da obstajajo v obravnavanih državah težave, ki preprečujejo operativno vpeljavo 3D-katastra. Izpostavljene so predvsem težave z vidika slabe podpore zakonodaje, dileme glede povezovanja podatkov o pravicah, omejitvah in odgovornostih na nepremičninah s podatki o fizičnih strukturah v prostoru, dostopnost do podatkov ter premalo raziskano razmerje med stroški in koristmi uvedbe 3D-katastra. Na podlagi rezultatov raziskave avtorji podajo opažanja in predloge za nadaljnji razvoj sodobnih katastrov. Treba je razjasniti vlogo 3D-podatkov pri registraciji nepremičnin, saj lahko opredeljujejo dejansko prostorsko razsežnost pravic, omejitev in odgovornosti na nepremičninah in imajo pravni pomen, ali pa so uporabljeni le za boljše prostorsko predstavitev podatkov, ki se lahko uporablja tudi za druge namene zunaj domene registracije nepremičnin. Avtorji poudarjajo potrebo po prenosu napredka na področju tehničnih rešitev v zakonodajo. Prizadevanja za razvoj 3D-katastra naj bi bila povezana z drugimi področji, predvsem v okviru razvoja pametnih mest. Tesnejša povezava 3D-katastrov s področjem BIM zahteva spremembo pristopa pridobivanja podatkov, saj 3D-podatki v okolju BIM nastanejo v procesu načrtovanja in ne na temelju opazovanj oziroma izmere dejanske nepremičnine, kot je to običajno za podatke v obstoječih katastrskih sistemih.

Z razvojem področja BIM in predstavljenimi študijami, ki obravnavajo njegovo združevanje s področjem 3D-katastrov, narašča tudi kompleksnost modeliranja katastrskih podatkov. Odpirajo se vprašanja optimalnega načina 3D-modeliranja podatkov o nepremičninah. Glede tega Knoth, Atazadeh in Rajabifard (2020) ocenjujejo zmožnosti prostorninskih teles za upravljanje geometrije in topoloških odnosov 3D-katastrskih podatkov. Prostorninska telesa so kot osnova uporabljena v podatkovnem modelu te doktorske disertacije. V ta namen so avtorji opravili sintezo preteklih raziskav, ki obravnavajo modeliranje geometrije in topologije prostorskih enot, na katere se nanašajo pravice, omejitve in odgovornosti na nepremičninah, kar so storili s prostorninskim modeliranjem. Predlagani postopek prostorninskega modeliranja je prilagojen potrebam in značilnostim 3D-katastrov. Osnovne elemente je mogoče kombinirati in lokalno spreminjati. Tako pridobljena prostorninska telesa so transformirana v ploskovni model, primeren za 3D-vizualizacijo. Zadnji korak postopka je preverjanje skladnosti s pravili, ki se deli na notranje in zunanje preverjanje. Pri notranjem preverjanju se preveri vsaka posamezna geometrija, kjer so mogoče napake nezaprte ploskve ali lomnih točk ploskve, ki niso v isti

ravnini. Notranjemu preverjanju sledi zunanje preverjanje, kjer pa se preverjajo odnosi med posameznimi geometrijami, na primer 3D-nepremičninske enote se ne smejo sekati v 3D-prostoru. Povečana kompleksnost modeliranja katastrskih podatkov v 3D-okolju prinaša izzive tudi na področju njihovega shranjevanja in upravljanja. V zvezi s slednjim Višnjevac in sod. (2019) analizirajo možnosti uporabe podatkovne baze NoSQL, ki omogoča učinkovito shranjevanje in upravljanje velike količine nestrukturiranih podatkov. Avtorji so nadalje razvili koncept 3D-vizualizacije, ki temelji na aplikaciji JavaScript. Avtorji celovito predstavijo prednosti in slabosti uporabe podatkovne baze NoSQL za potrebe 3D-katastra. Med ključnimi pomanjkljivostmi poudarijo pomanjkanje topoloških pravil za prostorske podatke in pomanjkanje prostorskih funkcij.

Zadnji celovit pregled aktualnega stanja na področju 3D-katastra zasledimo v Kalogianni in sod. (2020). Avtorji poudarjajo vpetost 3D-katastrskih sistemov v širši okvir zemljiške administracije in širše v okvir razvoja prostora. Predstavljen je življenjski cikel prostorskega razvoja in njegove posamezne faze, pri čemer avtorji poudarijo pomen standardov, ki omogočajo medopravilnost in sodelovanje med različnimi deležniki. Kot najpomembnejši vir podatkov za prihodnje 3D-katastrske sisteme avtorji izpostavijo podatke BIM. Sledi opis vizije prihodnjih 3D-katastrskih sistemov, ki je dodatno podprta z razvojem prototipa, utemeljenega na spletnih tehnologijah. Predstavljene aktualne raziskave in trendi za prihodnji razvoj 3D-katastrskih sistemov so usmerjeni v povezovanje z različnimi področji, ki so vezana na upravljanje prostora. Takšno povezovanje je mogoče, če 3D-katastrski sistem ni omejen le na modeliranje pravic, omejitev in odgovornosti na nepremičninah v prostoru, ampak upošteva in vzpostavlja odnose med pravnimi dejstvi in fizičnimi strukturami v prostoru, kar je pomembno predvsem v grajenem okolju. To je tudi eno izmed glavnih vodil te doktorske disertacije.

»Ta stran je namenoma prazna«

3 PROSTOR KOT OSNOVA ZA MODELIRANJE STAVB V 3D-KATASTRU

V poglavju povzemamo vsebino izvirnega znanstvenega članka, ki je v prilogi B (Tekavec, Čeh in Lisec, 2020) in v katerem smo razvili koncept opredeljevanja 3D-nepremičninskih enot na primeru stavb za namene uvedbe 3D-katastra.

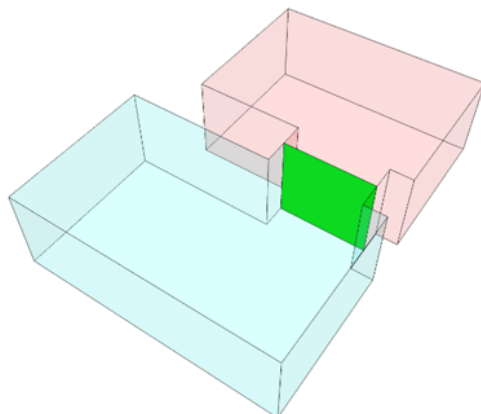
3.1 Ideja in teoretično ozadje

V zadnjih dveh desetletjih je bilo objavljenih več predlogov za podatkovni model 3D-katastra (Stoter, 2004; Aien in sod., 2013; Knoth in sod. 2018). Poleg navedenih raziskav je bil leta 2012 objavljen mednarodni standard LADM, katerega cilj je poenotenje sistemov zemljiške administracije. Ideja o povezovanju fizičnih (stvarnih) in pravnih vidikov registracije stavb v nepremičninskih evidencah je začela pridobivati na pomenu z razvojem področij BIM in 3D-modeliranja mest v okoljih geografskih informacijskih sistemov (GIS). V prejšnjem poglavju smo predstavili številne aktualne raziskave zadnjih let, ki skušajo na različne načine povezati podatke 3D-katastra s podatkovnimi modeli IFC, CityGML, InfraGML in IndoorGML. Dosedanjim raziskavam na področju modeliranja 3D-katastrskih podatkov je skupno, da kot osnovo enoto obravnavajo nepremičninsko enoto, ki predstavlja prostorsko enoto pravnega pomena. To je tudi eden od osnovnih konceptov standarda LADM.

V raziskavi, predstavljeni v članku Tekavec, Čeh in Lisec (2020) (priloga B), smo se osredotočili na razvoj podatkovnega modela 3D-katastra za primer stavb. Bistvena ideja razvitega podatkovnega modela je uporaba fizičnih prostorskih entitet kot osnovnih elementov za 3D-modeliranje stavbe. Pri tem je notranji prostor opredeljen kot osnovni element 3D-modeliranja stavb, kar omogoča preprostejšo integracijo, izmenjavo in uporabo podatkov 3D-katastra.

3.2 Metodologija raziskave

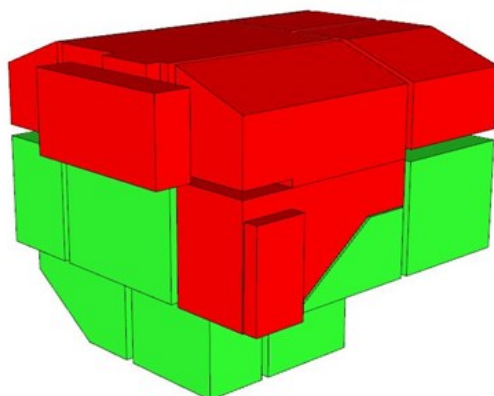
Razvoj predlaganega podatkovnega modela temelji na analizi dosedanjih raziskav na področju 3D-katastrskih podatkovnih modelov in temeljnih ciljev, ki smo jih postavili kot izhodišče naše raziskave. Osnovni element podatkovnega modela je notranji prostor, ki je omejen s ploskvami tal, zidov in sten. Prostori so s ploskvijo omejeni tudi na območjih odprtih, kjer se stikajo s ploskvami drugih prostorov (slika 1). S stikanjem ploskev, ki predstavljajo prehode, so izvedeni topološki odnosi med prostori, katerih uporaba je podrobneje obravnavana v članku Tekavec in Lisec (2020b), ki je predstavljen v šestem poglavju (priloga E).



Slika 1: Prehodi med prostori v obliki stikajočih se ploskev (zeleno).

Figure 1: The passages between indoor spaces are realised by surfaces in contact (green).

Nepremičninska enota je realizirana kot skupina prostorov, ki ji pripadajo (slika 2). Poleg dejstva, da je notranji prostor učinkovita rešitev za opredelitev nepremičninskih enot in pravnih razmerij v stavbi, je tudi element, ki je dobro povezljivi z drugimi podatkovnimi modeli (Knoth in sod., 2018).



Slika 2: Dve nepremičninski enoti (rdeča in zelena) kot skupini prostorsko povezanih prostorov.

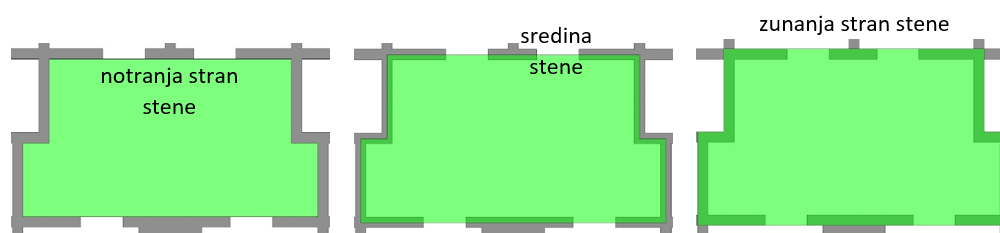
Figure 2: Two real property units (red and green) represented by groups of spatially linked indoor spaces.

Poleg osnovne ideje so bili pri razvoju podatkovnega modela uporabljeni naslednji cilji:

- (1) Podatkovni model naj ne predpisuje načina shranjevanja in upravljanja podatkov, ki so zunaj domene katastra.
- (2) Podatkovni model naj zagotavlja podatke, ki so strukturirani tako, da omogočajo najširšo možno povezljivost s podatkovnimi modeli sorodnih področij.
- (3) Podatkovni model naj ločuje katastrske podatke o stavbah od podatkov o parcelah in s tem zagotavlja 3D-prostorske podatke tam, kjer je to potrebno, in omogoča postopen prehod na 3D-katastrski sistem.
- (4) Podatkovni model naj bo zasnovan tako, da omogoča izvedbo v podatkovni bazi.

Lemmen, Oosterom in Bennett (2015) uvrstijo v svoji študiji podatke o fizičnih entitetah stavbe med podatke, ki so povezani, a obenem zunaj osnovne domene standarda LADM. Po drugi strani številne raziskave poudarjajo neločljivo povezanost podatkov pravnega pomena (RRR) in fizičnih podatkov (Aien in sod., 2015; Li in sod., 2016; Knoth in sod., 2018). Prvi cilj smo obravnavali skupaj z drugim ciljem in prišli do uravnotežene rešitve, pri kateri notranji prostori opredeljujejo pravni in fizični vidik stavbe.

V literaturi in pravnih ureditvah posameznih držav lahko zasledimo različne načine določanja meja med nepremičninskimi enotami v stavbah. Pristope za namen opredelitve mej pravnih dejstev (slika 3), lahko razdelimo na uporabo notranje in zunanje strani ter sredine stene v (Atazadeh in sod., 2017).

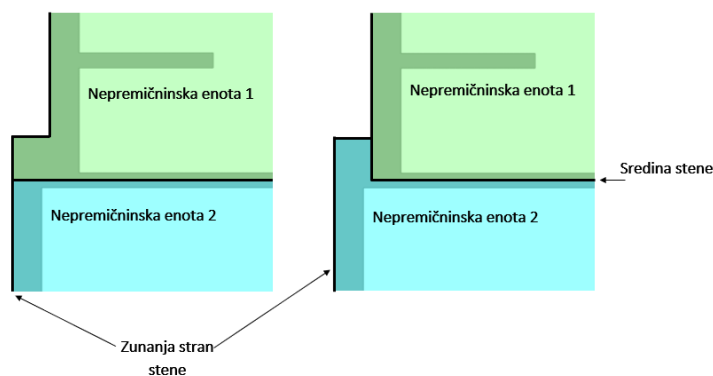


Slika 3: Različni načini določanja meja nepremičninskih enot v stavbah.

Figure 3: Options for real property unit boundary placement.

Opredelitev meje nepremičninske enote na zunanji strani ali na sredini zidu odpira številne dileme glede upravljanja in obravnave pravnih dejstev na delih stavb:

- (1) Če meja poteka po zunanji strani zidu, potem lastništvo zidu ni deljeno med sosednja lastnika. Če je zid statično ali drugače pomemben v stavbi, potem tak zid zadeva interese vseh lastnikov v stavbi.
- (2) Če meja poteka po sredini zidu, kako je z lastništvom zunanjih zidov, torej tistih, ki mejijo na zunanost?
- (3) Če meja poteka po zunanji strani zidu, kako določiti mejo v kompleksnih primerih (slika 4)?

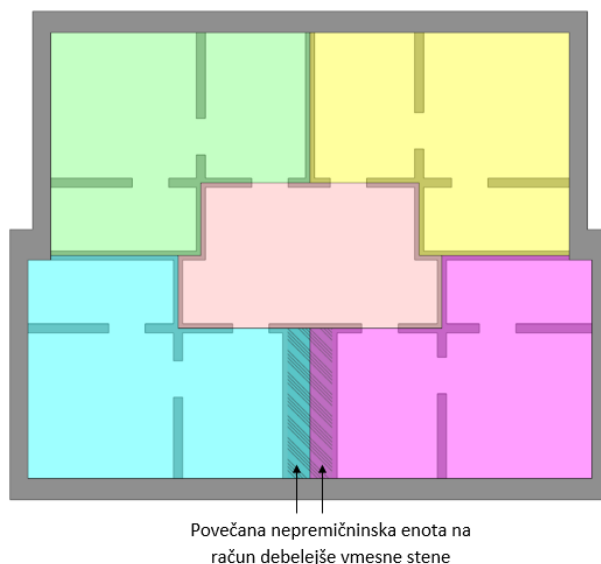


Slika 4: Različne možnosti za potek opredelitve meje nepremičnine po zunanji strani zidu.

Figure 4: Different variants of exterior real property boundary placement.

- (4) Če meja poteka po zunanji strani ali sredini zidu, kako določiti lastništvo inštalacij v zidu?

- (5) Če meja poteka po zunanji strani ali sredini zidu in imajo stene različne debeline, imajo lahko fizično enake enote lahko različne velikosti pripadajoče nepremičninske enote (slika 5).
- (6) Če meja poteka po zunanji strani ali sredini zidu, kako urediti lastništvo talnih oziroma stropnih plošč?



Slika 5: Različne velikosti nepremičninskih enot zaradi različne debeline vmesnih sten (meje med nepremičninskimi enotami potekajo po sredini stene).

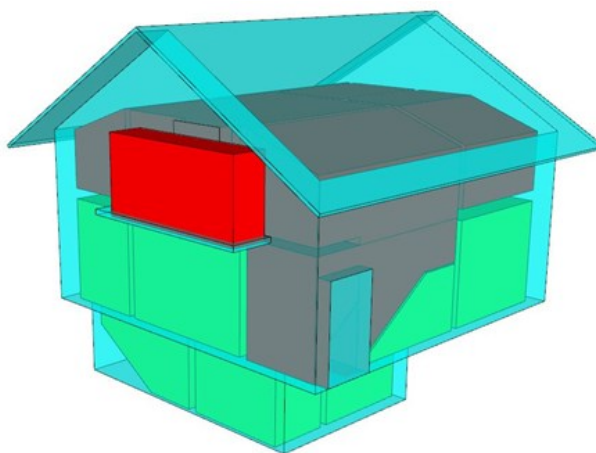
Figure 5: Various sizes of legal units, presented in different colours, for the same apartments (boundaries between real property units lie in the middle of the wall).

Navedene dileme kažejo, da lastniki ne morejo polno izvrševati pravic nad fizičnimi elementi stavbe, ampak le v okviru prostorov, ki so določeni oziroma omejeni s fizičnimi elementi stavbe. Glede slednjega obstajajo rešitve, ki navedene dileme rešujejo v obliki pogodb med lastniki. Če za mejo nepremičninske enote določimo notranjo stran zidov, se tem dilemam izognemo.

Zunanja geometrija stavbe je, poleg notranjih prostorov, pomemben katastrski podatek. Če podatke o stavbah in parcelah v katastrskem sistemu ločujemo, kot to predvideva naš tretji zastavljeni cilj, mora med njimi obstajati povezava. Zunanja geometrija stavbe lahko služi kot povezovalni člen med parcelno orientiranim 2D-katastrskim sistemom in 3D-katastrom za stavbe. Veliko katastrskih sistemov po svetu, vključno s slovenskim, vzpostavlja takšno povezavo preko 2D-geometrije oboda stavbe oziroma stika z zemljiščem. V odvisnosti od pravne ureditve lahko zunanja geometrija stavbe opredeljuje območje stavbe v pravnem smislu (na primer območje stavbne pravice) ali pa topografski (fizični) model stavbe, ki ustreza določeni stopnji podrobnosti.

Koncept uporabe notranjih prostorov in zunanje geometrije stavbe v 3D-katastru ima pomanjkljivosti pri celoviti obravnavi stavbe v primerih delno zaprtih delov stavb. Tu gre za veliko število različnih primerov, kot so balkoni, lože, delno pokrite terase in atriji, ki prinašajo širšo dilemo glede vprašanja,

kaj spada k stavbi in kaj ne. Predlagani podatkovni model lahko uporabimo tudi za 3D-modeliranje takšnih »mejnih« območij (slika 6), podobno kot je to rešeno v Atazadeh in sod. (2017).



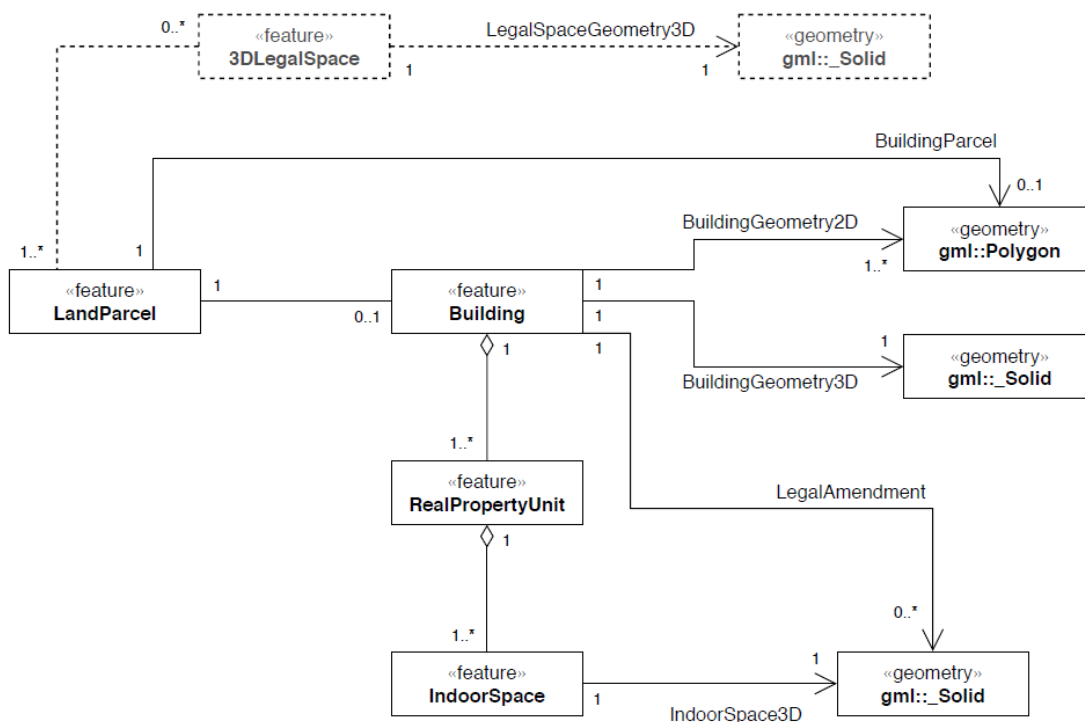
Slika 6: Primer 3D-katastrskega modela stavbe z dodatno vključeno 3D-geometrijo balkona.

Figure 6: An example of the building geometry with legal amendment (balcony space).

Osnova katastrskih informacijskih sistemov je podatkovna baza, ki omogoča učinkovito in varno shranjevanje ter upravljanje velike količine podatkov. Uporaba podatkovne baze za izvedbo oziroma implementacijo predlaganega podatkovnega modela, kar je opredeljeno v našem četrtem cilju, tako omogoča združljivost z obstoječimi rešitvami in postopni razvoj sistemov v smeri 3D-katastra. Za izvedbo podatkovnega modela smo izbrali podatkovno bazo PostgreSQL z razširitvama PostGIS in SFCGAL (SFCGAL, 2020). Izbrana podatkovna baza zagotavlja podatkovne tipe za 3D-prostorske podatke, vključno s prostorninskimi 3D-geometrijami, in funkcije, ki omogočajo upravljanje in analize shranjenih 3D-katastrskih podatkov.

