

Jukka Selin

Jukka Selin

Tietomallin pelillistäminen ja toiminnallisen suunnittelun menetelmä rakennusten suunnittelun apuna

Tietomallin pelillistäminen ja toiminnallisen suunnittelun menetelmä rakennusten suunnittelun apuna

Jukka Selin

Tietomallin pelillistäminen ja
toiminnallisen suunnittelun
menetelmä rakennusten
suunnittelun apuna

ACADEMIC DISSERTATION

To be presented with the permission of the Faculty of Information Technology
and Communication Sciences of Tampere University for public discussion at
Tampere University in the lecture hall B1096 on March 26th, 2021, at 12 o'clock

Faculty of Information Technology and Communication Sciences
Tampere University

Dissertations in Interactive Technology, Number 34
Tampere 2021

ACADEMIC DISSERTATION IN INTERACTIVE TECHNOLOGY

Supervisor: Professor Markku Turunen, Ph.D.
Faculty of Communication Sciences,
Tampere University,
Finland

Opponent: Professor Markku Tukiainen, Ph.D.
School of Computing,
University of Eastern Finland,
Finland

Reviewers: Professor Arto Kiviniemi, Ph.D., M.Sc.Arch.
University of Liverpool,
United Kingdom

Miro Ristimäki, D.Sc. (Tech.)
Development Manager, Skanska Oy,
Finland

ISBN 978-952-03-1888-8 (PDF)
<http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-03-1888-8>

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin Originality Check service in accordance with the quality management system of Tampere University.

Dissertations in Interactive Technology, Number 34

Faculty of Information Technology and Communication Sciences
FIN-33014 Tampere University
FINLAND

ISBN 978-952-03-1887-1 (Print)
ISSN 1795-9489

PunaMusta Oy – Yliopistopaino
Tampere 2021

Tiivistelmä

Rakennuksen suunnittelussa ja elinkaaren eri vaiheissa tarvitaan useamman eri alan ja toimijan asiantuntemuksen yhdistämistä. Tarvitaan mm. rakennussuunnittelua, rakennesuunnittelua, sähkösuunnittelua ja LVI-suunnittelua. Nykyisin rakennussuunnittelussa on laajalti siirrytty kolmiulotteiseen suunnitteluun ja tietomallinnukseen. Tietomallinnusta kutsutaan yleisesti nimellä BIM (Building Information Modeling). BIM on kehitetty parantamaan ja tehostamaan yhteistyötä eri toimijoiden välillä. Perusajatuksena on pitää kaikki rakentamista koskevat tiedot loogisesti yhdessä paikassa. Fyysisesti tietomalli voi olla keskitetty tai hajautettu. Tietomalli voi palvella kohteen suunnittelua ja rakentamista, mutta sitä voidaan ylläpitää ja hyödyntää myös koko kohteen elinkaaren ajan. Tällöin se voisi toimia käyttöliittymänä esimerkiksi rakennuksen valvontaan ja ylläpitoon.

Tutkimukset ovat myös osoittaneet, että kohteiden kolmiulotteinen mallintaminen kannattaa. Kohteiden esittely kolmiulotteisesti helpottaa huomattavasti ymmärrystä kohteesta ja parantaa tätä kautta eri toimijoiden välistä yhteistyötä rakennuksen elinkaaren kaikissa vaiheissa aina suunnittelusta ylläpitoon. (Hilfert & König, 2016.) Nykyisin rakennussuunnittelu toteutetaan yleensä kolmiulotteisena ja osana kohteen tietomallia luodaan rakennuksen erilaiset 3D-mallit. Eräs tällainen osamalli on arkkitehtimalli, joka kuvaa kohdetta arkkitehtisuunnittelun näkökulmasta. Luonnollinen jatke tietomallinnukselle onkin tietomallin pelillistäminen. Pelillistämällä tarkoitetaan pelinkehitysmenetelmien ja -välineiden hyödyntämistä muussa kuin pelikontekstissa. Tässä tapauksessa konteksti on ensisijaisesti rakennusten suunnittelu ja rakentaminen, sekä tätä kautta suunnitelmien havainnollistaminen. (Seaborn & Felsh, 2015.)