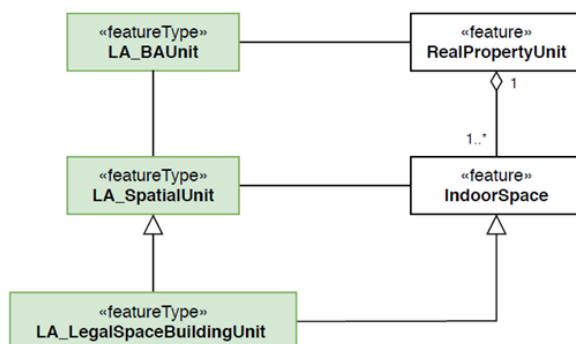
3.3 Rezultati

Na podlagi opisanih izhodišč smo razvili konceptualni model z osnovnimi objekti in njihovimi povezavami (slika 7). V primerjavi s konceptualnim modelom LADM ali 3DCDM (Aien in sod., 2013) je predlagani model po obsegu manjši, saj v osnovi ni zasnovan kot celovit in popoln model 3D-katastra, ampak je namenjen predstavitvi osnovne ideje o uporabi notranjega prostora kot osnovnega prostorskega elementa za modeliranje nepremičninskih enot na primeru stavb.



Slika 7: Konceptualni model 3D-katastra za stavbe.
 Figure 7: The concept of the proposed cadastral data model for buildings.

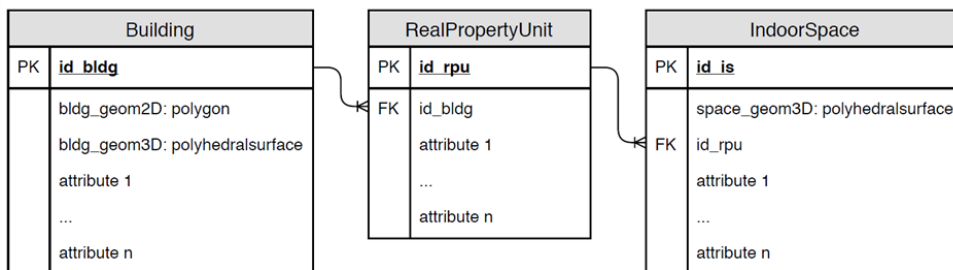
Predstavljeni konceptualni model je zasnovan tako, da ga je mogoče povezati s konceptualnim modelom standarda LADM (slika 8), a med njima obstajajo nekatere razlike. Standard LADM izrecno zavrača neposredno enačenje prostorskih elementov pravnega pomena z elementi fizičnega prostora (Lemmen, Oosterom in Bennett, 2015). Razlika med njima je tudi v vrsti geometrije, saj LADM za 3D-objekte predvideva uporabo mejnih ploskev, medtem ko predlagani model uporablja prostorninske 3D-geometrije.



Slika 8: Povezava predlaganega modela (belo) s konceptualnim modelom standarda LADM (zeleno).
 Figure 8: The relation of the proposed cadastral data model (white) and LADM (green) classes.

Na podlagi predlaganega konceptualnega modela smo razvili logični model, ki omogoča izvedbo v podatkovni bazi. V ta namen smo uporabili podatkovno bazo PostgreSQL, ki z razširitvama PostGIS in

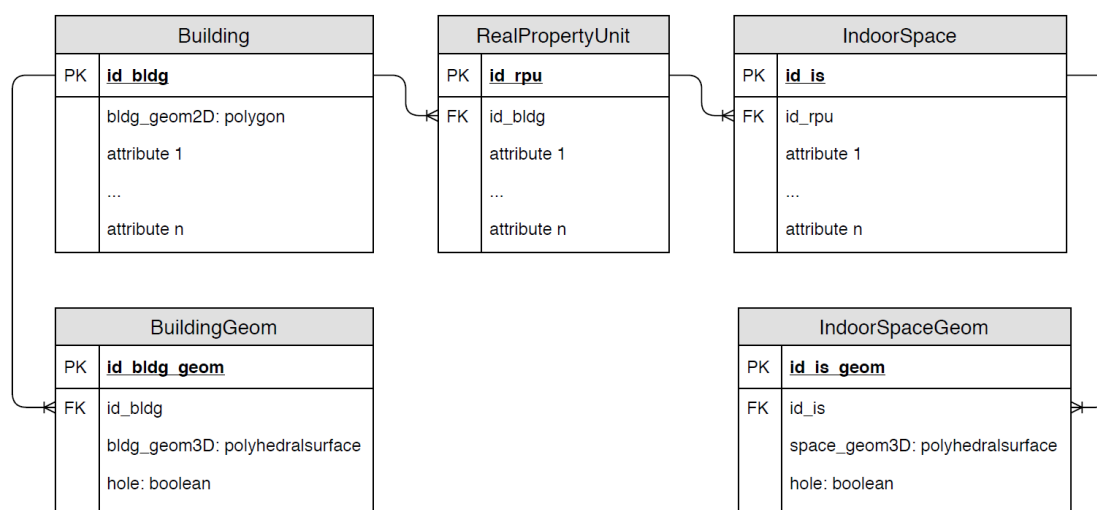
SFCGAL zagotavlja podatkovne vrste za zapis 3D-geometrij. Logični model sestavljajo tri tabele (slika 9), ki opredeljujejo tri osnovne elemente konceptualnega modela (stavba, nepremičninska enota in prostor).



Slika 9: SUPB izvedba logičnega model 3D-katastra za stavbe.

Figure 9: DBMS implementation of the proposed cadastral data model.

Logični model je zasnovan v osnovni obliki, ki dovoljuje dopolnitve v obliki dodatnih atributov, predvidenih za shranjevanje. Slednje je odvisno od sistema in pravne ureditve katastra v posamezni državi. Izbrana podatkovna baza omogoča shranjevanje prostorninskih 3D-geometrij, a ima omejitve pri geometrijah, ki imajo v svoji notranjosti luknje oziroma prazne prostore. Shranjevanje podatkov o takšnih 3D-geometrijah je sicer mogoče, a težava je v tem, da funkcije, ki uporabljajo prostorninske 3D-geometrije, javijo napako in se ne izvedejo. Če podatkovni model upošteva osnovno idejo, ki predvideva, da je notranji prostor omejen s fizičnimi elementi stavbe, se navedeni težavi izognemo, saj bi morali v primeru notranje luknje posamezni fizični elementi stavbe »lebdeti« v zraku. Če vseeno obstaja potreba po modeliranju notranjih lukenj, je logični model mogoče razširiti tako, da se podatki o 3D-geometrijah prostorov in stavb shranjujejo v ločeni tabeli (slika 10). 3D-geometrija z luknjami je tako lahko shranjena v več delih kot zunanji ovoj in poljubno število notranjih lukenj.



Slika 10: Razširitev osnovnega logičnega modela, ki omogoča shranjevanje 3D-geometrij z notranjimi luknjami.

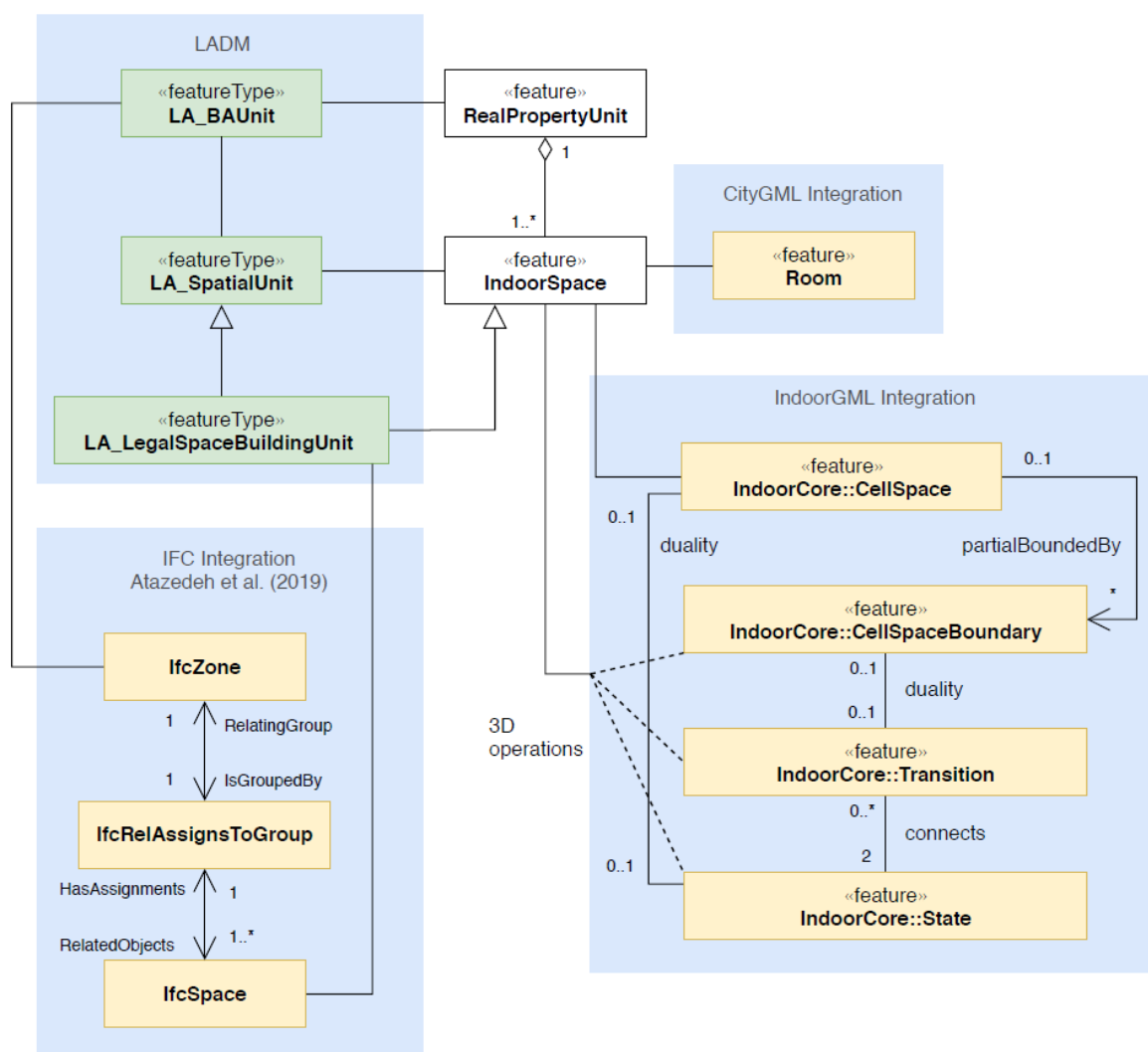
Figure 10: DBMS implementation allowing storage of solids with holes.

V uvodu predstavljeni osnovni namen uporabe notranjega prostora kot osnovnega prostorskega elementa podatkovnega modela v 3D-katastru je, da omogoča povezovanje podatkov s podatkovnimi modeli zunaj domene katastra. V okviru raziskave smo podatkovni model na konceptualni ravni povezali s tremi standardiziranimi podatkovnimi modeli, to so IFC, CityGML in IndoorGML, ki so namenjeni modeliranju fizičnih elementov stavb. Povezovanje področij BIM in 3D-katastrov je v zadnjih letih predmet številnih raziskav (El-Mekawy and Ostman, 2012; Liu in sod., 2017; Oldfield in sod., 2017; Rajabifard, Atazadeh in Kalantari, 2018; Atazadeh in sod., 2019). Avtorji ugotavljajo, da je element *IfcSpace* podatkovnega modela IFC ključni element za povezovanje s katastrskimi podatki. Atazadeh in sod. (2019) predlagajo uporabo elementov IFC, podrobneje *IfcSpace* in *IfcZone*, za povezavo z elementi LADM. Na podlagi te povezave in povezave predlaganega podatkovnega modela z istimi elementi podatkovnega modela LADM smo na konceptualni ravni razvili povezavo med IFC in predlaganim podatkovnim modelom 3D-katastra (slika 11).

Standard CityGML združenja OGC (angl. *Open Geospatial Consortium*) je danes prevladujoč standard za 3D-topografsko modeliranje. Podatkovni model je razdeljen na več modulov, od katerih je najbolj obširen in podroben modul za 3D-modeliranje stavb. Podatkovni model CityGML omogoča 3D-modeliranje topografskih elementov z različnimi stopnjami podrobnosti (angl. *level of detail* – LOD). Stavbo je tako mogoče modelirati le z 2D-poligonom na ustrezni višini, pa vse do zelo podrobnega 3D-modela, ki vključuje podatke o notranjosti stavbe. Tudi glede povezovanja 3D-katastra s standardom CityGML so bile opravljene številne raziskave (Çağdaş, 2012; Gózdź in sod., 2014; Li in sod., 2016; Ying in sod., 2017). V trenutni različici (CityGML 2.0) standard predvideva vključevanje elementov notranjosti le na najvišji stopnji podrobnosti LOD 4, ki z izjemo nekaj testnih podatkovnih nizov ni v praktični uporabi. Predlagani podatkovni model je tako mogoče povezati s podatkovnim modelom CityGML le pri stopnji podrobnosti LOD 4 (slika 11), ko je v model mogoče vključiti element Room (soba oziroma prostor). Druga možnost povezave predlaganega podatkovnega modela in podatkovnega modela CityGML je na osnovi zunanje geometrije, ki pa je mogoča na vseh stopnjah podrobnosti.

Drugi standard OGC, ki smo ga povezali s predlaganim podatkovnim modelom, je standard IndoorGML, katerega osnovni namen je zagotavljanje podatkovne podpore navigaciji v notranjosti stavb. V primerjavi s podatkovnima modeloma IFC in CityGML je podatkovni model standarda IndoorGML manj obsežen. V izogib ponavljanju standard predvideva možnost povezave na geometrijske elemente standardov IFC in CityGML, a zaradi celovitosti ohranja tudi definicijo geometrijskih elementov. Zlatanova in sod. (2016) ter Alattas in sod. (2017) so obravnavali povezavo med standardoma LADM in IndoorGML. Povezavo uporabljajo za semantično obogatitev podatkovnega modela IndoorGML, kar v model prinaša dodatne informacije in s tem bolj kakovostno izvedbo navigacije. Tudi Rajabifard, Atazadeh in Kalantari (2018) so obravnavali možnosti povezovanja omenjenih standardov in ugotovili, da je notranje prostore v obliki celic standarda IndoorGML mogoče

uporabiti za določevanje geometrije nepremičninskih enot, a poudarjajo, da so za to potrebne kompleksne 3D-analize. Naša raziskava povzema to idejo in rešuje težavo glede kompleksnih 3D-analiz z izvedbo podatkovnega modela v podatkovni bazi PostgreSQL z razširitvama PostGIS in SFCGAL. Ta omogoča shranjevanje in upravljanje podatkov o 3D-geometriji, skupaj z možnostmi za izvedbo kompleksnih 3D-analiz. Osnovni element standarda IndoorGML je notranji prostor v obliki celice (element *CellSpace*), kar je usklajeno s predlaganim modelom 3D-katastra. Poleg 3D-celic, ki opredeljujejo prostore, vsebuje podatkovni model IndoorGML tudi elemente grafa povezljivosti v obliki vozlišč in povezav, ki so realizirani po načelu dualnosti. Predlagani model 3D-katastra je zasnovan tako, da je mogoče z uporabo 3D-funkcij pridobiti elemente grafa povezljivosti (slika 11). To pomeni, da je mogoče z uporabo ustreznih procesov transformacij in 3D-funkcij iz podatkov predlaganega 3D-katastrskega modela pridobiti podatke, zapisane v skladu s podatkovnim modelom IndoorGML.



Slika 11: Zasnova povezave predlaganega podatkovnega modela s standardi IFC, CityGML in IndoorGML.

Figure 11: The concept of the integration of the proposed data model with the IFC, CityGML and IndoorGML standards.

3.4 Razprava

Čeprav je v raziskavi utemeljena smiselnost omejitve nepremičninskih enot na obseg prostorov v stavbi, lahko predlagani pristop modeliranja stavb pomeni preveliko omejitev za posamezne pravne ureditve. Pomembno je, da je mogoče tudi druge elemente stavbe vključiti v podatkovni model na isti način kot prostore, torej kot prostorninske 3D-objekte, ki jim pripišemo pripadnost nepremičninski enoti. Če želimo ohraniti možnost povezave z drugimi standardnimi podatkovnimi modeli, je treba zagotoviti informacijo, ki ločuje prostore od ostalih elementov. S to rešitvijo je mogoče vključiti meje nepremičninskih enot na sredini ali zunanji strani stene.

Obravnavano povezovanje podatkovnega modela za 3D-kataster s standardnimi podatkovnimi modeli je pomembno tako z vidika pridobivanja podatkov za registracijo pravnih dejstev v 3D-katastru kot tudi z vidika vključevanja podatkov 3D-katastra v podatkovne nize z drugih področij. Povezovanje na podlagi pomensko nesorodnih elementov je izjemno težavno in lahko vodi v napačno interpretacijo podatkov, zato je ključnega pomena, da v podatkovnih modelih uporabljamo elemente, ki so pomensko sorodni in tako omogočajo pravilno povezovanje in izmenjavo podatkov. Možnost povezovanja katastra s podatki drugih domen odpira nove možnosti za uporabo podatkov, kar je osnovna ideja večnamenskega 3D-katastra.

Predlagani podatkovni model 3D-katastra temelji na prostorninskih 3D-geometrijah prostorov, ki se med seboj dotikajo na prehodih, kjer imajo te geometrije skupne ploskve. Izvedba tako zasnovanega modela 3D-katastra v podatkovni bazi vsak prostor obravnava ločeno, zato se na ploskvah, ki se dotikajo, pojavljajo podvajanja. Slednje ima lahko negativne posledice zaradi večje potrebe po zmogljivosti shranjevanja podatkov. Povečajo se možnosti za neskladnost med podatki. Ima pa ta pristop tudi prednosti, saj je mogoče v takšni obliki shranjene 3D-geometrije upravljati in analizirati s 3D-funkcijami, ki so na voljo v podatkovni bazi. 3D-geometrije prostorov so vedno na voljo kot celota in so lahko shranjene skupaj s pripadajočimi atributnimi podatki. Večja občutljivost za neskladja in nepravilnosti zahteva uvedbo preverjanja zapisov ob vpisu novih podatkov ali njihovi spremembi. Izbrana rešitev za izvedbo podatkovne baze zagotavlja funkcije, s katerimi je to mogoče zagotoviti.

3.5 Prispevek k znanosti

Rezultati, predstavljeni v tem poglavju in obravnavanem članku (Tekavec, Čeh in Lisec, 2020), uvajajo nov pristop k modeliranju 3D-katastrskih podatkov, ki se razlikuje od predhodno objavljenih raziskav. Razviti 3D-katastrski konceptualni model je zasnovan kot osnova, na podlagi katere je mogoče razviti 3D-katastrski sistem. Pri tem pa je koncept nepremičninske enote za primer stavbe razvit tako, da ga je mogoče prilagoditi različnim pravnim sistemom. Dodano vrednost rezultatov tega dela raziskave je

poglobljena diskusija o osnovnih idejah in ciljih razvoja 3D-katastrskega podatkovnega modela, ki celovito obravnava problematiko razvoja 3D-katastra. Ta je lahko v pomoč številnim katastrskim institucijam po svetu, ki izvajajo dejavnosti v smeri uvedbe 3D-katastra. Na koncu velja poudariti predstavljene povezave zasnove katastrskega podatkovnega modela s standardnimi geoprostorskimi podatkovnimi modeli, kar je pomemben prispevek k razvoju večnamenskega 3D-katastra.

»Ta stran je namenoma prazna«

4 KATASTRSKI PODATKI KOT VIR ZA 3D-MODELIRANJE NOTRANJOSTI STAVB

Vsebina poglavja povzema izvorni znanstveni članek v prilogi C (Tekavec in Lisec, 2020a), kjer obravnavamo možnosti uporabe obstoječih katastrskih podatkov za 3D-modeliranje stavb v okviru razvoja večnamenskega 3D-katastra. Za namene 3D-modeliranja stavb smo izhajali iz obstoječih katastrskih podatkov o notranjosti stavb, to je iz etažnih načrtov. Pri tem smo posebno pozornost namenili ideji večnamenskega 3D-katastra, kjer smo predvidevali predvsem možnost uporabe podatkov za namen navigacije v notranjosti stavbe.

4.1 Ideja in teoretično ozadje

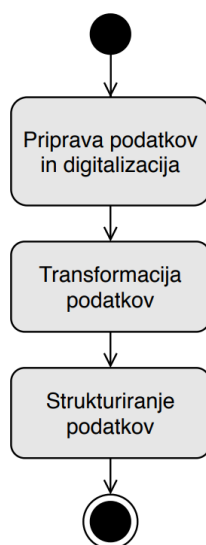
V primerjavi z 2D-prostorskimi podatki so 3D-prostorski podatki po strukturi in vsebini bogatejši, kar poleg novih priložnosti prinaša tudi izzive za razvijalce. Ena od glavnih težav pri tem je zahtevnost 3D-modeliranja stavb in drugih prostorskih entitet ter s tem povezani stroški. Pojavlja se potreba po povezovanju različnih področij tako na ravni podatkov kot tudi na ravni procesov. Na področju geoinformatike je najaktualnejše povezovanje s področjem BIM (Liu in sod., 2017). Povezovanje podatkov in procesov različnih področij je osnovna ideja večnamenskega 3D-katastra, katerega podatki so uporabni tudi na področjih zunaj njegove osnovne domene.

Pri tem velja izpostaviti napredek na področju tehnologij daljinskega zaznavanja, ki je omogočil učinkovito pridobivanje kakovostnih prostorskih podatkov za večja območja. V kombinaciji s tehnologijo globalnih navigacijskih satelitskih sistemov GNSS so ti podatki omogočili razvoj številnih tržno uspešnih lokacijskih storitev (Huang in sod., 2018). Obe navedeni tehnologiji omogočata široko uporabo na prostem, v notranjosti stavb pa sta obe zelo omejeni. Stroški pridobivanja podatkov o notranjosti obstoječih stavb so zaradi tehnoloških omejitev relativno visoki. Posledično so tudi lokacijske storitve v notranjosti stavb redke, njihova uporabnost pa zelo omejena. Glede na dejstvo, da ljudje v povprečju večino časa preživijo v notranjosti stavb, je potencial lokacijskih storitev v notranjosti stavb zelo velik.