Tietomallin pelillistäminen sisältää yleensä ainakin vapaan liikkumisen rakennuksessa, mutta siihen voi liittyä myös monia muita ominaisuuksia, jotka tukevat kohteen suunnittelua, visualisointia ja ylläpitoa. Monet CAD-ohjelmistot sisältävät jo nykyisin yksinkertaiset pelillistämisen työkalut. Jos pelillistäminen toteutetaan pelimoottoreiden avulla, saadaan pelillistettyyn tietomalliin toteutettua juuri halutun kaltaiset ominaisuudet.

Väitöskirjassa esitetään ideoita ja menetelmiä, sekä niiden testaamiseksi toteutettuja pilotoiteja tietomallin pelillistämiseksi ja pelillistetyn tietomallin hyödyntämiseksi rakennuksen elinkaaren eri vaiheissa suunnittelusta aina rakennuksen ylläpitoon asti. Merkittävimmät aihealueet ovat tilantarpeiden mitoitus, esteettömyys, turvallisuus ja

suunnittelun joukkoistaminen. Väitöskirjassa esitettävät ideat ja menetelmät, sekä niihin liittyvät pilotoinnit hyödyntävät keksimääni patentoitua toiminnallisen suunnittelun menetelmää (FDM = Functional Design Method). FDM tarjoaa idean ja menetelmän kohteessa tapahtuvan todellisen toiminnan vaatiman tilantarpeen nykyistä parempaan huomioimiseen kohteen elinkaaren eri vaiheissa. Menetelmälle on myönnetty patentti Suomessa sekä USA:ssa.

Olemme tutkineet kehittämiemme ideoiden ja menetelmien toimivuutta käytännössä toteuttamalla erilaisia pilotointeja. Toteutimme pilotointien yhteydessä joukon artefakteja, joiden avulla pilotoinnit suoritettiin. Suoritimme jokaisen pilotoinnin aikana osallistuvaa havainnointia, sekä toteutimme avoimen haastattelututkimuksen pilotointiin osallistuneille toimijoille. Lisäksi suoritimme muutamia teemahaastatteluja. Pilotointien avulla tutkittiin ensisijaisesti keksimäni toiminnallisen suunnittelun menetelmän hyödyntämistä yhdessä rakennuksen pelillistetyn tietomallin kanssa erilaisissa kohteissa. Ensimmäisen pilotoinnin aihe on rakennuksen esteettömyyden suunnittelu. Toinen pilotointi liittyy rakennuksen hätäpoistumisen suunnitteluun ja mitoitukseen, sekä tekoälyn ja data-analytiikan hyödyntämiseen suunnittelussa. Kolmannen ja neljännen pilotoinnin aiheena on suunnittelun joukkoistaminen monipelitekniikoita ja epälineaarisen tarinankerronnan menetelmiä ja työkaluja hyödyntäen.

Väitöskirjan edustama tieteenfilosofinen suuntaus on konstruktivismi ja siinä hyödynnetään konstruktivistista tutkimusotetta suunnittelutieteen ja suunnittelututkimuksen menetelmien avulla. Tutkimusten empiirinen aineisto on kerätty pääosin laadullisin menetelmin osallistuvaa havainnointia, avoimia haastatteluja ja teemahaastatteluja hyödyntäen. Lisäksi väitöskirja sisältää kirjallisuuskatsauksen, jonka avulla esitetään alan aikaisempaa tutkimusta ja jonka avulla perustellaan myös tämän väitöstutkimuksen tarvetta.

Väitöskirjan sisältämä kirjallisuuskatsaus osoittaa, että tutkijat ovat havainneet tarpeen saada toiminnallisuus ja käyttäjien aktiviteetit nykyistä suurempaan rooliin rakennussuunnittelussa heti suunnittelun alusta alkaen. Lisäksi suunnitelmien parempi havainnollisuus ja tätä kautta käyttäjien nykyistä voimakkaampi mukaan ottaminen suunnitteluun ovat tutkijoiden mielestä rakennussuunnittelun keskeisiä vaatimuksia nyt ja tulevaisuudessa. Myös erilaiset simulaatiot ja suunnittelun avoimuus esimerkiksi joukkoistamisen avulla ovat toivottuja kehityssuuntia. Samansuuntaisia tuloksia saimme myös pilotointien yhteydessä tekemistämme haastatteluista. Haastattelut kohdistuivat pääosin TKI-hankkeidemme yhteistyökumppaneina toimiviin rakennusalan yrityksiin. Heidän keskeisin vaatimuksensa oli rakennuksessa tapahtuvan toiminnallisuuden parempi huomioiminen heti suunnittelun alusta lähtien, sekä rakennussuunnitelmien

havainnollisuuden parantaminen yleisesti. Lisäksi he olivat erittäin kiinnostuneita löytämään tietomallille uusia käyttökohteita esimerkiksi pelillistämisen kautta. Väitöskirjan esittämät menetelmät ja niihin liittyvät pilotoinnit pyrkivät osaltaan vastaamaan näihin edellä esitettyihin haasteisiin. Keksimäni toiminnallisen suunnittelun menetelmä auttaa suunnittelijoita mitoittamaan tiloja tiloissa tapahtuvan toiminnan ja aktiviteettien ehdoilla. Kehittämämme menetelmä ja menetelmää tukeva prosessi Open BIM -standardin mukaisen tietomallin pelillistämiseksi puolestaan auttaa havainnollistamaan rakennussuunnitelmia ja tätä kautta ottamaan myös muut kuin rakennusalan ammattilaiset suunnitteluun paremmin mukaan jo heti suunnittelun alussa. Tätä tavoitetta tukee myös pilotoimamme monen samanaikaisen käyttäjän suunnitteluympäristöt, jotka mahdollistavat mm. suunnittelun joukkoistamisen.

Yhteistyöyrityksemme ovat testanneet kehittämiämme menetelmiä omissa kaupallisissa projekteissaan. Osa näistä testeistä liittyy myös suoraan heidän kanssaan tekemiimme pilotointeihin. Esimerkiksi tietomallin pelillistämisen menetelmää ja menetelmää tukevaa prosessia on testattu Mikkelin keskussairaalan uusien rakennusten pelillistämässä, Pieksämäen keskustaan rakennetun kauppakeskuksen pelillistämässä, Pieksämäen uuden Hiekanpään koulukeskuksen pelillistämässä ja erään uuden paloaseman pelillistämässä. Lisäksi he ovat testanneet toiminnallisen suunnittelun menetelmää Pieksämäen keskustan kauppakeskuksen hätäpoistumisen simuloinnin asiakasprofiilien määrittämisessä, sekä esteettömyyden simuloinnissa ja mitoituksessa. Myös suunnittelun joukkoistamista on testattu jo kahdessa käytännön yritysprojektissa. Nämä projektit ovat Hiekanpään koulukeskuksen kalustesuunnittelu ja paloaseman yhteissuunnittelu.

Kirjallisuuskatsauksen lisäksi pilotointien yhteydessä yhteistyöyrityksiin ja muihin hankkeen toimijoihin kohdistamamme haastattelut osoittavat, että toiminnallisen suunnittelun menetelmä yhdessä rakennuksen pelillistetyn tietomallin kanssa tarjoaa merkittävää lisäarvoa rakennuksen suunnittelulle ja ylläpidolle koko rakennuksen elinkaaren ajan. Erilaisia käyttökohteita on paljon. Pilotoimamme ideat esteettömyyden suunnittelusta, tilojen mitoituksista, turvallisuuden simuloinnista ja suunnittelun joukkoistamisesta tukevat näkemyksiämme toiminnallisen suunnittelun menetelmän ja rakennuksen pelillistetyn tietomallin soveltuvuudesta ja niiden tuomasta lisäarvosta tietomallipohjaiselle rakennussuunnittelulle. Tätä näkemystä vahvistaa vielä yhteistyöyritystemme omissa kaupallisissa projekteissaan tekemät havainnot, jotka ovat myös tulleet esille hankkeiden aikana ja pilotointien yhteydessä tekemissämme haastatteluissa. Tähän väitöskirjaan liittyvät julkaisut käsittelevät pääosin näitä aihealueita eri näkökulmista.