Raziskava, predstavljena v članku Tekavec in Lisec (2020a) (priloga C), temelji na ideji večnamenskega 3D-katastra. Vzpostavljena je povezava 3D-katastra s področjem navigacije v notranjosti stavb. Pri tem smo analizirali in uporabili 2D-katastrske podatke o stavbah za namen pretvorbe v 3D-podatkovni model. Zasnovan 3D-model stavbe lahko služi kot podatkovna osnova za lokacijske storitve v notranjosti stavb, saj je usklajen z OGC standardom IndoorGML. Vhodni podatki so v obliki 2D-etažnih načrtov, ki so osnova za registracijo pravnih dejstev na stavbah v številnih državah po svetu. S tem smo opredelili pretvorbo podatkov obstoječih katastrov v podatke večnamenskega 3D-katastrskega sistema.

4.2 Metodologija raziskave

Jedro raziskave je razvoj koncepta 3D-modeliranja stavb na podlagi obstoječih 2D-katastrskih podatkov v obliki etažnih načrtov. Koncept je sestavljen iz treh povezanih, a vsebinsko ločenih delov. Pri razvoju smo težili k uporabi procesov, ki jih je mogoče avtomatizirati in s tem zmanjšati zahtevnost izvedbe koncepta. Koncept je razvit v obliki diagramov aktivnosti standardnega jezika za modeliranje UML (angl. *Unified Modelling Language*), ki omogočajo izvedbo, neodvisno od programske rešitve (slika 12).



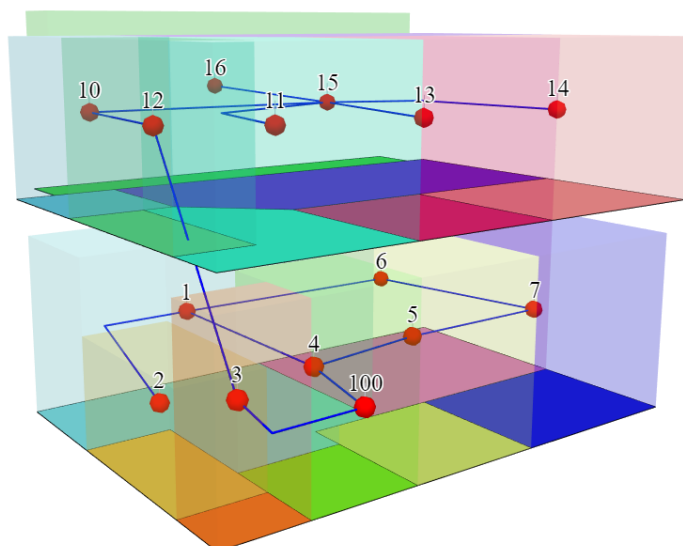
Slika 12: Splošen UML-diagram aktivnosti za 3D-modeliranje obstoječih 2D-katastrskih podatkov.

Figure 12: Generalized UML activity diagram of the proposed framework.

Vhodne podatke v obliki rastrskih 2D-etažnih načrtov smo v prvi fazi s postopkom digitalizacije pretvorili v digitalno vektorsko obliko. Obrisi prostorov so digitalizirani kot poligoni, dodatno pa so digitalno opredeljeni centriodi poligonov in linije povezav med centriodi prostorov (vozlišči), ki so med seboj fizično povezani. Tem podatkom smo dodali atributne podatke, ki v drugi fazi omogočijo pretvorbo v 3D-podatkovni model. Na koncu te faze je podatke mogoče shraniti v 2D-obliki, ki omogoča izvedbo nadaljnjih faz po potrebi oziroma na zahtevo.

Druga faza obsega združevanje podatkov, ki so bili digitalizirani ločeno po etažah. Ob uporabi atributnih podatkov o višinah poligone s postopkom izvečenja preoblikujemo v 3D-prostorninske gradnike. Na podlagi povezave med identifikatorji poligonov, povezav in vozlišč je tudi vozlišča in povezave mogoče postaviti v 3D-prostor (slika 13). Raziskava je usmerjena v končno pridobitev modela, ki ustreza standardu IndoorGML, zato so v tej fazi z medsebojnim združevanjem identifikatorjev poligonov, povezav in vozlišč ustvarjeni atributi, ki vzpostavljajo medsebojne povezave med njimi (na primer identifikatorji povezav, ki so povezane na posamezno vozlišče). Podatke je mogoče shraniti v podatkovno bazo v skladu z eno od dveh predlaganih 3D-podatkovnih shem. Prva ohranja 2D-

geometrijske elemente, a so ti shranjeni na ustreznih višinah (gre torej za shranjevanje 2D-geometrijskih elementov v 3D-prostoru). Druga podatkovna shema pa za prostore predvideva shranjevanje v obliki 3D-prostorninske geometrije, a zaradi pomanjkanja programske podpore za 3D-geometrijo ohranja tudi shranjevanje 2D-poligonov.



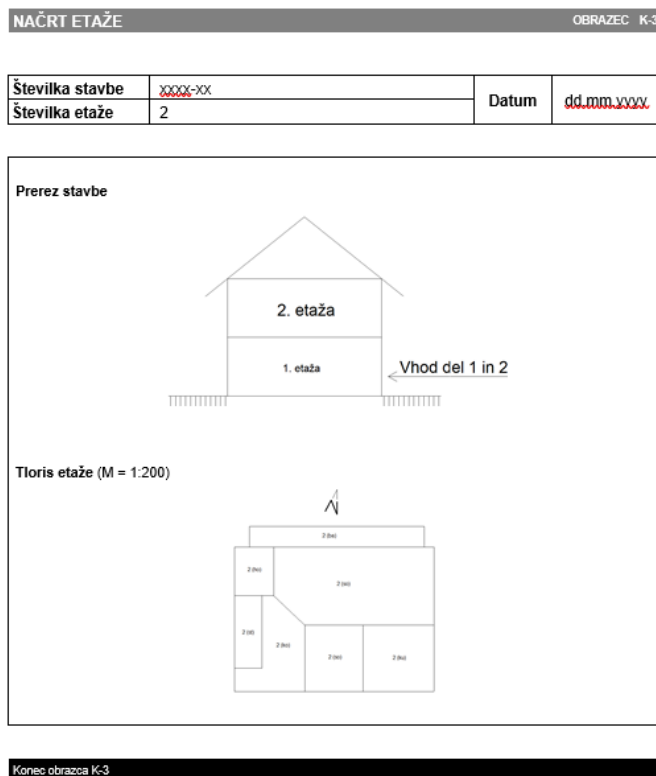
Slika 13: 3D-prikaz transformiranih podatkov v obliki 3D-prostorninskih geometrij prostorov in 3D-grafa povezljivosti.

Figure 13: 3D visualization of the transformed data – 3D volumetric geometries of spaces and 3D connectivity graph.

Zadnja, tretja faza obsega strukturiranje in zapis podatkov v skladu s standardom IndoorGML. Vse elemente je treba pretvoriti v zapis XML (angl. *eXtensible Markup Language*) in jih pravilno umestiti v hierarhijo elementov XML, kot jo predvideva standard. Geometrija prostorov, povezav in vozlišč je v dokumentu XML zapisana v skladu s standardiziranim jezikom GML (angl. *Geography Markup Language*) (ISO, 2007).

4.3 Rezultati

Koncept je izveden s programsko opremo GIS (QGIS) in ETL (FME Desktop), kar omogoča visoko mero avtomatizacije celotnega procesa. Vhodni podatek je etažni načrt stanovanjske hiše po vzoru etažnih načrtov, ki jih najdemo v slovenskem katastru stavb pred prehodom na shranjevanje etažnih načrtov v digitalni vektorski obliki (slika 14).



Slika 14: Primer etažnega načrta po vzoru načrtov v slovenskem katastru stavb.

Figure 14: Sample document of Slovenian Building Cadastre containing the building floor plan.

V drugem delu raziskave je razviti koncept uporabljen za analizo strukture in vsebine vhodnih podatkov. Vsi procesi v posamezni fazi so analizirani glede možnosti avtomatizacije. Z vidika analize uporabnosti katastrskih podatkov za 3D-modeliranje je pomembna predvsem prva faza priprave podatkov in digitalizacije, kjer je potreba po dodatnih podatkih in dodatnem delu največja. Med ključne podatke v prvi fazi spadajo višine posameznih etaž (višina tal in stropov) in povezljivost med prostori. Skupaj z digitalizacijo ti podatki omogočijo samodejno izvedbo druge in tretje faze.

4.4 Razprava

Uporabljen podatkovni model temelji na uporabi prostorninskih teles za 3D-modeliranje prostorov in s tem sledi podatkovnemu modelu, ki je predstavljen v tretjem poglavju. Glede načina modeliranja etažne načrte v grobem delimo na takšne, ki upoštevajo debelino sten, in takšne, ki sten in drugih konstrukcijskih elementov ne upoštevajo. Etažni načrti v katastrskih sistemih, vključno s slovenskim, so pogosto izdelani tako, da ne upoštevajo debeline sten. Podatkovni model tako z namenom univerzalnosti dopušča stikanje na vseh skupnih površinah, ne le na prehodih. Topološki odnosi med prostori so dodatno eksplicitno modelirani v obliki grafa povezljivosti z vozlišči in povezavami. Če vhodni 2D-etažni načrti upoštevajo debelino sten in vsebujejo lokacije prehodov med prostori, potem je podatke mogoče zapisati v skladu s podatkovnim modelom iz tretjega poglavja. V tem primeru ni treba

eksplicitno modelirati topoloških odnosov, saj je graf povezljivosti mogoče pridobiti z geometrijskimi funkcijami, kot je to podrobneje predstavljeno v šestem poglavju.

Na podlagi rezultatov raziskave lahko ugotovimo, da različne vsebine in struktura obstoječih katastrskih podatkov o stavbah pomembno vplivajo na proces pretvorbe obstoječih podatkov v 3D-podatkovni model. Razlike nastajajo predvsem pri manjkajočih oziroma pomanjkljivih podatkih, ki jih je treba pridobiti z dodatno izmero na terenu. Končni rezultat v obliki 3D-modela je v prvi vrsti odvisen od vrste in podrobnosti 2D-etažnega načrta. Če imamo v stavbi prostore s kompleksnejšo obliko (poševen strop, različne višine stropa), lahko prihaja tudi do medsebojnega sekanka 3D-geometrijskih prostorov.

Za primer navigacije v notranjosti stavb vsebujejo 3D-modeli v primerjavi z 2D-modeli dodatne informacije o višinah posameznih elementov, ki lahko služijo za opredelitev uteži v grafu povezljivosti in klasifikacijo prehodnosti za določen tip premikanja (hoja, invalidski voziček, viličar ipd.).

4.5 Prispevek k znanosti

Najpomembnejši prispevek obravnavanega dela raziskave je razvoj celotnega postopka za 3D-modeliranje stavb na podlagi 2D-katastrskih etažnih načrtov. Postopek je modeliran z diagrami aktivnosti UML, kar omogoča programsko neodvisno izvedbo. Raziskava vzpostavlja povezavo med področjema katastrov in navigacije v notranjosti stavb, kjer je kataster obravnavan kot podatkovni vir. S tem raziskava naslavlja aktualen in pereč problem pomanjkanja podatkov o notranjosti stavb.

Razviti proces pretvorbe podatkov je poleg obravnavanega namena uporaben tudi za analizo obstoječih katastrskih podatkov, saj omogoča identifikacijo ključnih manjkajočih oziroma pomanjkljivih podatkov oziroma informacij za izdelavo 3D-modelov stavb na podlagi obstoječih katastrskih podatkov. Rezultati raziskave lahko s tem pomembno prispevajo k postopnemu in usmerjenemu razvoju obstoječih sistemov v smeri 3D-katastra.

»Ta stran je namenoma prazna«

5 SIMULACIJA PODATKOV 3D-KATASTRA S PROCEDURALNIM MODELIRANJEM

Vsebina poglavja povzema izvorni znanstveni članek v prilogi D (Tekavec, Lisec in Rodrigues, 2020). Glavni namen raziskave je bil simulirati obsežno podatkovno bazo s 3D-modeli stavb, skladnimi s koncepti 3D-katastra, ter tako oceniti zahtevane procesne zmogljivosti informacijskega sistema s 3D-modeli stavb.

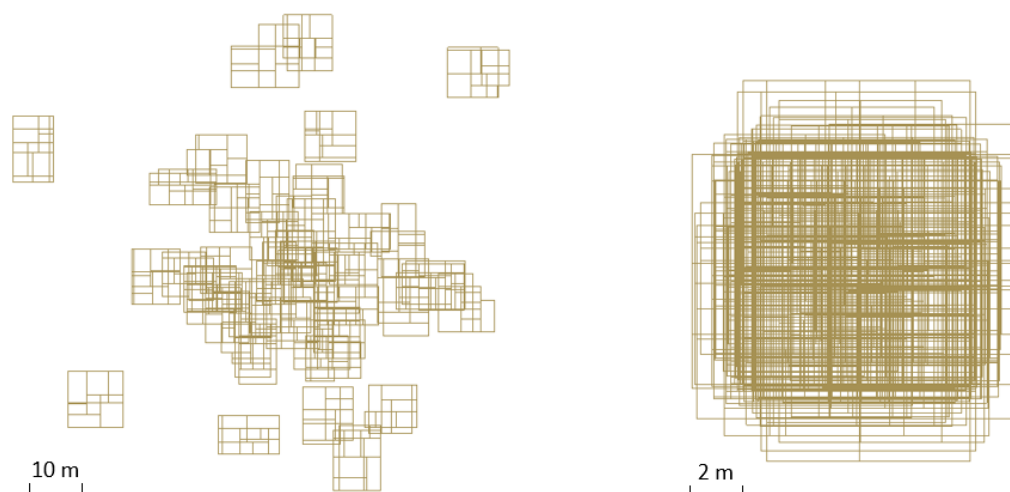
5.1 Ideja in teoretično ozadje

Številne raziskave na področju 3D-katastrov za prikaz izvedljivosti in predstavitev rešitev uporabljajo študije primerov, ki so izvedene na omejenem številu primerov stavb in drugih prostorskih entitet, relevantnih za 3D-kataster. Posledično se pri razvoju informacijskih sistemov za 3D-kataster srečamo z omejitvami glede podatkov, ki jih imamo na voljo za izvedbo najrazličnejših testov zmogljivosti in učinkovitosti informacijskih sistemov. Pri tako kompleksnih sistemih je treba posamezne komponente informacijskih sistemov preizkusiti na podatkih, ki so po obsegu in vsebini čim bolj primerljivi s predvidenimi podatki.

Trenutno nobena država na svetu nima polno delujočega 3D-katastrskega sistema, z izjemo manjših pilotnih projektov in prototipov (Kalogianni in sod., 2020). To pomeni, da dejanski 3D-katastrski podatki za večje območje ne obstajajo. V okviru raziskave, predstavljene v članku Tekavec, Lisec in Rodrigues (2020) (priloga D), smo razvili postopek za simulacijo večje količine 3D-katastrskih podatkov, ki so po obsegu in obliki primerljivi z dejanskimi podatki za območje Slovenije.

5.2 Metodologija raziskave

Raziskava temelji na uporabi proceduralnega modeliranja notranjih prostorov stavb (Rodrigues Gaspar in Gomes, 2013). S tem postopkom je mogoče pridobiti različne kombinacije in razporeditve prostorov stavb, ki jih usmerjamo z določitvijo parametrov. Razvili smo postopke transformacij generiranih podatkov, ki omogočijo zapis v skladu s podatkovnim modelom za 3D-modele stavb, predlaganim v doktorski disertaciji (priloga B), in s tem simulacijo 3D-katastrskih podatkov. Vsak prostor je najprej pretvorjen v prostorninsko telo, ki mu lahko določimo pripadnost posamezni nepremičninski entiti. Sledi horizontalni premik vsakega generiranega 3D-modela stavbe v koordinatno izhodišče (slika 15). Vektor premika določimo z izračunom geometrijskega središča posameznega modela.



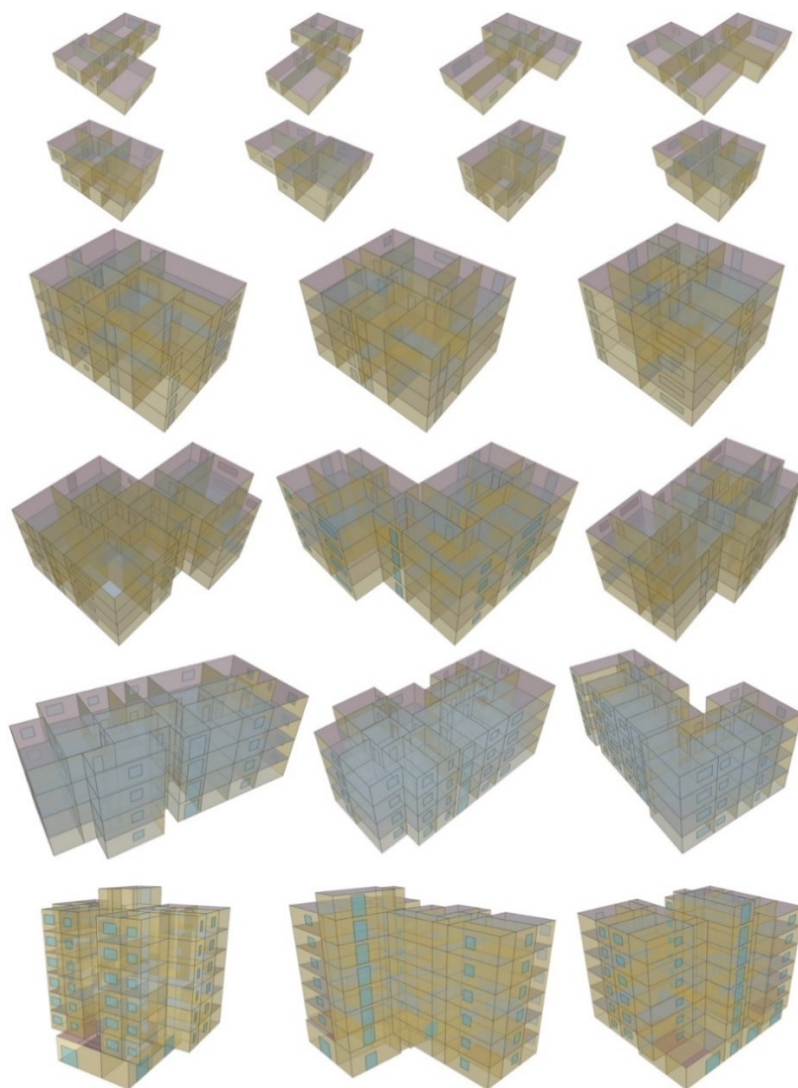
Slika 15: Prvotna lokacija generiranih 3D-modelov stavb (levo) in lokacija po premiku v izhodišče lokalnega koordinatnega sistema (desno).

Figure 15: Original placement of generated 3D building models (left) and the models after their placement to the local coordinate system origin (right).

3D-model zunanosti posamezne generirane stavbe je določen na podlagi 3D-geometrij notranjih prostorov. V prvem koraku je določen 2D-poligon obrisa prostorov, ki je povečan z vmesnim območjem. Z vertikalnim izvlečenjem poligona pridobimo prostorninski 3D-model zunanosti objekta. Vsi podatki so po opisanih transformacijah zapisani v podatkovno bazo PostgreSQL, kjer je izvedena povezava generiranih podatkov s stvarnimi podatki o stavbah na študijskem območju. Poleg dveh tabel (prostor in stavbe) so v podatkovni bazi shranjeni tudi dejanski podatki o stavbah na študijskem območju v obliki 2D-poligonov z atributnimi podatki. Predpostavljeno je, da za vsako stavbo obstaja podatek o številu etaž. Razvili smo postopek, ki vsaki obstoječi stavbi – podatke smo pridobili iz katastra stavb – pripiše naključni proceduralno generiran 3D-model stavbe z dejanskim številom etaž. Povezani podatki so zapisani v dve tabeli, od katerih ena vsebuje generirane 3D-modele zunanosti in ena generirane 3D-modele notranosti stavb v obliki notranjih prostorov. Vsak povezan 3D-model stavbe je premaknjen na položaj dejanske stavbe po podatkih katastra stavb. Vektor premika je določen z določitvijo centroida poligona dejanske stavbe in centroida generiranega 3D-modela stavbe.

5.3 Rezultati

Kot testno območje smo vzeli območje celotne Slovenije in za namen naloge pridobili podatke slovenskega katastra stavb. V okviru raziskave smo se osredotočili na stanovanjski tip objektov. Določili smo vzorce generiranih stavb z 1, 2, 4 in 8 etažami (slika 16). Izbira števila etaž izhaja iz analize podatkov katastra stavb, iz katere izhaja, da ima 94 % stavb v Sloveniji od 1 do 4 etaže.



Slika 16: Primeri različnih proceduralno generiranih 3D-modelov stavb od enonadstropne in dvonadstropne družinske hiše (1. in 2. vrsta) do večetažnih stavb z mešano rabo (od 3. do 6. vrste).

Figure 16: Examples of the generated buildings ranging from the single and two-storey family house (first two rows) to multi-storey mixed-use apartment buildings (from 3rd to 6th rows).

Čas generiranja vzorca 3D-modelov je glede na število etaž znašal od 49 minut (za modele z eno etažo) do 15 ur (za modele z osmimi etažami) na računalniku z 2.8 GHz Dual-Core procesorjem in 8 GB delovnega pomnilnika. Simulacija 3D-katastrskega sistema (transformacija in povezava na dejanske katastrske podatke) je bila izvedena na računalniku z i7-8700 procesorjem in 32 GB delovnega pomnilnika. Transformacija generiranih 3D-modelov je trajala od 3 minut za modele z eno etažo do 37 minut za modele z osmimi etažami. Čas povezovanja z dejanskimi katastrskimi podatki je za 3D-modele zunanosti znašal 2 minuti in 44 sekund (512.191 modelov), za 3D-modele notranosti pa 12 minut in 35 sekund (10.985.775 3D-modelov prostorov).