Abstract

The design of the building and the different stages of its life cycle require the pooling of expertise from several different sectors and actors. Needed e.g. building design, structural design, electrical design and HVAC design. The idea of information modeling, commonly referred to as BIM (Building Information Modeling), has been developed to improve and intensify collaboration between different actors. The basic idea is to keep all the information about the construction logically in one place. Physically, the data model can be centralized or decentralized. A data model can serve the design and construction of an object, but it can also be maintained throughout the life cycle of an object. In this case, it could act as an interface for monitoring and maintaining the building, for example.

Studies have also shown that 3D modeling of objects is worthwhile. The 3D presentation of objects greatly facilitates the understanding of the object and thereby improves cooperation between different actors at all stages of the building life cycle, from design to maintenance. (Hilfert & König, 2016.)

Nowadays, design is usually done in 3D, and as a part of the data model different 3D models of the building are created. One such submodel is the architectural model, which describes the object from the point of view of architectural design. A natural step for the data modeling of the buildings is gamification. Gamification refers to the use of game development methods and tools in a context other than the game. In this case, the context is primarily the design and construction of the buildings, and through this the illustration of the plans. (Seaborn & Felsh, 2015.)

Gamification means at least free movement in building but may also include many other features that support the design and visualization of the object. Many CAD softwares already include a simple gamification, such as free movement. If gamification is done using by game engines, the gamified data model can include exactly the features we want.

The dissertation presents ideas and methods, as well as pilots carried out to test them in order to gamified the data model and utilize the gamified data model at different stages of the building's life cycle, from design to building maintenance. The main topics are mobility, sizing, accessibility, and building safety. In addition, the thesis presents ideas and methods for crowdsourcing of design with a gamified data model and multiplayer techniques. The work also utilizes my patented Functional Design Method (FDM), which provides an idea and method for better consideration of the

actual space requirements of a building at different stages of its life cycle. The FDM method has been granted patent in Finland and the USA.

We have studied the functionality of the ideas and methods we have developed in practice by carrying out a number of different pilots. We carried out some artefacts in connection with the pilots. We conducted a participatory observation during each pilot, and conducted an open-ended interview study with the actors involved in the pilot. In addition, we conducted a few thematic interviews. The pilots were used primarily to study the utilization of the functional design method I developed together with a gamified data model of the building at various targets. The subject of the first pilot is the design of the accessibility of the building. The second pilot is related to the design and dimensioning of an emergency exit of a building, as well as the utilization of artificial intelligence and data analytics in the design. The subject of the third and fourth pilots is the crowdsourcing of design using multiplayer techniques and nonlinear storytelling methods and tools.

The dissertation utilizes a constructive research approach with the help of design science and design research methods. The empirical data of the research have been collected mainly by qualitative methods, utilizing participatory observation, open interviews and thematic interviews. In addition, the dissertation includes a literature review that presents previous research in the field and also justifies the need for this dissertation.

The literature review contained in the dissertation shows that the researchers have found the need to get functionality and user activities greater role in building design right from the beginning of the design. In addition, better visibility of the plans and through this greater involvement of users in design is, according to researchers, key requirements for building design now and in the future. Various simulations and design transparency, for example through crowdsourcing, are also desirable trends. We also obtained similar results from the interviews we conducted during the pilots. The interviews were mainly aimed at construction companies that are partners in our RDI projects. Their main demand was to take better account of the functionality in the building right from the start of the design as well as improving the visibility of building plans in general. In addition, they were very interested in finding new uses for the data model, for example through gamification. The methods presented in the dissertation and the related pilots contribute to meeting these challenges presented above. The method of functional design I developed helps designers to dimension spaces in terms of the activities that take place in the premises. The method we have developed and the process that supports the method to gamify the data model helps to illustrate construction plans and thereby involve non-

construction professionals better in the design from the very beginning. This goal is also supported by the multi-user planning environments, which allow for example crowdsourcing of the planning.

Our partner companies have also tested the methods we have developed in their own commercial projects. Some of these tests are also directly related to the pilots we did with them. For example, the method of gamificate the data model and the process supporting the method have been tested in the gamification of the new buildings of Mikkeli Central Hospital, In the gamification of the new Hiekanpää school center in Pieksämäki and in the gamification of a new fire station building. In addition, they have tested the functional design method in determining the customer profiles of the emergency exit simulation of the Pieksämäki shopping center and in accessibility simulation and sizing. The crowdsourcing of design has also been tested in two practical business projects, which are the furniture design of the Hiekanpää school center and the multi-user design of the fire station.

In addition to the literature review, our interviews with partner companies and other project actors in connection with the pilots show that the method of functional design together with the gamification of the data model of the building provides significant added value to the design and maintenance of the building throughout the life cycle of the building. There are many different use for. Our piloted ideas on accessibility design, sizing, security simulation, and crowdsourcing of the design support our views on the applicability and added value of functional design method for data modelbased building design. This view is further reinforced by the findings of our partner companies in their own commercial projects, which have also emerged from our interviews during the projects and during the pilots. The publications related to this dissertation mainly deal with these topics from different perspectives, as well as presenting pilot studies and the results of the studies.

Kiitokset

Ensimmäiseksi haluan kiittää väitöskirjani ohjaajaa professori Markku Turusta. Hänen erinomainen ohjauksensa on auttanut minua kehittymään tutkijana ja näkemään monia asioita aivan uudessa valossa edetessäni kohti päämäärääni. Lisäksi haluan kiittää perhettäni ja erityisesti vaimoani Einiä. Perheen positiivinen ja ymmärtäväinen suhtautumisensa ”taas yhteen uuteen päähänpistooni” loi perustan koko homman onnistumiselle ja maaliin pääsemiselle. Iso kiitos kuuluu myös Suomen Kulttuurirahaston Etelä-Savon rahastolle, jonka väitöstutkimukselleni myöntämä tutkimusapuraha on ollut tämän väitöskirjan erittäin merkittävä mahdollistaja. Haluan myös kiittää väitöskirjani esitarkastajia professori Arto Kiviniemeä ja Skanska Oy:n kehityspäällikkö TkT Miro Ristimäkeä. Heiltä sain tärkeää ja arvokasta palautetta, jonka perusteella pystyin viimeistelemään väitöskirjani lopulliseen muotoonsa. Kiitos kuuluu myös professori Markku Tukiaiselle suostumisesta vastaväittäjäkseni.

Haluan lausua kiitoksen myös työnantajalleni Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoululle (XAMK), jonka TKI-hankkeet ovat olleet tärkeänä innoittajani väitöskirjaan liittyvissä asioissa, sekä myös mahdollistajana keksimäni toiminnallisen suunnittelun menetelmän (FDM) patentoinnissa. Kiitos myös Business Finlandille, joka on toiminut hankkeiden pääasiallisena rahoittajana. Haluan myös kiittää Rakennusliike U. Lipsanen Oy:tä, joka on toiminut rakennusalan TKI-hankkeidemme merkittävimpänä yrityskumppanina ja sitä kautta koko hanketoiminnan keskeisenä mahdollistajana. Heidän voimakas panostuksensa ja halunsa kehittyä, sekä ottaa uusia asioita käyttöön omassa toiminnassaan, on siivittänyt koko toimintaa eteenpäin.