S simuliranimi podatki smo izvedli tri vrste 3D-analiz, ki so namenjene odkrivanju napak v podatkih in segajo na področje upravljanja 3D-katastrskih podatkov. Pri prvi analizi smo iskali 3D-geometrije

zunanosti stavb, ki se med seboj sekajo. 3D-geometrija zunanosti stavbe lahko predstavlja 3D-območje pravnih dejstev (RRR) ali 3D-geometrijo fizičnega objekta. V posameznih primerih je lahko dovoljeno dotikanje 3D-geometrij, sekanje pa je napaka. Za analize smo uporabili funkcijo SFCGAL *ST_3DIntersects*. Poizvedba SQL, ki vključuje navedeno funkcijo, je za preverjanje celotne tabele simuliranih stavb (512.191 3D-modelov) potrebovala 2 minuti in odkrila 128.812 presekov. Druga analiza je enaka prvi, le da je iskanje presekov izvedeno s tabelo simuliranih prostorov. Poizvedba SQL je sestavljena tako, da išče preseke prostorov le znotraj posamezne stavbe. Tu se pojavi omejitev uporabe funkcije *ST_3DIntersects*, saj je zaradi medsebojnega dotikanja funkcija kot sekajoče identificirala vse sosednje prostore. Rešitev je v dodajanju funkcije SFCGAL *ST_3DIntersection*, ki izračuna prostornino preseka. Če je prostornina enaka nič, gre za dotikanje. Težava je v tem, da gre za procesno zelo zahtevno funkcijo. V drugo analizo smo tako vključili le eno stavbo s štirimi etažami, za katero je analiza zahtevala 10 minut. Zaradi medsebojnega dotikanja sosednjih prostorov smo pri analizi preverili sekanje za kar 389 parov 3D-geometrij prostorov. Pri tretji analizi smo preverili sekanje prostorov z zunanjo geometrijo stavbe. Sekanje bi pomenilo, da zunanja geometrija ne vsebuje vseh prostorov v stavbi. Preverjanje simuliranih podatkov za celotno Slovenijo je zahtevalo 5 ur in 18 minut.

Preizkusili smo tudi dva načina 3D-vizualizacije simuliranih podatkov. Izbrali smo platformi Google Earth in Cesium. Podatke smo s programom FME transformirali v formata KML in Cesium 3D Tiles. Datoteka KML se v 2 urah ni naložila v okolje Google Earth, zato smo poskusili z manjšimi izrezi podatkov s po tisoč stavbami. Čas nalaganja v okolje Google Earth se je zmanjšal na 7 sekund. Ko so bili podatki naloženi v okolje Google Earth, je prikazovanje podatkov delovalo tekoče. Transformacija podatkov v format Cesium 3D Tiles je za simulirane stavbe trajala 6 minut in za simulirane prostore 4 ure ter 35 minut. Platforma Cesium je bila vzpostavljena lokalno na spletnem strežniku Apache Tomcat na istem računalniku, na katerem so bile izvedene simulacija in analize. Uporabili smo spletno rešitev, ki prikaže 3D-podatke na virtualnem globusu. Z rešitvijo Cesium smo učinkovito prikazali simulirane podatke stavb in prostorov teh stavb za celotno Slovenijo. Zaradi razdelitve podatkov na manjša območja poteka nalaganje podatkov sproti glede na trenutni pogled v 3D-pregledovalniku.

5.4 Razprava

Na podlagi rezultatov lahko ugotovimo, da je opisani postopek primeren za simulacijo 3D-podatkov o stavbah na večjem območju. Podatke smo pripravili tako, da so primerljivi z dejanskimi podatki z vidika števila etaž in lokacije stavb.

Pri transformaciji podatkov v programu FME zahteva največ procesnega časa ustvarjanje prostorninskih 3D-geometrij iz vhodnih ploskev. Pri izvedbi prostorskih analiz pomeni težavo glede zahtevnosti ponovno SFCGAL funkcija *ST_3DIntersection*. Ta ob vsaki uporabi najprej preveri obe vhodni 3D-

geometriji za prisotnost napak, kar vzame večino časa njene izvedbe. Če sta vhodni 3D-geometriji že preverjeni, je takšno preverjanje nepotreben proces. Izvedba PostGIS SFCGAL ne dovoljuje izključitve tega preverjanja, zato lahko ugotovimo, da analize, ki uporabljajo funkcijo *ST_3DIntersection*, niso primerne za velike količine 3D-prostorskih podatkov. Takšne analize so primerne za izvedbo preverjanja podatkov ob zapisu v podatkovno bazo, kjer je treba preveriti le na novo vpisani podatkovni niz ter prostorske odnose med njim in sosedji. S preverjanjem podatkov ob vpisu in vsaki spremembi lahko zagotovimo pravilnost vseh podatkov v bazi. Izvedene analize kažejo, da so lahko simulirani 3D-katastrski podatki dobra pomoč pri načrtovanju upravljanja s 3D-podatki v 3D-katastrskem informacijskem sistemu. V rezultatih prve 3D-analize zasledimo, da smo prepoznali 128.812 presekov med 3D-geometrijami stavb. Do presekov prihaja pri manjših stavbah, ki imajo tlorise blizu skupaj. Ker tlorisi proceduralno generiranih 3D-modelov stavb niso usklajeni s tlorisi dejanskih stavb, lahko obseg 3D-modela preseže obseg dejanske stavbe. V prihodnjih raziskavah bi bilo dobro preveriti možnosti proceduralnega modeliranja za notranjost stavb, ki je prostorsko omejeno s tlorisom dejanske stavbe.

5.5 Prispevek k znanosti

Načrtovanje informacijskih sistemov vključuje številna testiranja, kar zahteva tudi oceno zmogljivosti obdelave podatkov tega informacijskega sistema. Na področju 3D-katastrov se pojavlja problem pomanjkanja podatkovnih nizov za večja območja, saj dosedanje študije vključujejo le obdelavo manjše količine testnih primerov. Raziskava naslavlja to pomanjkanje oziroma vrzel v dosedanjih raziskavah s simulacijo 3D-katastrskih podatkov, ki so po količini, obliki in prostorskem obsegu primerljivi z dejanskimi katastrskimi podatki.

Simulirane podatke za celotno Slovenijo smo uporabili za izvedbo 3D-prostorskih analiz, povezanih z upravljanjem 3D-katastrskih podatkov. S tem rezultati raziskave pomembno prispevajo k razvoju načrtovanju informacijskih sistemov za 3D-kataster, predvsem z vidika možnosti analize zmogljivosti obdelave 3D-podatkov. Dodatno so rezultati izrednega pomena z vidika 3D-prostorskih analiz na področju 3D-katastra, kar je tema številnih aktualnih raziskav.

»Ta stran je namenoma prazna«

6 PRIDOBIVANJE GRAFA POVEZLJIVOSTI NA PODLAGI 3D-GEOMETRIJ Z UPORABO SFCGAL

Vsebina poglavja povzema izvorni znanstveni članek v prilogi E (Tekavec in Lisec, 2020b), katerega glavni namen je bil zasnovati 3D-model stavbe, ki je primeren za navigacijo znotraj stavbe. Model je zasnovan na 3D-modelu stavbe, ki je lahko model 3D-katastra, nadgrajen pa je z grafi povezljivosti prostorov, ki so temelj za podporo navigaciji znotraj stavbe. S tem smo pokazali eno izmed možnosti uporabe podatkov 3D-katastra za področje zunaj tradicionalne domene katastra.

6.1 Ideja in teoretično ozadje

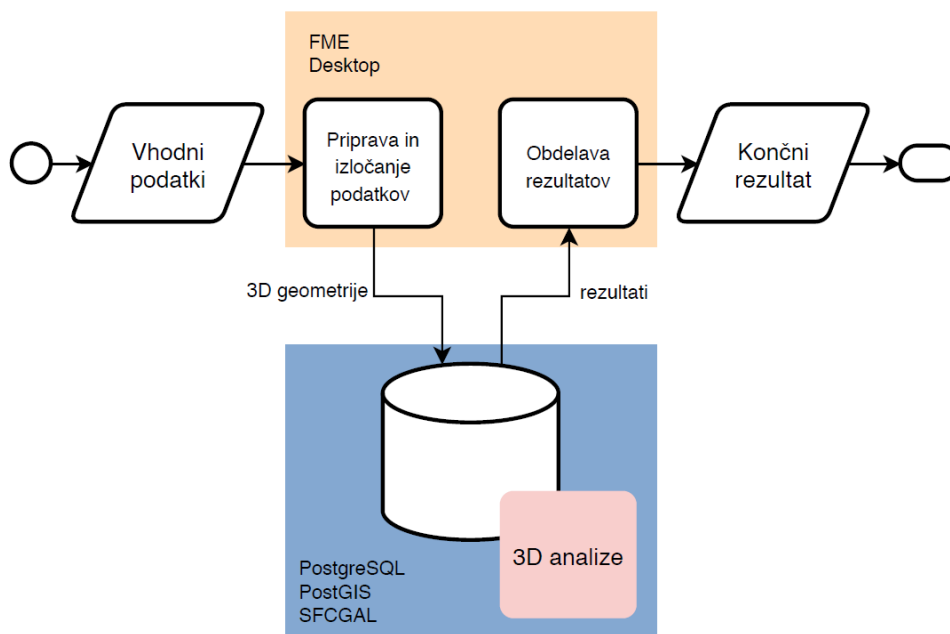
Ključni pogoj za izvedbo navigacije v notranjosti stavb je, poleg določanja položaja, podatkovna osnova v obliki grafa povezljivosti. Iz dosedanjih raziskav na tem področju lahko ugotovimo, da je določanje grafa povezljivosti, ki je uporaben za izvedbo navigacije v notranjosti stavb, sestavljeno iz dveh korakov. V prvem koraku gre za iskanje povezljivosti prostorov, temu sledi podrobnejša določitev grafa povezljivosti znotraj posameznega prostora (Boguslawski in sod., 2016). Pristope določevanja grafov povezljivosti prostorov lahko razdelimo tudi glede na vrsto vhodnih podatkov in glede na vrsto uporabljenih algoritmov, in sicer na rastrske (Lin in sod., 2013; Xu in sod., 2017; Staats in sod., 2019) in vektorske pristope (Yang in Worboys, 2015; Mortari in sod, 2019; Lewandowicz, Lisowski in Flisek, 2019). Le omejeno število raziskav v zadnjem obdobju uporablja za določevanje grafov 3D-podatke o stavbah. Za pridobivanje informacij o povezljivosti med prostori so uporabljeni atributni podatki modela stavbe (Khan, Donaubauer in Kolbe, 2014; Teo in Cho, 2016), ali pa je povezljivost prostorov predvidena kot vhodni podatek (Boguslawski in sod., 2016).

Glavna ideja raziskave je pridobivanje informacij o povezljivosti prostorov na podlagi odnosov med podatki njihovih 3D-geometrij. S tem se je mogoče izogniti odvisnosti modeliranja od atributnih podatkov oziroma ročnemu modeliranju povezljivosti, kar pogosto zasledimo v obstoječi literaturi.

6.2 Metodologija raziskave

Raziskava temelji na uporabi funkcij knjižnice SFCGAL (SFCGAL, 2020), ki omogočajo izvedbo prostorskih analiz s 3D-prostorskimi podatki. S 3D-prostorskimi analizami je mogoče določiti prostorske odnose med 3D-geometrijami, kar omogoča določitev grafa povezljivosti za potrebe navigacije znotraj stavb. Knjižnica je na voljo v obliki razširitve prostorske razširitve PostGIS za podatkovno bazo PostgreSQL.

V raziskavi smo razvili postopek integracije funkcionalnosti programa FME in podatkovne baze PostgreSQL, ki združuje njune prednosti in obenem zmanjšuje njune omejitve (slika 17).

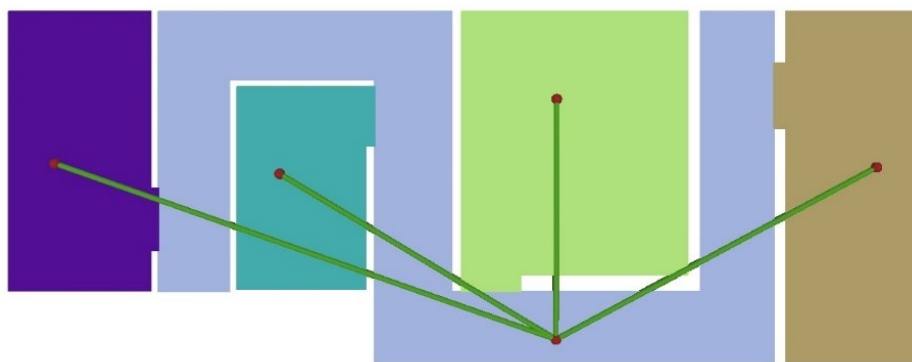


Slika 17: Koncept integracije in 3D-analitike podatkov na podlagi orodij ETL.

Figure 17: The concept of ETL-based data integration and 3D analytics.

Po branju podatkov je treba podatke pred zapisom v podatkovno bazo ustrezno pripraviti. S postopki v programu FME je mogoče podatke razčleniti in iz njih ustvariti prostorninske 3D-elemente. V tej fazi je ključni proces triangulacija mejnih ploskev, s katero se izognemo težavam pri izvedbi 3D-analiz zaradi napačno zapisane geometrije v podatkovni bazi. Vzrok težav so različna dopustna odstopanja točk od ravnine ploskve, ki jo določajo. Druga težava se pojavi pri ploskvah z luknjami. Te se ne zapišejo v skladu s pravili, ki veljajo za geometrije v podatkovni bazi. Pretvorba vseh ploskev v trikotnike reši obe težavi in ne spreminja oblike 3D-elementov, ampak le strukturo njihovega zapisa. Razvili smo tri metode za določitev grafa povezljivosti, ki se razlikujejo glede na kompleksnost končnega rezultata. Vse metode temeljijo na uporabi prostorninskih 3D-geometrij notranjih prostorov. Poimenujemo jih glede na vrsto rezultata, torej vrsto grafa povezljivosti, ki ga pridobimo z uporabo posamezne metode.

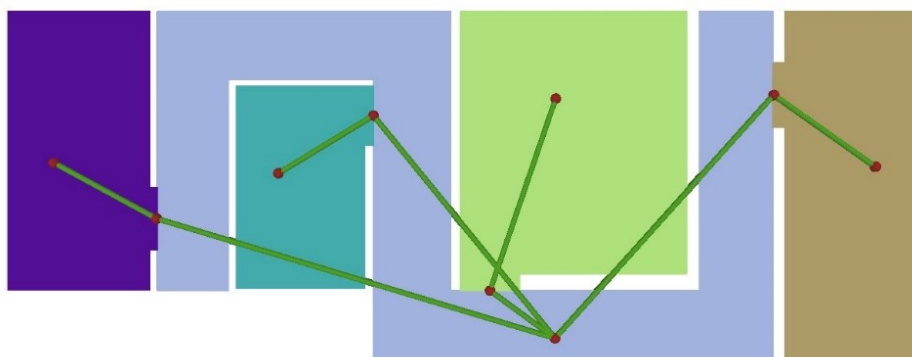
Pri prvi metodi modeliramo medsebojne odnose med prostori s funkcijo SFCGAL *ST_3DIntersects*. To je logična funkcija, ki vrne rezultat TRUE (pravilno), če se analizirani 3D-geometriji sekata, in FALSE (nepravilno), če sta geometriji medsebojno ločeni. Ob predpostavki, da se 3D-prostorninski elementi dotikajo na prehodih, lahko s to funkcijo določimo, kateri prostori so med seboj povezani in kateri ne. S tem dobimo osnovni graf povezljivosti (slika 18), ki podaja informacijo o medsebojni povezanosti vozlišč, ki predstavljajo prostore. Metodo smo označili z okrajšavo NRS (angl. *node-relation structure*).



Slika 18: Graf povezljivosti prostorov z rdečimi vozlišči in zelenimi povezavami.

Figure 18: Basic node-relation structure (NRS) with red nodes and green connections.

Pri drugi metodi smo nadgradili prvi pristop z dodajanjem vozlišča na položaju stika dveh geometrij, ki predstavlja prehod med prostori (slika 19). Metodo smo označili z okrajšavo NRSE (angl. *node-relation structure and entrance*). Za določitev položaja stika je dodatno uvedena funkcija SFCGAL *ST_3DIntersection*, ki kot rezultat vrne geometrijo preseka. Pri dotikanju je ta geometrija v obliki stične ploskve. Izziv avtomatizacije tega postopka so prostori, ki imajo več povezav z drugim prostorom. To je mogoče rešiti z orodji FME, ki stične ploskve razdelijo na več entitet, iz katerih je mogoče izračunati posamezna stičišča.

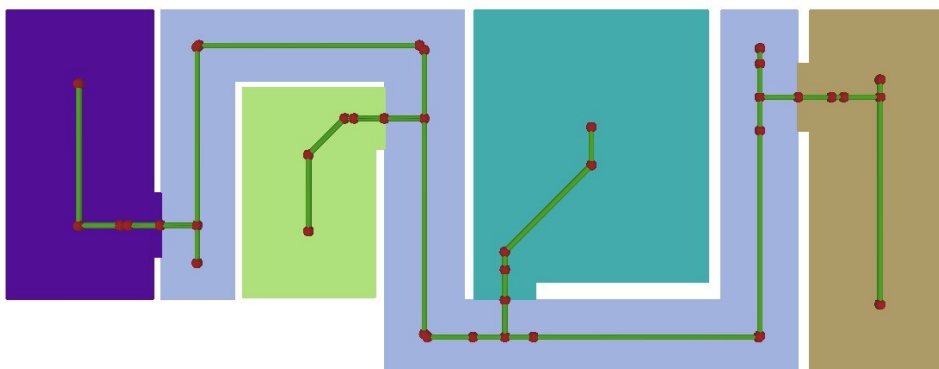


Slika 19: Graf povezljivosti prostorov z dodanimi vozlišči na prehodih med prostori.

Figure 19: Node-relation structure and entrance (NRSE) navigation network with red nodes and green connections.

Pri tretji metodi modeliranja povezljivosti prostorov dodajamo tudi modeliranje poti znotraj posameznega prostora s transformacijo poligonov prostorov v središčno os (angl. *medial axis transformation* – MAT). Metodo smo označili z okrajšavo NRS-MAT. Tako prostor v grafu povezljivosti ni več predstavljen z enim vozliščem, ampak ga določa izračunana sredinska os (slika 20). Graf znotraj posameznega prostora je določen na podlagi funkcije SFCGAL *ST_ApproximateMedialAxis*, ki pa deluje samo z 2D-geometrijami. Za to fazo izračuna so zato 3D-prostorninski elementi transformirani v 2D-poligone njihovih obrisov. S podatki o višinah prostorninskih elementov se vozlišča in povezave postavijo na ustrezno višino tako, da so znotraj tega

elementa. V primerjavi z rezultati prvih dveh metod, ki omogočata navigacijo le na ravni prostorov, je rezultat tretje metode primeren tudi za določitev poti znotraj stavbe.

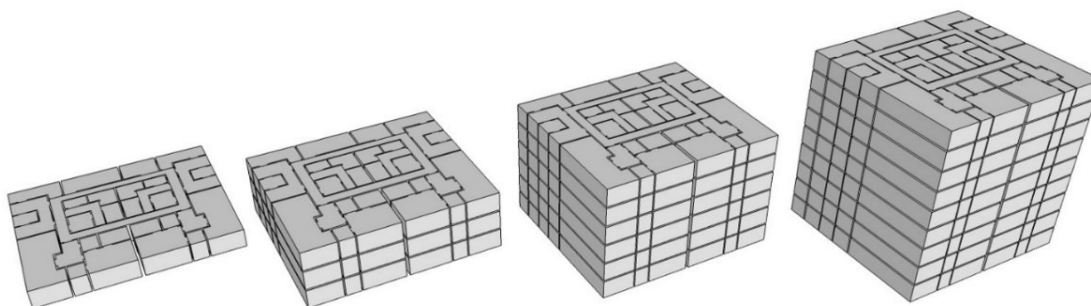


Slika 20: Graf povezljivosti prostorov, pridobljen z metodo NRS-MAT, ki je primeren za načrtovanje poti.

Figure 20: The result of the NRS-MAT method – the connectivity graph suitable for path planning.

6.3 Rezultati

Razvite metode smo preizkusili na dveh vrstah testnih podatkov. Prvi testni niz podatkov so podatki 3D-katastra, modelirani v skladu s podatkovnim modelom, ki je bil razvit v okviru doktorske disertacije (Tekavec, Čeh in Lisec, 2020). Podatkovni niz vsebuje štiri modele notranjosti stavb, ki se razlikujejo po številu etaž (slika 21).



Slika 21: Testni 3D-katastrski podatkovni niz, ki obsega štiri 3D-modele prostorov v notranjosti stavb.

Figure 21: The 3D cadastral datasets containing four 3D-models of building interior spaces.

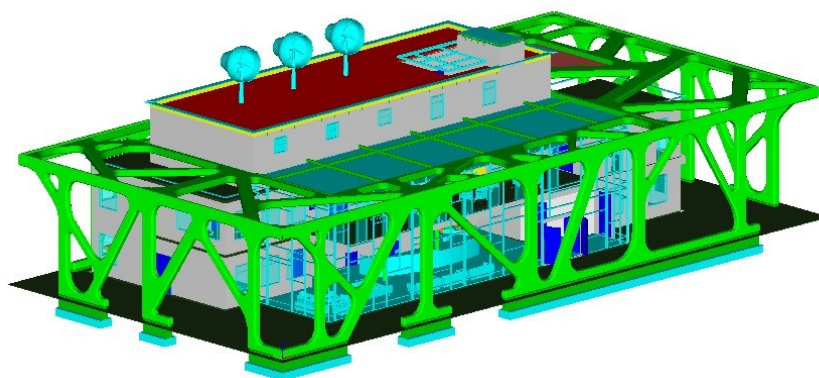
Obdelava testnih podatkov je bila izvedena na računalniku z i7-8565U procesorjem, 16 GB delovnega spomina in SSD-diskom. Za primerjavo zahtevnosti metod smo uporabili procesne čase obdelave, ki omogočajo relativno primerjavo med posameznimi metodami (preglednica 1). Pri tem gre za procesni čas celotnega postopka obdelave: od branja vhodnih podatkov, izvedbe 3D-analiz do oblikovanja rezultata v obliki grafa povezljivosti.

Preglednica 1: Procesni časi obdelave testnih 3D-katastrskih podatkov

Table 1: Processing times for the 3D cadastral datasets

Podatkovni niz	Št. prostorov	NRS	NRSE	NRS-MAT
1 etaža	31	29 s	1 min 10 s	1 min 11 s
3 etaže	93	59 s	3 min 8 s	3 min 13 s
6 etaž	186	1 min 46 s	6 min 39 s	6 min 40 s
9 etaž	279	2 min 58 s	10 min 16 s	10 min 20 s

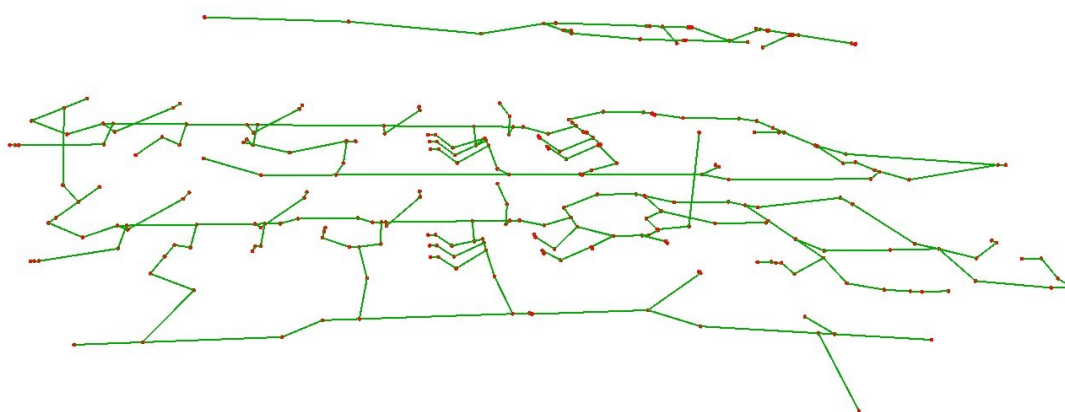
Drugi testni niz podatkov predstavlja dokument IFC (slika 22), ki je kot testni podatkovni niz na voljo na spletni strani organizacije BIMcollab (2020).



Slika 22: IFC testni podatkovni niz.

Figure 22: IFC test dataset.

Iz vhodnega modela je bilo treba izločiti elemente *IfcSpace* (prostori), *IfcDoor* (vrata) in *IfcStair* (stopnice). Zaradi drugačnega pristopa modeliranja prostorov se geometrije prostorov v modelih IFC praviloma ne sekajo na prehodih, saj so med njimi elementi vrat. Z vključitvijo elementov vrat lahko 3D-geometrije obdelamo z razvitimi metodami. V tem primeru metoda NRSE nima pomena, saj z vključitvijo elementov vrat že s prvo metodo dobimo rezultate, primerljive z rezultati druge metode. V obdelavo so vključeni tudi elementi stopnic, saj geometrije prostorov ne omogočajo določitve vertikalnih povezav med njimi. Metodo NRS je bilo treba delno spremeniti, ker je določila neobstoječe povezave med prostori v različnih etažah. Uvedli smo dodatno kontrolo z uporabo funkcije *ST_3DIntersection*, ki izračuna presek dveh 3D-geometrij, in izračunali vertikalni obseg dobljenega preseka. Pri neobstoječih povezavah je ta presek zelo majhen oziroma enak nič. Slika 23 predstavlja končni rezultat obdelave podatkovnega niza IFC z metodo NRS-MAT.



Slika 23: Graf povezljivosti, pridobljen z obdelavo testnega podatkovnega niza IFC z metodo NRS-MAT.

Figure 23: Navigation network derived from IFC dataset by applying the NRS-MAT method.

Preglednica 2: Procesni časi obdelave testnega podatkovnega niza IFC.

Table 2: Processing times for the IFC test dataset.

Metoda	Št. povezav	Čas obdelave
NRS	110	1 min 5 s
NRS-MAT	157	1 min 9 s

V preglednici 2 je predstavljen čas obdelave testnega podatkovnega niza IFC z metodama NRS in NRS-MAT. Kot že omenjeno, metode NRSE nismo uporabili, saj daje metoda NRS pri uporabi podatkov IFC zelo podobne rezultate.

6.4 Razprava

Rezultati obdelav podatkov obeh testnih podatkovnih nizov kažejo, da so metode izvedljive z vhodnimi podatki dejanskega obsega. Vse obdelave so bile razvite tako, da so potekale popolnoma samodejno. V nasprotju s številnimi metodami, ki temeljijo na 2D-podatkih in procesih, lahko s predlaganimi metodami obravnavamo in obdelujemo 3D-prostorske podatke v njihovi izvorni obliki. Izognemo se členitvi 3D-modelov stavb na posamezne etaže, kar je za analitične metode v 2D-okolju obvezno, saj v nasprotnem primeru prihaja do medsebojnega prekrivanja vsebine.

Pridobivanje grafa povezljivosti je postopek, ki je v literaturi običajno omejen na eno stavbo. Predvsem je to posledica majhnega števila razpoložljivih podatkov o notranjosti stavb. Ustrezni podatkovni model 3D-katastra lahko sloni na različnih virih podatkov, vključno s podatki informacijskega modeliranja stavb BIM, v povezavi s čimer se bo predvidoma količina razpoložljivih podatkov o notranjosti stavb v prihodnosti zelo povečala. V petem poglavju smo izvedli obdelave simuliranih podatkov za celotno

območje Slovenije, kjer smo se osredotočali na analitične operacije preverjanja topologije in sorodne analize podatkov. Take analize je mogoče, kot predstavljeno, izvesti na velikih podatkovnih nizih.

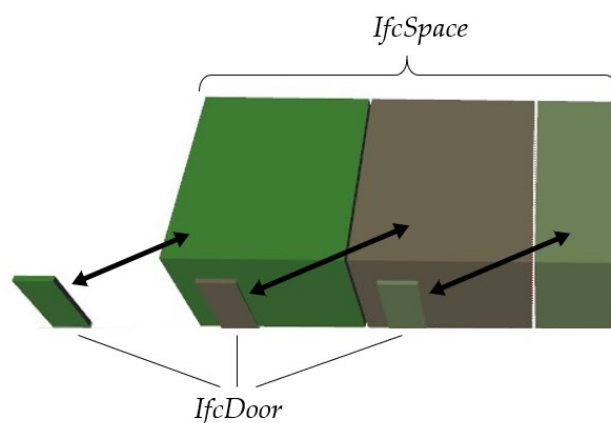
Če bi želeli podatke 3D-katastra uporabiti tudi za namene navigacije znotraj stavbe, bi morali podatke dodatno topološko urediti in izračunati grafe povezljivosti med prostori stavbe. Za ugotavljanje medsebojnega prekrivanja prostorov stavbe smo morali poleg logične SFCGAL funkcije *ST_3DIntersects* uporabiti tudi funkcijo *ST_3DIntersection*, ki je procesno bistveno zahtevnejša. Tako smo obdelavo naredili le za eno stavbo, pri čemer ugotovimo, da je proces preverjanja napak časovno enakovreden procesu pridobivanja grafa povezljivosti (približno 10 minut za približno 300 prostorov). Oba procesa, ki sta potrebna za vzpostavitev podatkovnega modela, primernega v podporo navigaciji znotraj stavbe, tako nista primerna za pogosto izvajanje na veliki količini podatkov. Postopek pridobivanja grafa povezljivosti je zato smiselno izvesti ob vpisu podatkov o stavbi v kataster in rezultat ustrezno shraniti. Glede na procesne čase za testne podatke lahko ugotovimo, da pridobivanje grafa povezljivosti ob vpisu posameznega 3D-modela stavbe ne pomeni bistvene sistemske obremenitve. Seveda je shranjevanje in upravljanje takšnih podatkov zunaj osnovne domene katastra. Vsaj v enem delu (javne zgradbe, nakupovalna središča) so takšni podatki in njihova uporaba tudi v javnem interesu, predvsem z vidikov zaščite in reševanja ter lažje dostopnosti do storitev.

Iz rezultatov vidimo, da se z vključitvijo funkcije SFCGAL *ST_3DIntersection* močno podaljša čas obdelave podatkov. Slednje izhaja iz dejstva, da moramo dejansko narediti 3D-geometrijski element, ki predstavlja presek vhodnih elementov. Čas obdelave je ob uporabi te funkcije zelo odvisen tako od količine 3D-geometrijskih elementov kot tudi od njihove kompleksnosti. Iz preglednice 2 vidimo, da ni bistvene časovne razlike med metodama NRS in NRS-MAT, kot je to razvidno iz preglednice 1, saj je bilo treba metodo NRS za obdelavo dokumenta IFC spremeniti tako, da smo dodali funkcijo *ST_3DIntersection*.

Razvite metode imajo tudi nekatere pomanjkljivosti. Pri kompleksnih 3D-geometrijskih elementih se lahko zgodi, da je centroid, ki določa vozlišče grafa povezljivosti, postavljen zunaj pripadajočega elementa. Opisani sta dve rešitvi, od katerih je ena uporabna za iskanje takšnih napak, druga pa je namenjena njihovem popravljanju. Metodi NRSE in NRS-MAT uporabljata procesno zahtevno funkcijo *ST_3DIntersection*. Pomanjkljivosti metod izhajajo tudi iz dejstva, da temeljijo na obdelavi izvornih 3D-elementov. Metode so tako občutljive za napake pri modeliranju podatkov, zaradi katerih lahko nastajajo drobne vrzeli med posameznimi 3D-elementi prostorov, ki so med sabo povezani. Drobne vrzeli se lahko pojavijo tudi zaradi zaokroževanja koordinat pri različnih predhodnih obdelavah. V takšnem primeru predstavljene metode ne zaznajo prehoda, kar ima za posledico nepopoln končni rezultat. Rešitev bi bila uvedba spremenljive tolerance pri funkcijah SFCGAL, kar še ni izvedeno. Pomanjkljivosti metod so izrazitejše pri podatkih IFC, ki niso popolnoma prilagojeni takšnemu načinu

obravnave 3D-elementov. Zaradi zelo kompleksnih elementov vrat in stopnic (*IfcDoor* in *IfcSpace*) so v obdelavo vključeni njihovi »Box« 3D-geometrijski elementi, ki predstavljajo največji 3D-prostorski obseg. Pri tej poenostavitvi lahko pride do sekanja 3D-elementov tam, kjer dejanski prehodi ne obstajajo.

Izkazalo se je, da je metode mogoče uporabiti v kombinaciji z že razvitimi metodami, ki temeljijo na atributnih podatkih o povezljivosti. Te podatke vsebuje element IFC *IfcRelSpaceBoundary* (Teo in Cho, 2016). Primerjava naših metod z metodo, ki temelji na atributnih podatkih, je pokazala, da so v atributnih podatkih prisotne napake, ki povzročijo napake v končnem rezultatu. Te napake smo z razvitimi metodami lahko odkrili (slika 24). Po drugi strani pa so atributni podatki omogočili določitev nekaterih povezav, ki jih na podlagi odnosov med 3D-elementi ni mogoče odkriti.



Slika 24: Napake v atributnih podatkih elementa IFC *IfcRelSpaceBoundary* glede povezanosti elementov *IfcSpace* in *IfcDoor*.

Figure 24: Errors in *IfcSpace* and *IfcDoor* (having equal colour) relations retrieved from *IfcRelSpaceBoundary* entity.

6.5 Prispevek k znanosti

Rezultati raziskave pomenijo pomemben prispevek pri razvoju 3D-prostorskih analiz, saj je bil v okviru te raziskave razvit koncept povezave programske rešitve ETL (FME) in podatkovne baze PostgreSQL, kar omogoča podporo in povezovanje podatkov iz različnih virov ter njihovo obdelavo s prostorskimi funkcijami, ki podpirajo 3D-geometrije. Na področju navigacije v notranjosti stavb uvaja raziskava s predlaganimi metodami nov način določitve grafa povezljivosti prostorov, ki temelji na ugotavljanju prostorskih odnosov med 3D-geometrijskimi elementi s funkcijami SFCGAL. Rezultati raziskave so nadalje izrednega pomena za razvoj večnamenskega 3D-katastra, saj študija na primeru podatkov 3D-katastra kaže, da lahko ustrezno strukturirani podatki 3D-katastra omogočajo samodejno določitev grafa povezljivosti, ki se lahko uporablja za izvedbo številnih lokacijskih storitev v notranjosti stavb.

7 ZAKLJUČEK

Glavni cilj doktorske disertacije je bil razviti podatkovni model 3D-katastra, ki je povezljiv s standardnimi podatkovnimi modeli področij, ki se nanašajo na modeliranje stavb v prostorskih informacijskih sistemih. S povezljivostjo različnih področij smo obravnavali večnamenski vidik katastrov in v ta namen zasnovali 3D-katastrski podatkovni model. Pomemben del raziskave se nanaša na možnosti uporabe obstoječih katastrskih podatkov za 3D-kataster, kjer smo obravnavali obstoječe 2D-katastrske podatke. Zaradi omejenih podatkov in z namenom preveriti robustnost informacijskega sistema z obsežno podatkovno bazo in možnostjo analitičnih operacij, ki jih lahko izvajamo na obsežni 3D-prostorski podatkovni bazi, smo razvili postopek za simulacijo 3D-katastrskih podatkov. Ideja večnamenskega 3D-katastra je razvita za primer zagotavljanja podatkov za izvedbo lokacijskih storitev v notranjosti stavb. Slednje je realizirano ob uporabi postopkov 3D-analiz prostorskih podatkov, katerih razvoj je zelo aktualno raziskovalno področje.

V prvem delu zaključnega poglavja podajamo povzetke ključnih ugotovitev raziskovalnega dela, ki povezujejo vsebino prejšnjih vsebinskih poglavij. V sklepnem delu poglavja so obravnavane postavljene hipoteze in izpostavljeni ključni prispevki k znanosti s priporočili za nadaljnje raziskave.

7.1 Zaključne ugotovitve

V vsebinskih poglavjih doktorske disertacije so predstavljeni rezultati raziskav, ki so medsebojno prepleteni in obravnavajo glavne cilje doktorske disertacije. Drugo poglavje je namenjeno pregledu aktualnih raziskav na področju doktorske disertacije, ki skupaj s preglednim člankom, priloženim v prilogi A (Tekavec, Ferlan in Lisec, 2018), ponuja celovit pregled stanja raziskav. Poglavja, ki sledijo, so namenjena povzetkom rezultatov raziskav, ki so objavljeni kot izvorni znanstveni članki in so del doktorske disertacije.

Osrednji cilj doktorske disertacije je bil razvoj konceptualnega in logičnega modela večnamenskega 3D-katastra, ki je predstavljen v tretjem poglavju in znanstvenem članku v prilogi B (Tekavec, Čeh in Lisec, 2020). Predlagani model se razlikuje od obstoječih podatkovnih modelov za 3D-kataster in tako ponuja alternativo za 3D-modeliranje katastrskih podatkov, pri čemer pa se omejimo na modeliranje stavb. Podatkovni model je zasnovan kot osnova, ki omogoča dopolnjevanje in nadgradnjo v skladu s pravili oziroma zakonodajo, ki veljajo v posamezni državi. V nadaljnjih treh poglavjih smo predstavili rezultate razvoja in prikazali način uvajanja 3D-katastra, kjer smo izhajali iz osnovne ideje uporabe notranjih prostorov stavb za 3D-modeliranje katastrskih podatkov. Tako obravnavamo v četrtem poglavju možnost uporabe obstoječih 2D-katastrskih podatkov za 3D-modeliranje notranjih prostorov stavb (Tekavec in Lisec, 2020a). Peto poglavje je namenjeno razvoju fizičnega modela 3D-katastra, ki bi lahko

bil v osnovni obliki (izdelava nekaj fizičnih modelov) vključen že v tretje poglavje. V primerjavi z obstoječimi raziskavami omogoča razviti pristop izdelavo velike količine 3D-katastrskih podatkov, ki so po posameznih lastnostih primerljivi z dejanskimi katastrskimi podatki (Tekavec, Lisec in Rodrigues, 2020). Ločeno poglavje, ki je namenjeno razvoju fizičnega modela 3D-katastra ter simulaciji kompleksnega informacijskega sistema, je posledica obsežnosti te raziskave. Šesto poglavje je namenjeno prikazu uporabnosti razvitega podatkovnega modela zunaj domene zemljiškega katastra, s čimer prispeva k uresničitvi ciljev glede razvoja večnamenskega katastra in 3D-prostorskih analiz katastrskih podatkov (Tekavec in Lisec, 2020b).

Pri modeliranju notranjosti stavb z notranjimi prostori poznamo dva pristopa glede upoštevanja vmesnih elementov med prostori, med katerima razlikuje in ki ju opredeljuje tudi standard OGC IndoorGML. Uporabiti je mogoče modele s tankimi stenami (angl. *thin wall model*), pri čemer debeline sten ne upoštevamo. Stičnih površin prostorov v tem primeru ne moremo omejiti le na površine prehodov med prostori, saj se geometrije prostorov stikajo tudi tam, kjer so med njimi stene. Drugi pristop upošteva debelino sten (angl. *thick wall model*) in omogoča, da se geometrije prostorov stikajo le tam, kjer so prehodi. Predlagani podatkovni model za 3D-kataster je mogoče uporabiti v obeh primerih, poudariti pa je treba, da pri modelih s tankimi stenami ni mogoče uporabiti postopkov za pridobivanje grafa povezljivosti, ki so predstavljeni v šestem poglavju. V četrtem poglavju, kjer obravnavamo obstoječe 2D-katastrske podatke o stavbah, smo postopek 3D-modeliranja stavb prilagodili etažnim načrtom, ki so modelirani po načelu tankih sten. Zaradi tega postopek predvideva ročno vnašanje povezljivosti prostorov z vozlišči in povezavami. Če želimo ohraniti modeliranje po načelu tankih sten in ohraniti možnost ugotavljanja povezanosti, je treba stične površine oziroma stične linije v 2D-etažnih načrtih semantično obogatiti s podatki o vrsti površine. V tem primeru pa je treba preiti iz prostorninskih 3D-geometrij na uporabo modela robnih ploskev (angl. *boundary representation*). Takšni 3D-modeli stavb so bili generirani s proceduralnim modeliranjem, ki je opisano v petem poglavju, in naknadno transformirani v modele s prostorninskimi 3D-geometrijami. Graf povezljivosti je določen podobno, kot je opisano v šestem poglavju, le da v tem primeru iščemo 3D-preseke ploskev, ki predstavljajo prehode, in ne 3D-presekov prostorninskih 3D-geometrij.

V uvodnem delu doktorske disertacije je poudarjeno, da nekatere države v svoje katastrske sisteme uvajajo posamezne elemente 3D-katastra. Iz razdelitve obravnave področja 3D-katastrov na tehnično, pravno in administrativno izhajajo tudi pogoji, ki morajo biti izpolnjeni, da je 3D-kataster mogoče uvesti v polnem obsegu. Uvajanje 3D-katastra je proces, ki zahteva številne postopne spremembe na vseh treh navedenih področjih. V doktorski disertaciji predstavljene rešitve prispevajo predvsem k razvoju tehničnih rešitev pri uvajanju 3D-katastra, manj pozornosti pa je namenjene pravnim ter administrativnim vidikom. Administrativnih izzivov se dotakne le del raziskave o uporabi obstoječih 2D-katastrskih podatkov, kjer je izvedena tudi analiza obstoječih podatkov, v kateri so poudarjene

potrebne spremembe podatkov in procesov, ki bi omogočale bolj učinkovito in samodejno izvedbo 3D-modeliranja. Uvajanje takšnih sprememb lahko pomeni prve korake v smeri uvedbe 3D-katastra.

Pri uvajanju 3D-katastra se pogosto pojavijo dileme glede zahtevane točnosti, natančnosti in podrobnosti podatkov. Predlagani 3D-katastrski model za primer stavb kvantitativno teh količin ne opredeljuje, saj se te zahteve med državami razlikujejo. Najbolj je predlagani model občutljiv za kakovost 3D-modeliranja z vidika topologije in opredelitve stičnih ploskev, saj te napake vplivajo na rezultate 3D-prostorskih funkcij, ki jih v tej doktorski disertaciji uporabimo za pridobivanje novih informacij. Glede navedenega je mogoče pri modeliranju stavb za katastrske namene izbrati dva pristopa. Prvi se za zagotavljanje prostorskega obsega pravic, omejitev in odgovornosti na stavbi zanaša na povezavo s fizičnimi elementi v stavbi. Podatki za registracijo pravnih dejstev morajo tako zagotavljati nedvoumno povezavo na fizične elemente stavbe. Tak pristop trenutno uporablja večina držav, kjer se za registracijo pravic, omejitev in odgovornosti na stavbi uporabljajo etažni načrti. Točnost in natančnost prostorskih podatkov v tem primeru ni ključna, saj je razsežnost pravnih dejstev »zavarovana« s položajem fizičnih elementov v stavbi. Drugi pristop pa predvideva, da prostorski podatki v katastru opredeljujejo dejanski položaj in obseg pravnih dejstev v stavbi. V tem primeru so zahteve po natančnosti veliko višje, na centimetrski ravni, in zahtevajo izvedbo zahtevnih postopkov izmere, kar posebej velja za primer 3D-katastra. Če želimo modelirati dejansko obliko nepremičninskih enot v obliki skupine prostorov, moramo obvezno upoštevati debelino sten med njimi, saj modeli s tankimi stenami ne omogočajo modeliranja dejanske oblike stavbe. Slednje je podrobneje obravnavano v četrtem poglavju (Tekavec in Lisec, 2020a). Glede na to, da večina držav trenutno uporablja 2D-etažne načrte za registracijo pravnih dejstev na delih stavb, ki ne omogočajo neposredne določitve oblike nepremičninskih enot, lahko tak pristop brez posledic za pravno varnost nosilcev pravic, omejitev in odgovornosti na stavbi prenesemo tudi v 3D-kataster. Zahtevnost 3D-modeliranja prostorov v tem primeru ne pomeni nesorazmerno velikega vložka glede na koristi, ki jih prinaša predvsem povečana uporabnost takšnih podatkov glede na 2D-načrte. Z vidika uporabnosti za mrežne analize, ki so temelj za podporo lokacijskim storitvam, je zahtevano le dosledno modeliranje topoloških odnosov med 3D-elementi, ki omogočajo pridobitev grafa povezljivosti prostorov. Čeprav omogočajo predlagane rešitve v doktorski disertaciji različne načine izvedbe 3D-katastra za primer stavb z vidika modeliranja stavb in delov stavb, je zelo pomembno, da pri nadgradnji katastrskega sistema oziroma uvedbi 3D-katastra zelo podrobno definiramo podatkovni model, vključno z opredelitvijo nepremičninske enote, saj to vpliva na številne segmente sistema. Med drugim je natančna in nedvoumna prostorska opredelitev nepremičninske enote ključna za izvedbo meritev, ki so potrebne za pridobitev merskih podatkov za izdelavo 3D-modela stavbe.

3D-prostorski podatki o stavbah imajo v primerjavi z 2D-podatki kompleksnejšo strukturo, kar posledično pomeni, da so takšna tudi pravila za modeliranje. Kontrola kakovosti 3D-prostorskih podatkov je tako veliko zahtevnejša, saj je večji tako obseg mogočih napak kot tudi procesna zahtevnost

izvedbe kontrol. V četrtem poglavju je predstavljeno 3D-modeliranje stavb na podlagi 2D-etažnih načrtov s ciljem analizirati možnost postopnega uvajanja 3D-katastra na podlagi obstoječih katastrskih podatkov. V postopku 3D-modeliranja se lahko pojavijo neskladja, ki jih je mogoče odkriti vizualno, nekatera tudi samodejno. Posamezni deli etaž se lahko med seboj prekrivajo, kar nakazuje na težavo podatkov o višinah v sedanjem sistemu zemljiškega katastra. Pojavljajo se tudi zamiki položajev vertikalnih elementov stavbe, kot so jaški za dvigala in stopnišča. Takšne napake na 2D-etažnih načrtih težko odkrijemo, pri 3D-modeliranju pa se hitro pokažejo. Pri kontroli kakovosti 3D-prostorskih podatkov v 3D-katastru lahko kontrole razdelimo na notranje in zunanje. Notranje so namenjene preverjanju skladnosti posamezne 3D-geometrije s pravili. Pravila za prostorninske 3D-geometrije so bila predmet več raziskav, a se pri praktični uporabi z različnimi programi lahko razlikujejo, na kar je treba biti pozoren. V sklopu raziskave, predstavljene v šestem poglavju, smo na takšno težavo naleteli pri prenosu 3D-prostorninskih geometrij iz programa FME v podatkovno bazo PostgreSQL (Tekavec in Liseč, 2020b). Programa imata različne tolerance za odstopanje točk od ploskev. Tako so veljavne 3D-geometrije v programu FME zapisane kot neveljavne v podatkovni bazi PostgreSQL, kar smo rešili s triangulacijo mejnih ploskev. Druga razlika, na katero smo naleteli, je, da FME podpira prostorninske 3D-geometrije z luknjami v notranjosti, PostgreSQL pa ne. Logični podatkovni model 3D-katastra zato predvideva možnost ločenega shranjevanja osnovne geometrije in lukenj. Odkrivanje notranjih napak v prostorninskih 3D-geometrijah je mogoče tudi posredno. Primer je izračun prostornine, ki ga ob morebitni prisotnosti napak ni mogoče izračunati. Zunanje kontrole so povezane s pravili, ki so značilna za katastrske podatke. Glavno pravilo glede prostorskih podatkov v katastru je, da se modeli prostorskih enot oziroma geometrije, ki predstavljajo nepremičninske enote, ne smejo prekrivati. Tri takšne kontrole, ki so povezane s predlaganim podatkovnim modelom, so predstavljene v petem poglavju doktorske disertacije. Simulirani 3D-katastrski podatki so omogočili oceno, kako zahtevna je izvedba posamezne kontrole za večji obseg podatkov, kar je eden od primerov, kako lahko simulirani 3D-katastrski podatki pomagajo pri razvoju 3D-katastrskega sistema z vidika ocene procesne zmogljivosti informacijskega sistema (Tekavec, Liseč in Rodrigues, 2020).

Uporaba obstoječih 2D-katastrskih podatkov za 3D-modeliranje, ki je obravnavana v četrtem poglavju, je omejena na uporabo 2D-etažnih načrtov. Izbrani so bili zaradi mednarodne razširjenosti registracije pravnih dejstev na delih stavb, saj veliko držav uporablja etažne načrte različnih oblik za vzpostavitev etažne lastnine. Ena izmed omejitev pri tem je, da so etažni načrti praviloma dostopni le za stavbe, za katere je vzpostavljena etažna lastnina. Slovenija je med redkimi državami, ki za vse nove stavbe predpisuje katastrski vpis, kar pomeni velik potencial glede obsega podatkov, ki so lahko na voljo v katastru za 3D-modeliranje. V doktorski disertaciji smo želeli med drugim poudariti potencial katastrskih podatkov, če so ustrezno strukturirani in modelirani (Tekavec in Liseč, 2020a), pri čemer izpostavljamo manjkajoče podatke za 3D-modeliranje in podajamo vpogled v potrebne spremembe katastrskih podatkov, ki bi omogočile bolj avtomatizirano 3D-modeliranje.

Z vidika razvoja večnamenskega 3D-katastra smo v doktorski disertaciji obravnavali (i) povezljivost 3D-katastra s podatkovnimi modeli na področju informacijskega modeliranja stavbe BIM in 3D-topografskega modeliranja na konceptualni ravni, (ii) podrobneje pa smo obravnavali uporabo 3D-katastrskih podatkov za namene lokacijskih storitev.

Zasnova podatkovnega modela, ki je povezljiva s podatkovnimi modeli IFC, omogoča uporabo katastrskih podatkov v modelih BIM, to je vključevanje pravnih dejstev v podrobne modele stavb BIM, hkrati pa omogoča uporabo podatkov BIM za namene modeliranja stavb v 3D-katastru. Podatke BIM je torej mogoče uporabiti za določitev prostorskega konteksta katastrskih podatkov, kar prispeva k jasnejši interpretaciji obsega pravic, omejitev in odgovornosti znotraj stavbe. Podatke o pravicah, omejitvah in odgovornostih je mogoče povezati s posameznimi elementi podatkov BIM (zidovi, inštalacijami, notranjo opremo).

Podatkovni model, ki je skladen s standardom CityGML, pa prinaša vektorske, topološko urejene 3D-modele prostorskih entitet, kar omogoča izvajanje različnih 3D-prostorskih analiz – od analiz topologije, kar smo izvedli tudi v naši nalogi, do različnih prostorskih analiz v okoljih GIS. 3D-katastrske podatke, ki so topološko urejeni, je mogoče na primer uporabiti za prostorske analize, ki se nanašajo na ugotavljanje škode pri naravnih nesrečah, predvsem poplavam, kjer so podatki o višinah ključnega pomena (Amirebrahimi in sod., 2016). S povezavo na vrednost nepremičninskih enot je v kratkem času mogoče pridobiti tudi ekonomski vidik nastale škode. Vključitev 3D-katastrskih podatkov v 3D-topografske modele mest omogoča analize vidnosti in pogledov, ki jih je mogoče vključiti kot dejavnik, ki vpliva na vrednost nepremičnin. Z uveljavljenimi 3D-analizami je s predlaganim podatkovnim modelom, ki sledi standardom topografskega modeliranja, mogoče na primer določiti tudi raven hrupa za posamezno nepremičnino, njen energetski potencial in izpostavljenost vetru (Biljecki in sod., 2015). V nalogi smo sicer podrobneje razvili še rešitev za katastrski podatkovni model, ki jo je mogoče uporabiti v podporo navigacije znotraj stavbe, ker dodatno razširja možnosti uporabe podatkov 3D-katastra.

7.2 Sklepi

V doktorski disertaciji je predstavljen inovativen pristop k razvoju večnamenskega 3D-katastrskega podatkovnega modela za stavbe, ki temelji na ideji uporabe notranjih prostorov kot osnovnih elementov za modeliranje obsega in položaja pravic, omejitev in odgovornosti na stavbi. Obravnavali smo možnosti uporabe obstoječih 2D-katastrskih podatkov za 3D-modeliranje, predvsem z vidika možnosti postopne nadgradnje 2D-katastrskega sistema v 3D-kataster (Tekavec, Čeh in Lisec, 2020; Tekavec in Lisec, 2020a). Namesto uveljavljenega pristopa pri preučevanju možnosti uvajanja 3D-katastra, ki teoretična

izhodišča pojasnjuje na majhni količini primerov, smo se odločili za razvoj simulacije fizičnega modela 3D-katastra za večja območja s proceduralnim modeliranjem (Tekavec, Lisec in Rodrigues, 2020). Uporabnost katastrskih podatkov smo z opredelitvijo ustrezne podatkovne strukture in postopkov 3D-prostorskih analiz razširili na področje navigacije oziroma širše lokacijskih storitev v notranjosti stavb (Tekavec in Lisec, 2020b). Z rezultati raziskave smo potrdili tudi pravilnost obeh zastavljenih hipotez.

- **Hipoteza 1:** *Tradicionalni 2D-vektorski katastrski podatkovni model je mogoče nadgraditi s 3D-vektorskim podatkovnim modelom, v katerem se lahko izognemo modeliranju stavb po etažah, ki je uveljavljeno v 2D-katastru.*

Sklepi: Notranji prostori v obliki prostorninskih 3D-geometrij so osnovni element predlaganega 3D-katastrskega modela. Prostori so v okviru predlaganega podatkovnega modela predstavljeni v svoji izvorni obliki. S tem posledično tudi izgine potreba po uporabi koncepta etaž, ki ga je treba uporabiti pri 2D-modeliranju delov stavb v obliki etažnih načrtov. Nadgradnja 2D-vektorskega podatkovnega modela je lahko postopna, kot je obravnavano v četrtem poglavju disertacije (glej tudi Tekavec in Lisec, 2020a), z uveljavljanjem sprememb, ki omogočajo bolj samodejno 3D-modeliranje. Tudi prehod na uporabo prostorninskih 3D-geometrij je lahko postopen, saj se lahko v začetku uporabljajo preprostejše oblike izvlečenih 2D-poligonov in kasneje kompleksnejše oblike, ki so bližje dejanski obliki prostorov.

- **Hipoteza 2:** *3D-podatkovni model katastra nepremičnin, ki temelji na topoloških pravilih povezovanja grafičnih gradnikov, razširja možnosti uporabe podatkov nepremičninskih evidenc in podpira idejo večnamenskosti katastra.*

Sklepi: Predlagani podatkovni model 3D-katastra predvideva modeliranje geometrije prostorov tako, da se upošteva debelina zidov. Prostorninske 3D-geometrije se stikajo na površinah, ki predstavljajo prehode med prostori, s čimer so vzpostavljeni topološki odnosi, ki omogočajo določitev grafa povezljivosti. Ta je podatkovna osnova za izvedbo mrežnih analiz, ki jih uporabljajo lokacijske storitve, vključno z navigacijo v notranjosti stavb. Slednje pomeni razširitev uporabnosti katastrskih podatkov na novo področje, kar lahko prinese številne pozitivne učinke na obeh področjih.

Iz zgoraj opisanih sklepov lahko ugotovimo, da sta obe raziskovalni hipotezi na podlagi izvedenih raziskav v okviru doktorske disertacije v celoti potrjeni. Prav tako izvedene raziskave naslavlja vse cilje, ki so predstavljeni v uvodnem delu doktorske disertacije. Analiza stanja in trendov na področju sodobnih nepremičninskih evidenc ter pregled obstoječih raziskav na področju 3D-katastra v večjem delu obravnava pregledni znanstveni članek v prilogi A (Tekavec, Ferlan in Lisec, 2018), z dodatno

dopolnitvijo poglavja s pregledom tekočega stanja in najaktualnejših raziskav. V tretjem poglavju, ki povzema članek v prilogi B (Tekavec, Čeh in Liseč, 2020), je predstavljen razvoj konceptualnega in logičnega modela večnamenskega 3D-katastra za stavbe. Večnamenski vidik razvitega modela izkazuje pretvorbe v standardne podatkovne formate, ki so namenjeni uporabi na drugih področjih. Analiza možnosti nadgradnje obstoječega 2D-katastrskega sistema v 3D-katastrski sistem je predstavljena v četrtem poglavju, ki povzema članek v prilogi C (Tekavec in Liseč, 2020a). Fizični model 3D-katastra je bil razvit v okviru raziskave, katere rezultati so predstavljeni v prilogi D (Tekavec, Liseč in Rodrigues, 2020) in povzeti v petem poglavju. Aplikativni cilji doktorske disertacije so usmerjeni na področje mrežnih analiz, ki jih obravnavajo članki v prilogah B, C in predvsem E (Tekavec in Liseč, 2020b). V nalogi smo dodatno obravnavali 3D-prostorske analize, ki so usmerjene v zagotavljanje kakovosti 3D-katastrskih podatkov (Tekavec, Liseč in Rodrigues, 2020). Poleg univerzalno uporabnih rešitev smo predlog 3D-modeliranja stavb na podlagi notranjih prostorov razvili tudi za primer slovenskega katastra stavb. Opredeljeni in analizirani so ključni obstoječi podatki, potrebni za nadgradnjo obstoječega 2D-katastra v večnamenski 3D-kataster. Razvit je fizični model 3D-katastra v skladu s podatkovnim modelom, ki je bil predlagan v okviru doktorske disertacije, skupaj s primerom uporabe takega podatkovnega modela za izvedbo 3D-prostorskih analiz.

7.3 Prispevek k znanosti

Rezultati doktorske raziskave so izrednega pomena za področje razvoja 3D-katastra, saj uvajamo izviren pristop k modeliranju 3D-katastrskih podatkov za primer stavb, kjer je nepremičninska enota utemeljena na opredelitvi notranjih prostorov stavb. Za prikaz možnosti uvedbe tako opredeljenega koncepta 3D-modeliranja stavb smo izhajali iz dejanskih podatkov katastra ter tako pokazali možnost postopnega uvajanja 3D-katastra v sistem zemljiške administracije v Sloveniji. Pri tem smo postopek modelirali z diagrami aktivnosti UML, kar omogoča programsko neodvisno izvedbo. Razviti proces pretvorbe podatkov je poleg obravnavanega namena uporaben tudi za analizo obstoječih katastrskih podatkov, saj omogoča identifikacijo ključnih manjkajočih oziroma pomanjkljivih podatkov oziroma informacij za izdelavo 3D-modelov stavb na podlagi obstoječih katastrskih podatkov.

Posebno pomemben del raziskave se nanaša na proceduralno modeliranje, s čimer smo odpravili težavo pomanjkanja podatkov, ki so primerni za 3D-modeliranje stavb. S tem nam je uspelo izvirno simulirati veliko podatkovno bazo podatkov o stavbah in delih stavb, ki je primerljiva z obsegom dejanskih katastrskih podatkov za vso državo. Simulirane podatke smo nadalje uporabili za izvedbo 3D-prostorskih analiz, povezanih z upravljanjem 3D-katastrskih podatkov. S tem rezultati raziskave pomembno prispevajo k razvoju načrtovanju informacijskih sistemov za 3D-kataster, predvsem z vidika možnosti analize zmogljivosti obdelave 3D-podatkov, hkrati pa smo s pristopom pomembno prispevali k razvoju 3D-prostorskih analiz. V ta namen smo razvili koncept povezave programske rešitve ETL

(FME) in podatkovne baze PostgreSQL, kar omogoča podporo in povezovanje podatkov iz različnih virov ter njihovo obdelavo s prostorskimi funkcijami, ki podpirajo 3D-geometrije. V povezavi s 3D-prostorskimi analizami je pomemben prispevek naloge tudi z vidika razvoja 3D-modelov stavb, ki jih je mogoče uporabiti za lokacijske storitve znotraj stavbe. Na področju navigacije v notranjosti stavb raziskava s predlaganimi metodami uvaja nov način določitve grafa povezljivosti prostorov, ki temelji na ugotavljanju prostorskih odnosov med 3D-geometrijskimi elementi.

Pri razvoju koncepta 3D-katastra smo upoštevali povezanost zasnove katastrskega podatkovnega modela s standardnimi geoprostorskimi podatkovnimi modeli, kot so IFC, IndoorGML in CityGML, kar je dodatno pomemben prispevek k razvoju večnamenskega 3D-katastra.

7.4 Priložnosti za nadaljnje raziskave

Podrobni podatki o notranjosti stavb odpirajo številne dileme glede zasebnosti in zaščite podatkov. Ob morebitni uporabi predlaganega 3D-katastrskega modela bi bila potrebna temeljita presoja glede teh vprašanj. Nekateri podatki bi tako lahko bili dostopni le pooblaščenim osebam. V takšnih primerih je treba zagotoviti, da pozitivni učinki odtehtajo negativne. Če se katastrski podatki uporabljajo za učinkovitejše delo služb zaščite in reševanja v stavbah, so pozitivni učinki takšne uporabe gotovo zelo pomembni.

3D-prostorske funkcije, ki smo jih uporabljali v okviru doktorske disertacije, omogočajo poleg predstavljenih analiz tudi druge napredne 3D-prostorske analize s 3D-katastrskimi podatki. Tako bi bilo mogoče na temelju 3D-podatkov in nadgrajenih funkcij podpreti podrobnejše poplavne študije, kjer bi z določitvijo višine vode lahko pridobili podatke o prizadetosti posameznih nepremičninskih enot. Prek povezave na vrednost nepremičnin bi lahko dobili dodatne uporabne informacije za odločevalce. Podrobni 3D-podatki o nepremičninah bi lahko omogočili upoštevanje dodatnih dejavnikov pri ocenjevanju vrednosti nepremičnin, kot so na primer odprt pogled na morje, osončenost in podobne tržno pomembne lastnosti. Predlagani podatkovni model 3D-katastra omogoča razvoj in študije številnih 3D-prostorskih analiz na različnih področjih uporabe. Te bodo v prihodnosti vedno bolj razširjene in bodo omogočale reševanje kompleksnih vprašanj in izzivov v prostoru.

Rezultati in ugotovitve doktorske disertacije odpirajo še številne druge možnosti za nadaljnje raziskave na različnih področjih. Za operativno uvedbo 3D-katastrskega sistema je potrebna temeljita analiza in primerjava stroškov oziroma zahtevnosti zajema in obdelave podatkov za vpis nepremičnin med obstoječim in 3D-katastrskim sistemom. Prav tako je potrebna celovita analiza uporabnosti tehnologij, ki omogočajo zajem 3D-prostorskih podatkov v notranjosti stavb za potrebe 3D-katastra. Uvedba 3D-katastrskega sistema zahteva prilagoditve v administrativnih postopkih katastrskega vpisa in upravljanja

podatkov. V zadnjih letih je vse več raziskovalne pozornosti usmerjene v uporabo podatkov BIM kot vhodnih podatkov za 3D-kataster, a slednje zahteva dodatne raziskave in analize. Nadaljnje raziskave so mogoče na področju proceduralnega generiranja (simulacije) podatkov 3D-katastra, kjer bi bilo treba raziskati možnosti vključitve zunanjega oboda stavbe, ki bi omejeval obseg generiranih podatkov.

»Ta stran je namenoma prazna«

8 POVZETEK

Intenzivna izraba prostora, ki se večinoma pojavlja na močno urbaniziranih območjih, prinaša izzive tudi za katastrske sisteme, ki zagotavljajo podatke o prostorskem obsegu pravnih dejstev na nepremičninah. Poleg horizontalne razmejitve pravic, omejitev in odgovornosti na nepremičninah, ki je danes podprta z 2D-tehnologijami tradicionalnih katastrskih sistemov, se na takšnih območjih pojavlja tudi potreba po vertikalnih razmejitvah pravnih dejstev v prostoru. Takšni primeri kličejo po uporabi 3D-tehnologij, ki omogočajo učinkovito in pregledno modeliranje vertikalno razmejenih pravnih dejstev. Na podlagi tega so se ob koncu prejšnjega stoletja začele izvajati številne raziskave, v katerih so obravnavali različne vidike 3D-katastrskih sistemov. V prvem obdobju so prevladovale teoretične raziskave in analize katastrskih sistemov držav po svetu, v zadnjem obdobju pa so aktualne predvsem raziskave glede operativne uvedbe 3D-katastrskih sistemov, 3D-modeliranja katastrskih podatkov in povezovanja katastrskih podatkov s podatki drugih domen, predvsem s podatki BIM. Povezovanje 3D-katastrskih sistemov z ostalimi področji je pomembno predvsem z vidika zahtevnosti zajema in modeliranja 3D-prostorskih entitet. Obenem odpirajo 3D-prostorski podatki v katastrskih sistemih nove možnosti njihove uporabe na drugih področjih. Povezovanje in uporaba katastrskih podatkov na drugih področjih je raziskovalno najaktualnejša tematika v domeni 3D-katastrov. To je tudi področje obravnave in znanstvenega prispevka doktorske disertacije. Doktorska disertacija v poglavjih zaporedno vsebinsko povzema članke, ki so osrednji del doktorske naloge, kjer so predstavljeni rezultati raziskave.

Pregled literature je namenjen identifikaciji aktualnih raziskovalnih tematik in ključnih preteklih raziskav na področju 3D-katastrov. Pregled je zasnovan kronološko, kar omogoča pregled nad razvojem področja od začetkov sistematičnih raziskav konec prejšnjega stoletja do danes. Vključeni pregledni znanstveni članek (Tekavec, Ferlan in Liseč, 2018) podaja pregled raziskav na področju do leta 2018, pregled kasnejšega obdobja pa je vključen kot dopolnilno besedilo drugega poglavja. Po letu 2000 so se predvsem po zaslugi delavnic pod okriljem mednarodnega združenja FIG začele sistematične raziskave. Oblikovana je bila tudi klasifikacija raziskav oziroma podpodročij, ki obsegajo tehnično, pravno in administrativno področje. V pregledu razvoja raziskav je zaznati največje število raziskav s tehničnega področja, kar poudarjata tudi Paulsson in Paasch (2013). V zadnjem obdobju od leta 2018 je raziskovalno področje 3D-katastrov zaznamoval izid publikacije o 3D-katastrih, ki je bila izdana pod okriljem združenja FIG (Oosterom, 2018). Publikacija združuje in sistematično predstavlja vse pomembne dotedanje raziskave na tem področju. Sestavlja jo pet vsebinskih poglavij, ki obravnavajo raziskave pravnih vidikov 3D-katastrov, primere operativne uvedbe 3D-katastrskih sistemov v posameznih državah, modeliranje, upravljanje in shranjevanje 3D-katastrskih podatkov ter možnosti 3D-vizualizacije katastrskih podatkov. V obdobju po letu 2018 je med objavljenimi raziskavami mogoče zaznati velik delež obravnave podatkov BIM v kontekstu 3D-katastrov (Rajabifard, Atazadeh in Kalantari, 2019). Predstavljene raziskave obravnavajo podatke BIM z več vidikov, in sicer kot vhodne

podatke za 3D-kataster, kot podatke, s katerimi je mogoče integrirati 3D-katastrske podatke. Raziskave obravnavajo tudi možnost razširitve standardiziranega podatkovnega modela BIM IFC (ISO, 2013) z objekti, ki predstavljajo nepremičninske enote. Zadnje obdobje je zaznamovala tudi prihajajoča revizija standarda LADM, ki predvideva celovitejšo vključitev konceptov 3D-katastra (Kalogianni in sod., 2020).

Tretje poglavje doktorske disertacije je namenjeno razvoju podatkovnega modela 3D-katastra za stavbe. Podatkovni model temelji na uporabi notranjega prostora kot osnovnega elementa. Temelj za to ponuja možnost za integracijo podatkov takšnega podatkovnega modela s podatki drugih standardnih podatkovnih modelov za stavbe (IndoorGML, CityGML, IFC), ki vsebujejo elemente za modeliranje notranjih prostorov. Pri razvoju podatkovnega modela smo sledili štirim ključnim ciljem:

- (1) Podatkovni model naj ne predpisuje načina shranjevanja in upravljanja podatkov, ki so zunaj domene katastra.
- (2) Podatkovni model naj zagotavlja podatke, ki so strukturirani tako, da omogočajo najširšo možno povezljivost s podatkovnimi modeli sorodnih področij.
- (3) Podatkovni model naj ločuje katastrske podatke o stavbah od podatkov o parcelah in s tem zagotavlja 3D-prostorske podatke tam, kjer je to potrebno, in omogoča postopen prehod na 3D-katastrski sistem.
- (4) Podatkovni model naj bo zasnovan tako, da omogoča izvedbo v podatkovni bazi.

Obravnavali smo dileme in odprta vprašanja glede opredelitve nepremičninskih enot v stavbah in njihove povezave s fizičnimi elementi stavbe. Predlagana je opredelitev nepremičninske enote prek združevanja pripadajočih notranjih prostorov, ki ponuja rešitev predstavljenih dilem in odprtih vprašanj. Predlagani podatkovni model je povezan z elementi standarda LADM, ki je mednarodno široko sprejet koncept za modeliranje katastrskih podatkov. V raziskavi so predstavljene možnosti integracije predlaganega podatkovnega modela s podatkovnimi modeli IFC, CityGML in IndoorGML, s čimer se uporabnost katastrskih podatkov razširja na druga področja uporabe, kar je skladno z osnovno idejo večnamenskega katastra (Tekavec, Čeh in Lisec, 2020).

V četrtem poglavju so obravnavani obstoječi katastrski podatki o stavbah in možnosti njihove uporabe za 3D-modeliranje. Razvit je postopek pretvorbe 2D-etažnih načrtov v 3D-podatkovni model, ki sledi konceptom podatkovnega modela, predstavljenega v tretjem poglavju. Raziskava je usmerjena v obravnavo 3D-modeliranja notranjosti stavb za potrebe navigacije v notranjosti stavb. Opis razvoja postopka vključuje tudi analizo manjkajočih podatkov v trenutnem katastru za ta namen in možnosti za njihovo pridobitev. Postopek pretvorbe sestavljajo tri faze, od katerih je prva namenjena digitalizaciji in pridobivanju manjkajočih podatkov, druga 3D-modeliranju na podlagi digitaliziranih podatkov in tretja zapisu v standardni podatkovni format IndoorGML. Rezultati so tako pomembni tudi za oceno

uporabnosti obstoječih katastrskih podatkov in identifikacijo manjkajočih podatkov, ki bi prispevali k izboljšanju samodejnega 3D-modeliranja (Tekavec in Lisec, 2020a).

Obstoječe raziskave za predstavitev koncepta 3D-katastra uporabljajo zelo omejen nabor testnih podatkov, pogosto v obliki enega ali dveh modelov stavb. Takšen pristop omogoča jasno predstavitev idej raziskave (podatkovni model, postopek, način shranjevanja, vizualizacija), ne omogoča pa ocene, ali je takšne ideje mogoče uveljaviti na širšem območju, predvsem z vidika procesne zmogljivosti informacijskega sistema. Pri razvoju 3D-katastrskih informacijskih sistemov se tako lahko srečamo s težavo, kako za ovrednotenje posameznih procesov in rešitev pridobiti reprezentativen podatkovni niz. Glede na trenutno stopnjo razvoja 3D-katastrskih sistemov po svetu lahko ugotovimo, da 3D-katastrski podatkovni nizi s stvarnimi podatki za širše območje ne obstajajo. V raziskavi, ki je predstavljena v četrtem poglavju (Tekavec, Lisec in Rodrigues, 2020), naslavljamo to pomanjkanje z razvojem postopka modeliranja reprezentativnega 3D-katastrskega podatkovnega niza. Za generiranje 3D-modelov stavb je uporabljena metoda proceduralnega modeliranja. Ta metoda omogoča na podlagi predhodno določenih pravil generiranje poljubnega števila medsebojno različnih modelov stavb. V raziskavi smo se osredotočili na stavbe stanovanjskega tipa. Generirali smo stavbe z različnim številom etaž in jih nato transformirali v obliko, ki omogoča shranjevanje podatkov v podatkovni bazi. Na podlagi dejanskih katastrskih podatkov smo za vsako stavbo določili najustreznejši generiran 3D-model stavbe in ga premaknili na lokacijo stavbe. Tako pridobljen podatkovni niz smo uporabili za oceno procesnih zahtev izvajanja nekaterih 3D-podatkovnih analiz, namenjenih upravljanju 3D-katastrskih podatkov o stavbah, in oceno zmogljivosti orodij za 3D-vizualizacijo podatkov.

Večnamenski 3D-kataster služi poleg osnovnemu tudi drugim namenom uporabe. Z uvajanjem konceptov 3D-katastra v sistem zemljiške administracije se lahko uporabnost katastrskih podatkov poveča, če imajo podatki ustrezno strukturo in vsebino. Rezultati raziskave, predstavljeni v šestem poglavju (Tekavec in Lisec, 2020b), prikazujejo možnost izvedbe zahtevnih 3D-prostorskih analiz za pridobitev grafa povezljivosti na podlagi podatkov o notranjosti stavb. Graf povezljivosti podaja podatkovno podporo za izvedbo postopkov navigacije v notranjosti stavbe. Razvili smo tri metode, ki na podlagi analize prostorskih odnosov med geometrijskimi gradniki določijo graf povezljivosti notranjih prostorov. Metoda NRS omogoča pridobitev informacije o povezljivosti notranjih prostorov, ni pa primerna za določevanje optimalne poti. Metoda NRSE dodaja v graf povezljivosti lokacije prehodov med prostori. Metoda NRS-MAT določi namesto predstavitve vsakega prostora z enim vozliščem podroben graf povezljivosti z določitvijo srednje osi vsakega prostora. Takšen graf povezljivosti ne seka meja prostorov in tako omogoča določevanje optimalne poti znotraj stavb. Vse tri metode so preizkušene na dveh podatkovnih virih. Prvi vir so 3D-katastrski podatki, ki so v skladu z razvitim podatkovnim modelom. Drugi podatkovni vir pa so podatki BIM, zapisani v skladu s podatkovnim modelom IFC. Predstavljene so tako prednosti kot tudi omejitve razvitih metod.

Sedmo poglavje je namenjeno razpravi, ki povezuje vsebino celotne doktorske disertacije. Poglavje zaključuje sklepi, kjer so obravnavane hipoteze in podane sklepne ugotovitve ter predstavljeni ključni izzivi za prihodnje raziskave na tem področju.

Rezultati doktorske raziskave so izrednega pomena za področje razvoja 3D-katastra na mednarodni ravni, saj uvajamo izviren pristop k modeliranju 3D-katastrskih podatkov za primer stavb, kjer je nepremičninska enota osnovana na opredelitvi notranjih prostorov stavb. Tak pristop omogoča prilagoditev modeliranja 3D-stavb v odvisnosti od zakonske opredelitve mej pravic, omejitev in odgovornosti na nepremičninskih enotah. Pri tem je pomembno, da smo upoštevali povezanost zasnove katastrskega podatkovnega modela s standardnimi geoprostorskimi podatkovnimi modeli, kot so IFC, IndoorGML in CityGML, kar je pomemben prispevek k razvoju večnamenskega 3D-katastra. Izvirnost raziskave se med drugim nanaša na proceduralno modeliranje, s čimer smo ponudili rešitev za težavo pomanjkanja podatkov za 3D-modeliranje stavb. S tem nam je uspelo izvirno simulirati veliko podatkovno bazo, ki je primerljiva z obsegom dejanskih katastrskih podatkov. Simulirane podatke smo nadalje uporabili za izvedbo 3D-prostorskih analiz, povezanih z upravljanjem 3D-katastrskih podatkov. S tem rezultati raziskave pomembno prispevajo k razvoju in načrtovanju informacijskih sistemov za 3D-kataster, predvsem z vidika možnosti analize zmogljivosti obdelave 3D-podatkov, hkrati pa smo s pristopom pomembno prispevali k razvoju 3D-prostorskih analiz.

9 SUMMARY

Space is a limited good, especially in densely populated urban areas. This fact represents a challenge to the cadastral systems, which provide data about the spatial extent of rights, restrictions, and responsibilities (RRRs). The traditional 2D cadastral systems are becoming insufficient for the management of RRRs in such areas where there is the need to delimit the RRRs not only horizontally but also vertically. Therefore, there is an increasing need to introduce 3D technologies in cadastral systems, which allow for efficient storage and management of 3D RRRs. At the start of this century, this need stimulated research on several aspects related to 3D cadastral systems. In the first decade, most research activities were mostly theoretical, dealing with various data models and analysing different cadastral systems worldwide. Recently, mainly due to advancements in 3D technologies, research on the operational introduction of 3D cadastral systems, 3D modelling of cadastral entities, and 3D spatial data integration has become highly relevant. Compared to 2D spatial data, 3D spatial data is more complex and more costly to acquire and model. This fact increases the importance of data integration among various domains, which currently represents one of the most challenging research topics in the field of 3D cadastre. This is also the field for which this doctoral thesis provides the most important scientific contributions. The doctoral dissertation comprises a sequence of summaries of the scientific articles, which are the central part of the dissertation and are all related to the field of 3D cadastre.

The literature review highlights the most important publications in the field of 3D cadastres. The scientific article provides a systematic review of the research up to 2018 (Tekavec, Ferlan and Lisec, 2018). The additional content of the second chapter provides a review of the literature published recently, from 2018 onward. After the year 2000, systematic research started with the first FIG workshop on 3D cadastres in Delft, the Netherlands. The first classification of the field was formed, providing the most important aspects of the 3D cadastres – the technical, institutional, and legal. To date, most publications were related to technical aspects (Paulsson and Paasch, 2013). In 2018, the FIG issued a publication that provides a systematic review and synthesis of all research related to 3D cadastres (Oosterom, 2018). It comprises five chapters that deal with legal aspects, an operational introduction of 3D cadastres, modelling, storage, management and the 3D visualisation of 3D cadastral data. Recently, the increased research activities deal with the integration of 3D cadastre and BIM (Rajabifard, Atazadeh in Kalantari, 2019). The integrations vary from using BIM as a data source for 3D cadastre or including the 3D cadastral data into BIM. Regarding the latter, the research is also focused on extending the IFC standard to accommodate the 3D cadastral objects in the form of real property units. Recently, several research activities were related to the forthcoming revision of the LADM standard, which aims to include 3D cadastral concepts with greater levels of detail (Kalogianni et al., 2020).

The third chapter of the dissertation presents the development of the 3D cadastral data model for buildings. The data model is based on indoor spaces, which represent its core element. This model enables the integration of the 3D cadastral data with the standardised data models for buildings from

other domains (IndoorGML, CityGML, IFC), which all include elements that represent indoor spaces. The development of the data model has been guided by the following objectives:

- (1) The cadastral data model for buildings should not require storage and maintenance of the data outside the cadastral domain.
- (2) The cadastral data model should provide data that is structured in a way that enables as wide a cross-domain integration as possible on the data input and output sides.
- (3) The cadastral data model should differentiate building data from land parcel data (e.g., for buildings, it should provide a separate (but integrated) data model or separate object classes), aiming to provide a step-by-step development of a 3D cadastre within a traditional 2D data model.
- (4) The implementation should be feasible in a database management system (DBMS).

We identified and discussed several dilemmas related to the definition of real property units and their link to the building's physical components. The proposed data model realises the real property unit using the aggregation of the corresponding indoor spaces. It is shown that this approach solves the identified dilemmas. The proposed data model is linked to the elements of the LADM data model, which represents a widely accepted cadastral data model. We provide and discuss the options for integration of the proposed 3D cadastral data model with IFC, CityGML and IndoorGML data models. This increases the usability of 3D cadastral data, which represents the basic idea of multipurpose cadastre (Tekavec, Čeh and Lisec, 2020).

The fourth chapter deals with the existing 2D cadastral data on buildings. We developed a process that enables the 3D modelling of 2D cadastral data in the form of floor plans. The 3D data model follows the concepts presented in the third chapter. The 3D modelling of the data focuses on providing the 3D model suitable for indoor navigation applications. The development of the process includes analysing the missing data and providing the options for acquiring this data. The process is comprised of three separate phases. In the first phase, the input data is digitised, and missing data are acquired. The second phase transforms the digitised 2D data into 3D models, and in the third phase, data structures the transformed data according to the IndoorGML data model, which is used for indoor navigation applications. The research presented in the fourth chapter represents a valuable tool for assessing the usability of the existing cadastral data for 3D modelling and identification of the missing data that would increase the automation of the 3D modelling process (Tekavec and Lisec, 2020b).

In the literature related to 3D cadastrals, several articles use case studies to present and clarify the application of the ideas, data models, processes, and similar. Mostly, the cadastral systems are established for large administrative areas (countries, states, regions). The case studies found in the literature include a very limited number of datasets. Based on these studies, it is not possible to assess the applicability of the presented solution. During the development of 3D cadastral systems, certain processes and solutions need to be evaluated using the test datasets. Currently, there is no country with

the operationally introduced 3D cadastral system. Therefore, there is no real large-scale 3D cadastral dataset available worldwide. The research presented in the fifth chapter (Tekavec, Lisec and Rodrigues, 2020) addresses this with the development of the process for simulating the large-scale representative 3D cadastral dataset. The procedural modelling method is used to generate randomised 3D building models with different numbers of storeys. We limited the research to the simulation of residential building types. The generated buildings are transformed to allow storage in the spatial database. The generated building models are then referenced to the real cadastral data, using the location and the number of storeys of the real building. We simulated the 3D cadastral dataset for the whole of Slovenia and used it to evaluate some 3D data management queries and 3D visualisation options.

The multipurpose cadastre serves additional purposes beyond its core function. The inclusion of the 3D concepts and technologies in cadastral systems can significantly increase the usability of cadastral data. In the sixth chapter, the development of the methods to generate indoor connectivity graphs, which are based on the extraction of spatial relationships between 3D indoor space geometries, is presented. Three methods are developed and presented, which use advanced 3D spatial analyses, based on SFCGAL functions (Tekavec and Lisec, 2020b). The NRS method provides a basic node-relation structure that is not suitable for indoor path planning. Each indoor space is represented by one node. The nodes of the connected spaces are connected with edges. The NRSE method adds the nodes to each connection between spaces, making the graph more representative. The NRS-MAT method adds the path inside each indoor space, which also allows indoor path planning. The presented methods are tested using two different data sources. The first source is the 3D cadastral datasets, modelled according to the 3D cadastral data mode proposed in this doctoral dissertation, while the second data source is the IFC test dataset. We present and discuss the advantages and limitations of the presented methods.

The seventh chapter is dedicated to the discussion; all the results are systematically presented. The chapter ends with conclusions, and the findings regarding the research hypotheses are given, together with the summary of the original contribution to the science and directions for future research activities.

The doctoral research work results are of high importance for the development of the 3D cadastre, as we introduce an original approach to modelling 3D cadastral data for the case of buildings for which the real estate unit is based on the definition of interior spaces of buildings. Such an approach allows for the adaptation of the modelling of 3D buildings in relation to the legal definition of RRRS' spatial extent. In this respect, it is crucial to consider the integration of the design of the cadastral data model with standard geospatial data models such as IFC, IndoorGML and CityGML, which is an important contribution to the development of the multipurpose 3D cadastre. An original approach also relates to procedural modelling, thus relocating the problem of data shortage for 3D modelling of buildings. In this way, we were able to simulate a large database comparable to the volume of actual cadastral data in

an original way. The simulated data were further used to perform 3D spatial analyses related to 3D cadastral data management. With this, research results make an essential contribution to the development of information systems for 3D cadastre, especially in terms of assessing data processing capacity, while at the same time, the significant contribution has to be seen in 3D spatial analyses.

VIRI

Abdul-Rahman, A. (ur.). 2016. *Advances in 3D Geoinformation. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, Springer International Publishing. 512 str. doi: 10.1007/978-3-319-25691-7

Aien, A., Kalantari, M., Rajabifard, A., Williamson, I., Wallace, J. 2013. Towards integration of 3D legal and physical objects in cadastral data models. *Land Use Policy* 35. doi:10.1016/j.landusepol.2013.05.014

Aien, A., Rajabifard, A., Kalantari, M., Shojaei, D. 2015. Integrating Legal and Physical Dimensions of Urban Environments. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 4, 3: 1442–1479. doi:10.3390/ijgi4031442

Alattas, A., Arabia, S., van Oosterom, P., Zlatanova, S. 2019. Initial Country Profile of the Kingdom of Saudi Arabia based on LADM Initial Country Profile of the Kingdom of Saudi Arabia based on LADM. V: van Oosterom, P. (ur.), Lemmen, C. (ur.), Rahman, A. A. (ur.). *Proceedings of the 8th International FIG workshop on the Land Administration Domain Model*, Kuala Lumpur, Malaysia. International Federation of Surveyors (FIG), Copenhagen, Denmark.

Alattas, A., Zlatanova, S., Van Oosterom, P., Chatzinikolaou, E., Lemmen, C., Li, K.-J. 2017. Supporting Indoor Navigation Using Access Rights to Spaces Based on Combined Use of IndoorGML and LADM Models. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 6, 12: 384. doi:10.3390/ijgi6120384

Alberdi, R., Erba, D. A. 2020. Modeling Legal Land Object for waterbodies in the context of 4D cadastre. *Land Use Policy* 98. doi:10.1016/j.landusepol.2019.104417

Amirebrahimi, S., Rajabifard, A., Sabri, S., Mendis, P. 2016. Spatial Information in Support of 3D Flood Damage Assessment of Buildings at Micro Level: A Review. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 4, 2W1: 73–80. doi:10.5194/isprs-annals-IV-2-W1-73-2016.

Arroyo Ogori, K., Diakit , A., Krijnen, T., Ledoux, H., Stoter, J. 2018. Processing BIM and GIS Models in Practice: Experiences and Recommendations from a GeoBIM Project in The Netherlands. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 7, 8: 311. doi:10.3390/ijgi7080311

Asghari, A., Kalantari, M., Rajabifard, A. 2020. A structured framework for 3D cadastral data validation – a case study for Victoria, Australia. *Land Use Policy* 98. doi:10.1016/j.landusepol.2019.104359

Atazadeh, B., Kalantari, M., Rajabifard, A., Ho, S., Ngo, T. 2017. Building Information Modelling for High-rise Land Administration. *Transactions in GIS* 21, 1: 91–113. doi:10.1111/tgis.12199

Atazadeh, B., Rajabifard, A., Kalantari, M., Shin, J. 2018. A BIM-Driven Approach to Managing Common Properties within Multi-Owned Developments. 6th International FIG 3D Cadastre Workshop, Delft, the Netherlands. International Federation of Surveyors (FIG), Copenhagen, Denmark.

Atazadeh, B., Rajabifard, A., Zhang, Y., Barzegar, M. 2019. Querying 3D Cadastral Information from BIM Models. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 8, 8: 329. doi:10.3390/ijgi8080329

- Barzegar, M., Rajabifard, A., Kalantari, M., Atazadeh, B. 2020. 3D BIM-enabled spatial query for retrieving property boundaries: a case study in Victoria, Australia. *International Journal of Geographical Information Science* 34, 2: 251–271. doi:10.1080/13658816.2019.1658877
- Biljecki, F., Stoter, J., Ledoux, H., Zlatanova, S., Çöltekin, A. 2015. Applications of 3D City Models: State of the Art Review. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 4, 4: 2842–2889. doi:10.3390/ijgi4042842 <http://www.mdpi.com/2220-9964/4/4/2842>.
- BIMcollab. 2020., Examples and templates. Dostopno na spletu: <https://www.bimcollab.com/en/Support/Support/Downloads/Examples-templates> (Pridobljeno 3. 11. 2020).
- Boguslawski, P., Gold, C. 2016. The Dual Half-Edge—A Topological Primal/Dual Data Structure and Construction Operators for Modelling and Manipulating Cell Complexes. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 5, 2: 19. doi:10.3390/ijgi5020019
- Çağdaş, V. 2012. An application domain extension to citygml for immovable property taxation: A Turkish case study. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 21, 1: 545–555. doi:10.1016/j.jag.2012.07.013
- Drobež, P. 2016. Analiza možnosti vzpostavitve 3D katastra ob uporabi virov daljinskega zaznavanja. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo (samozaložba Drobež, P.): 167 str.
- El-mekawy, M., Ostman, A. 2012. Feasibility of Building Information Models for 3D Cadastre in Unified City Models. *International Journal of E-Planning Research* 1, 4: 35–58. doi:10.4018/ijep.2012100103
- Ghawana, T., Sargent, J., Bennett, R. M., Zevenbergen, J., Khandelwal, P., Rahman, S. 2020. 3D Cadastres in India: Examining the status and potential for land administration and management in Delhi. *Land Use Policy* 98. doi:10.1016/j.landusepol.2019.104389
- Gkeli, M., Potsiou, C., Ioannidis, C. 2020. A technical solution for 3D crowdsourced cadastral surveys. *Land Use Policy* 98. doi:10.1016/j.landusepol.2019.104419
- Gózdź, K., Pachelski, W., van Oosterom, P., Coors, V. 2014. The Possibilities of Using CityGML for 3D Representation of Buildings in the Cadastre. 4th International Workshop on 3D Cadastres, Dubai, United Arab Emirates. International Federation of Surveyors (FIG), Copenhagen, Denmark.
- Griffith-Charles, C., Sutherland, M. 2020. 3D cadastres for densely occupied informal situations: Necessity and possibility. *Land Use Policy* 98. doi:10.1016/j.landusepol.2019.104372
- Gröger, G., Plümer, L. 2012. CityGML – Interoperable semantic 3D city models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 71: 12–33. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2012.04.004
- Huang, H., Gartner, G., Krisp, J. M., Raubal, M., Van, N. 2018. Location based services : ongoing evolution and research agenda. *Journal of Location Based Services* 12, 2: 63–93. doi:10.1080/17489725.2018.1508763

Huml, M. 2001. How To Define Real Estate: 2D or 3D? Legal View, Conditions and Experiences in the Czech Republic. V: van Oosterom, P. (ur.), J.E. Stoter, J. (ur.), Fendel, E. M. (ur.). Registration of Properties in Strata, International Workshop on 3D Cadastres, Delft, the Netherlands. International Federation of Surveyors (FIG), Copenhagen, Denmark.

Indrajit, A., Jaya, V. E., Loenen, B. Van, Snaidman, A., Ploeger, H., Oosterom, P. Van 2019. Implementation of Spatial Planning Package for Construction of an LADM Country Profile : Reducing Asymmetric Access to Information of RRRs in Indonesia. V: van Oosterom, P. (ur.), Lemmen, C. (ur.), Rahman, A. A. (ur.). Proceedings of the 8th International FIG workshop on the Land Administration Domain Model, Kuala Lumpur, Malaysia. International Federation of Surveyors (FIG), Copenhagen, Denmark.

INSPIRE TWG-CP. 2009. Thematic Working Group Cadastral Parcels. D2.8.I.6 INSPIRE Data Specification on Cadastral Parcels – Guidelines, European Commission Joint Research Centre

ISO 16739:2013. Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries.

ISO 19136:2007, Geographic information – Geography Markup Language (GML).

ISO 19152:2012. LADM- Land Administration Domain Model

Kalogianni, E., Kalantari, M., Dimopoulou, E., van Oosterom, P. 2019. LADM country profiles development : aspects to be reflected and considered. V: van Oosterom, P. (ur.), Lemmen, C. (ur.), Rahman, A. A. (ur.). Proceedings of the 8th International FIG workshop on the Land Administration Domain Model, Kuala Lumpur, Malaysia.

Kalogianni, E., van Oosterom, P., Dimopoulou, E., Lemmen, C. 2020. 3D land administration: A review and a future vision in the context of the spatial development lifecycle. ISPRS International Journal of Geo-Information 9, 2: 107. doi:10.3390/ijgi9020107

Kara, A., van Oosterom, P., Çağdaş, V., Işıkdag, Ü., Lemmen, C. 2020. 3 Dimensional data research for property valuation in the context of the LADM Valuation Information Model. Land Use Policy 98. doi:10.1016/j.landusepol.2019.104179

Karabin, M., Kitsakis, D., Koeva, M., Navratil, G., Paasch, J. M., Paulsson, J., Vučić, N., Janečka, K., Liseč, A. 2020. Layer approach to ownership in 3D cadastre in the case of underground tunnels. Land Use Policy 98. doi:10.1016/j.landusepol.2020.104464

Kaufmann, J., Steudtler, D. 1998. Cadastre 2014: A Vision for Future Cadastral Systems. Working Group 7.1, Commission 7, International Federation of Surveyors (FIG), Copenhagen, Denmark.

Kazar, B. M., Kothuri, R., van Oosterom, P., Ravada, S. 2008. On Valid and Invalid Three-Dimensional Geometries. V: van Oosterom, P. (ur.), Zlatanova, S. (ur.), Penninga, F. (ur.), and Fendel, E. M. (ur.). Advances in 3D Geoinformation Systems. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/978-3-540-72135-2_2

Khan, A. A., Donaubaue, A., Kolbe, T. H. 2014. A multi-step transformation process for automatically generating indoor routing graphs from existing semantic 3D building models. V: Breunig, M., Al-Doori, M., Butwilowski, E., Kuper, P. V., Benner, J., Haefele, K.-H. Proceedings of the 9th 3D GeoInfo

Conference, Dubai, United Arab Emirates. Karlsruhe, Germany.

Kitsakis, D., Dimopoulou, E. 2020. Assessing the environmental impact of 3D public law restrictions. *Land Use Policy* 98. doi:10.1016/j.landusepol.2019.104151

Knoth, L., Atazadeh, B., Rajabifard, A. 2020. Developing a new framework based on solid models for 3D cadastral. *Land Use Policy* 92. doi:10.1016/j.landusepol.2020.104480

Knoth, L., Scholz, J., Strobl, J., Mittlböck, M., Vockner, B., Atzl, C., Rajabifard, A., Atazadeh, B. 2018. Cross-Domain Building Models—A Step towards Interoperability. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 7, 9: 363. doi:10.3390/ijgi7090363

Kolbe, T. H. 2009. Representing and Exchanging 3D City Models with CityGML. V: Lee, J. (ur.), Zlatanova. S. (ur.). *3D Geo-Information Sciences*. Springer-Verlag, Berlin, str. 15–32. doi: 10.1007/978-3-540-87395-2_2

Kolbe, T. H. (ur.), König, G. (ur.), Nagel, C. (ur.). 2011. *Advances in 3D Geo-Information Sciences*. Series: Lecture notes in Geoinformation and Cartography. Berlin, Springer-Verlag. 310 str. doi: 10.1007/978-3-642-12670-3

Larsson, K., Paasch, J. M., Paulsson, J. 2020. Representation of 3D cadastral boundaries - From analogue to digital. *Land Use Policy* 98. doi:10.1016/j.landusepol.2019.104178

Lee, J. (ur.), Zlatanova. S. (ur.). 2009. *3D Geo-Information Sciences*. Berlin, Springer-Verlag. 438 str. doi: 10.1007/978-3-540-87395-2

Ledoux, H. 2013. On the validation of solids represented with the international standards for geographic information. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 28, 9: 693–706. doi:10.1111/mice.12043

Lemmen, C., van Oosterom, P., Bennett, R. 2015. The Land Administration Domain Model. *Land Use Policy* 49. doi:10.1016/j.landusepol.2015.01.014

Lewandowicz, E., Lisowski, P., Flisek, P. 2019. A modified methodology for generating indoor navigation models. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 8, 2: doi:10.3390/ijgi8020060 .

Li, L., Wu, J., Zhu, H., Duan, X., Luo, F. 2016. 3D modeling of the ownership structure of condominium units. *Computers, Environment and Urban Systems* 59: 50–63. doi:10.1016/j.compenvurbsys.2016.05.004

Lin, Y.-H., Liu, Y.-S., Gao, G., Han, X.-G., Lai, C.-Y., Gu, M. 2013. The IFC-based path planning for 3D indoor spaces. *Advanced Engineering Informatics* 27, 2: 189–205. doi:10.1016/j.aei.2012.10.001

Liu, X., Wang, X., Wright, G., Cheng, J., Li, X., Liu, R. 2017. A State-of-the-Art Review on the Integration of Building Information Modeling (BIM) and Geographic Information System (GIS). *ISPRS International Journal of Geo-Information* 6, 2: 53. doi:10.3390/ijgi6020053

Morales, J., Lemmen, C., De By, R., Molendijk, M., Oosterbroek, E.-P., Ortiz Dávila, A. E. 2019. On the Design of a Modern and Generic Approach to Land Registration: The Colombia Experience. V: van Oosterom, P. (ur.), Lemmen, C. (ur.), Rahman, A. A. (ur.). *Proceedings of the 8th International FIG*

workshop on the Land Administration Domain Model, Kuala Lumpur, Malaysia. International Federation of Surveyors (FIG), Copenhagen, Denmark.

Mortari, F., Clementini, E., Zlatanova, S., Liu, L. 2019. An indoor navigation model and its network extraction. *Applied Geomatics* 11, 4: 413–427. doi:10.1007/s12518-019-00273-8

Oldfield, J., van Oosterom, P., Beetz, J., Krijnen, T. 2017. Working with Open BIM Standards to Source Legal Spaces for a 3D Cadastre. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 6, 11: 351. doi:10.3390/ijgi6110351

Norado, F., Harrie, L., Arroyo Ogori, K., Biljecki, F., Ellul, C., Krijnen, T., Eriksson, H., Guler, D., Hintz, D., Jadidi, M. A., Pla, M., Sanchez, S., Soini, V. P., Stouffs, R., Tekavec, J., Stoter, J. 2020. Tools for BIM-GIS integration (IFC georeferencing and conversions) - results from the GeoBIM benchmark 2019. *ISPRS international journal of geo-information* 9, 502: 1–33, ilustr. doi:10.3390/ijgi9090502

Olfat, H., Atazadeh, B., Shojaei, D., Rajabifard, A. 2019. The Feasibility of a BIM-Driven Approach to Support Building Subdivision Workflows—Case Study of Victoria, Australia. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 8, 11: 499. doi:10.3390/ijgi8110499

Open Geospatial Consortium. 2014. OGC IndoorGML, version 1.0. <https://www.ogc.org/standards/indoorgml> (Pridobljeno: 3. 11. 2020.)

Open Geospatial Consortium. 2016. OGC Land and Infrastructure Conceptual Model Standard (LandInfra), version 1.0. <https://www.ogc.org/standards/infragml> (Pridobljeno: 3. 11. 2020.)

Oukes, P., Lemmen, C., Folmer, E. 2019. Interoperability issues related to LADM profiled implementations – A first exploration. V: van Oosterom, P. (ur.), Lemmen, C. (ur.), Rahman, A. A. (ur.). *Proceedings of the 8th International FIG workshop on the Land Administration Domain Model, Kuala Lumpur, Malaysia. International Federation of Surveyors (FIG), Copenhagen, Denmark.*

Paulsson, J. 2007. 3D Property Rights. An Analysis of Key Factors Based on International Experience. Doktorska disertacija. Švedska, Stockholm, Royal Institute of Technology, School of Architecture and the Built Environment (samozaložba Paulsson, J.): 351 str.

Paulsson, J., Paasch, J. M. 2013. 3D property research from a legal perspective. *Computers, Environment and Urban Systems* 40. doi:10.1016/j.compenurbsys.2012.11.004

Rajabifard, A., Atazadeh, B., Kalantari, M. 2018. A critical evaluation of 3D spatial information models for managing legal arrangements of multi- owned developments in Victoria , Australia. *International Journal of Geographical Information Science* 32, 10: 2098–2122. doi:10.1080/13658816.2018.1484125

Rajabifard, A., Atazadeh, B., Kalantari, M. 2019. *BIM and Urban Land Administration*. CRC Press, Boca Raton: 236 str.

Rajabifard, A., Atazadeh, B., Yip, K. M., Kalantari, M., Anaraki, M. R., Olfat, H., Badiee, F., Shojaei, D., Chan, K. L., Mohd Zain, M. A. 2019. Design and Implementation of a 3D National Digital Cadastral Database based on Land Administration Domain Model : Lessons Learned from a 3D Cadaster Project in Malaysia. V: van Oosterom, P. (ur.), Lemmen, C. (ur.), Rahman, A. A. (ur.). *Proceedings of the 8th International FIG workshop on the Land Administration Domain Model, Kuala Lumpur, Malaysia. International Federation of Surveyors (FIG), Copenhagen, Denmark.*

Rodrigues, E., Gaspar, A. R., Gomes, Á. 2013. An evolutionary strategy enhanced with a local search technique for the space allocation problem in architecture, Part 1: Methodology. *Computer-Aided Design*, 45, 887-897. doi: 10.1016/j.cad.2013.01.001

SFGGAL. 2020. Wrapper around CGAL Library for 2D and 3D Operations Based on OGC Standards. 2019. Dostopno na spletu: <http://www.sfgal.org> (Pridobljeno 3. 11. 2020).

Shnaidman, A., van Oosterom, P., Barazani, S., Marcovich, A., Avni Shoham, S. 2019. LADM-based Israeli Country Profile : Toward Implementation of 3D Cadastre Registration. V: van Oosterom, P. (ur.), Lemmen, C. (ur.), Rahman, A. A. (ur.). *Proceedings of the 8th International FIG workshop on the Land Administration Domain Model*, Kuala Lumpur, Malaysia. International Federation of Surveyors (FIG), Copenhagen, Denmark.

Shojaei, D., Rajabifard, A., Kalantari, M., Bishop, I. D., Aien, A. 2015. Design and development of a web-based 3D cadastral visualisation prototype. *International Journal of Digital Earth* 8, 7: 538–557. doi:10.1080/17538947.2014.902512

Sladić, D., Radulović, A., Govedarica, M. 2020. Development of process model for Serbian cadastre. *Land Use Policy* 98. doi:10.1016/j.landusepol.2019.104273

Staats, B. R., Diakité, A. A., Voûte, R. L., Zlatanova, S. 2019. Detection of doors in a voxel model, derived from a point cloud and its scanner trajectory, to improve the segmentation of the walkable space. *International Journal of Urban Sciences* 23, 3: 369–390. doi:10.1080/12265934.2018.1553685

Stoter, J. 2000. Needs, possibilities and constraints to develop a 3D cadastral registration system. V: Fendel, E. M. (ur.). *Proceedings of UDMS 2000, 22nd Urban Data Management Symposium*, Delft, the Netherlands. Urban Data Management Society, Delft, the Netherlands.

Stoter, J., Salzman, M. 2001. Towards a 3D cadastre: where do cadastral needs and technical possibilities meet? V: van Oosterom, P. (ur.), J.E. Stoter, J. (ur.), Fendel, E. M. (ur.). *Registration of Properties in Strata, International Workshop on 3D Cadastres*, Delft, the Netherlands. International Federation of Surveyors (FIG), Copenhagen, Denmark.

Stoter, J. 2004. 3D Cadastre. Doktorska disertacija. Delft, TU Delft (samozaložba Stoter, J.): 327 str.

Stoter, J., Ploeger, H., van Oosterom, P. 2013. 3D cadastre in the Netherlands: Developments and international applicability. *Computers, Environment and Urban Systems* 40: 56–67. doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2012.08.008

Stoter, J., Ploeger, H., Roes, R., Riet, E. Van Der, Biljecki, F., Ledoux, H., Kok, D., Kim, S. 2017. Registration of Multi-Level Property Rights in 3D in The Netherlands: Two Cases and Next Steps in Further Implementation. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 6, 6: 158. doi:10.3390/ijgi6060158

Stoter, J., Ho, S., Biljecki, F. 2019. Considerations for a contemporary 3D cadastre for our times. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 42, 4/W15: 81–88. doi:10.5194/isprs-archives-XLII-4-W15-81-2019 .

Stoter, J., Biljecki, F., Ho, S. 2020. How might an Lod Logic Framework Help to Bridge the 3D Cadastre Research-to-Practice Gap?. *FIG Working Week 2020*, Amsterdam, the Netherlands. International

Federation of Surveyors (FIG), Copenhagen, Denmark.

Sun, J., Mi, S., Olsson, P., Paulsson, J., Harrie, L. 2019. Utilizing BIM and GIS for Representation and Visualization of 3D Cadastre. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 8, 11: 503. doi:10.3390/ijgi8110503

Sun, J., Paulsson, J. 2020. A BIM-based Approach for Swedish 3D Cadastral Management. FIG Working Week 2020, Amsterdam, the Netherlands. International Federation of Surveyors (FIG), Copenhagen, Denmark.

Tekavec, J., Čeh, M., Lisec, A. 2020. Indoor space as the basis for modelling of buildings in a 3D Cadastre. *Survey Review*. Doi:10.1080/00396265.2020.1838761

Tekavec, J., Ferlan, M., Lisec, A. 2018. A review of research on 3D real property cadastre. *Geodetski Vestnik* 62, 2: 249–278. doi:10.15292/geodetski-vestnik.2018.02.249-278

Tekavec, J., Lisec, A. 2020a. Cadastral data as a source for 3D indoor modelling. *Land Use Policy* 98. doi:10.1016/j.landusepol.2019.104322

Tekavec, J., Lisec, A. 2020b. 3D Geometry-Based Indoor Network Extraction for Navigation Applications Using SFCGAL. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 9, 7: 417. doi:10.3390/ijgi9070417

Tekavec, J., Lisec, A., Rodrigues, E. 2020. Simulating Large-Scale 3D Cadastral Dataset Using Procedural Modelling. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 9, 10: 598. doi:10.3390/ijgi9100598

Teo, T.-A., Cho, K.-H. 2016. BIM-oriented indoor network model for indoor and outdoor combined route planning. *Advanced Engineering Informatics* 30, 3: 268–282. doi:10.1016/j.aei.2016.04.007

Thompson, R. J., Van Oosterom, P., Karki, S., Cowie, B. 2015. A Taxonomy of Spatial Units in a Mixed 2D and 3D Cadastral Database. FIG Working Week 2015, Sofia, Bulgaria. International Federation of Surveyors (FIG), Copenhagen, Denmark.

Triglav Čekada, M., Lisec, A. 2019. Opportunities for using the volunteered geographic information within the national spatial data infrastructure. *Geodetski vestnik* 63, 02: 199–212. doi:10.15292/geodetski-vestnik.2019.02.199-212

van der Molen, P. 2001. Institutional Aspects of 3D Cadastres Institutional Aspects of 3D Cadastres. V: van Oosterom, P. (ur.), J.E. Stoter, J. (ur.), Fendel, E. M. (ur.). *Registration of Properties in Strata*, International Workshop on 3D Cadastres, Delft, the Netherlands. International Federation of Surveyors (FIG), Copenhagen, Denmark.

van Oosterom, P. (ur.). 2018. *Best Practices 3D Cadastres*. International Federation of Surveyors (FIG), Copenhagen, Denmark: 258 str.

van Oosterom, P., Bennett, R., Koeva, M., Lemmen, C. 2020. 3D Land Administration for 3D Land Uses. *Land Use Policy* 98. doi:10.1016/j.landusepol.2020.104665

- van Oosterom, P., Lemmen, C. 2015. The Land Administration Domain Model (LADM): Motivation, standardisation, application and further development. *Land Use Policy* 49. doi:10.1016/j.landusepol.2015.09.032
- van Oosterom, P., Ploeger, H., Stoter, J., Thompson, R. 2006. Aspects of a 4D cadastre: a first exploration. XXIII International FIG Congress, Munich, Germany. International Federation of Surveyors (FIG), Copenhagen, Denmark.
- Višnjevac, N., Mihajlović, R., Šoškić, M., Cvijetinović, Ž., Bajat, B. 2019. Prototype of the 3D Cadastral System Based on a NoSQL Database and a JavaScript Visualization Application. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 8, 5: 227. doi:10.3390/ijgi8050227
- Vučić, N., Mađer, M., Vranić, S., Roić, M. 2020. Initial 3D cadastre registration by cadastral resurvey in the Republic of Croatia. *Land Use Policy* 98. doi:10.1016/j.landusepol.2019.104335
- Wang, C. 2015. 3D Visualization of Cadastre: Assessing the Suitability of Visual Variables and Enhancement Techniques in the 3D Model of Condominium Property Units. Doktorska disertacija. Québec, Université Laval, Québec (samozaložba Wang C.): 163 str.
- Xu, M., Wei, S., Zlatanova, S., Zhang, R. 2017. BIM-based indoor path planning considering obstacles. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences IV-2/W4, 2W4*: 417–423. doi:10.5194/isprs-annals-IV-2-W4-417-2017
- Yan, J., Soon, K. H., Jaw, S. W., Schrotter, G. 2019. A LADM-based 3D Underground Utility Data Model : A Case Study of Singapore. V: van Oosterom, P. (ur.), Lemmen, C. (ur.), Rahman, A. A. (ur.). Proceedings of the 8th International FIG workshop on the Land Administration Domain Model, Kuala Lumpur, Malaysia. International Federation of Surveyors (FIG), Copenhagen, Denmark.
- Yang, L., Worboys, M. 2015. Generation of navigation graphs for indoor space. *International Journal of Geographical Information Science* 29, 10: 1737–1756. doi:10.1080/13658816.2015.1041141
- Ying, S., Guo, R., Yang, J., He, B., Zhao, Z., Jin, F. 2017. 3D Space Shift from CityGML LoD3-Based Multiple Building Elements to a 3D Volumetric Object. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 6, 1: 17. doi:10.3390/ijgi6010017
- Zlatanova, S., van Oosterom, P., Lee, J., Li, K. J., Lemmen, C. H. J. 2016. Ladm and Indoorgml for Support of Indoor Space Identification. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences IV-2/W1, October*: 257–263. doi:10.5194/isprs-annals-IV-2-W1-257-2016
- Zulkifli, N. A., Rahman, A. A., Siew, C. B. 2019. Database Design and Development of 3D Cadastral Registration based on LADM. V: van Oosterom, P. (ur.), Lemmen, C. (ur.), Rahman, A. A. (ur.). Proceedings of the 8th International FIG workshop on the Land Administration Domain Model, Kuala Lumpur, Malaysia. International Federation of Surveyors (FIG), Copenhagen, Denmark.
- Zulkifli, N. A., Rahman, A. A., van Oosterom, P., Tan, L. C., Jamil, H., Teng, C. H., Looi, K. S., Chan, K. L. 2015. The importance of Malaysian Land Administration Domain Model country profile in land policy. *Land Use Policy* 49. doi:10.1016/j.landusepol.2015.07.015