Kiitos myös kollegoilleni, joiden kanssa olen saanut käydä tätä taivalta jo vuosien ajan. Erityiskiitos Markku Rossille, Mika Letonsaarelle ja Jari Kortelaiselle. Markun ja Mikan kanssa olen kirjoittanut useammankin väitöskirjassa olevan julkaisun, ja heiltä olen lisäksi saanut arvokasta tukea koko prosessin ajan. Jari taas on sparranut ja kannustanut minua tutkijan vaatimattomalla urallani eteenpäin. Jarin kanssa käymämme keskustelut tutkimuksen syvimmästä olemuksesta ovat auttaneet minua ymmärtämään paremmin, mistä kaikessa oikein on kysymys.

Mikkelissä, 25. Tammikuuta, 2021

Jukka Selin

Sisältö

1	JOHDANTO	1
1.1	Tietomallin pelillistämistä apua suunnitteluun.....	2
1.2	Tutkimuksen taustaa	4
1.3	Käytetyt tutkimusmenetelmät ja tutkimusote.....	6
1.4	Tutkimuksen tavoitteet, rajaus, tulokset ja hyödyt.....	10
1.5	Väitöskirjan rakenne	20
2	TIETOMALLINNUKSESTA (BIM) JA TIETOMALLIN PELILLISTÄMINEN	21
2.1	Tietomallinnuksesta apua koko rakennuksen elinkaaren ajan	23
2.2	Tietomallinnus eli BIM (Building Information Modeling)	25
2.3	IFC yleisenä ja avoimena standardina	31
2.4	Tietomallien pelillistäminen.....	41
3	TOIMINNALLISEN SUUNNITTELUN MENETELMÄ ELI FDM.....	51
3.1	Aihepiiriin liittyviä aikaisempia tutkimuksia	53
3.2	Menetelmän taustaa ja perusidea	56
3.3	VaddTool-ohjelmistotyökalun prototyyppi.....	59
3.4	Menetelmän mahdollisia sovellusalueita	67
4	VÄITÖSKIRJAN JULKAISUIHIN LIITTYVÄT PILOTOINNIT JA PILOTOINTIEN TULOKSET.....	69
4.1	Yleistä pilotoinneista	71
4.2	Pilotointi 1: Rakennuksen tietomallin pelillistäminen ja esteettömyyden simulointi sekä suunnittelu.....	72
4.3	Pilotointi 2: Häätäpoistumisen suunnittelu ja simulointi	78
4.4	Pilotointi 3: Työelämäpeli kaupunkimallin ja epälineaarisen tarinankerronnan menetelmien avulla	88
4.5	Pilotointi 4: Suunnittelun joukkoistaminen ja virtuaaliset työmaakokoukset	95
5	TULOKSET	109
5.1	Yleistä tuloksista	109
5.2	Vastauksia väitöskirjan tutkimuskysymyksiin	116
5.3	Yhteenveto tutkimusmenetelmistä ja tutkimuksen tuloksista	121
5.4	Tutkimuksen arviointia	128
5.5	Keskustelua ja pohdintaa tuloksista	135
6	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	139
7	LÄHTEET.....	143

Termit ja lyhenteet

AR	Lisätty todellisuus (Augmented Reality) tarkoittaa näkymää, jossa oikeaan todellisuuteen on lisätty tietokoneella tuotettuja elementtejä, kuten tietokonegrafiikkaa.
BCF	BIM Collaboration Format on tiedonvälitysmuoto, jonka avulla voidaan siirtää älykkäitä viestejä eri tietomalliohjelmistojen välillä.
BIM	Building Information Modeling eli tietomallinnus tai Building Information Model eli tietomalli . Kummastakin käytetään eri yhteyksissä lyhennettä BIM . Tietomallinnus on rakennusten tai muiden vastaavien kohteiden kolmiulotteista suunnittelua siten, että kaikki kohteen tieto pyritään tallentamaan samaan paikkaan, eli kohteen tietomalliin. Tietomalli on kohteen kaikkien tietojen muodostama kokonaisuus digitaalisessa muodossa. Tietomalliin liittyy muiden tietojen lisäksi myös rakennuksen geometrian määrittäminen ja esittäminen kolmiulotteisesti. Tietomallinnus ja tietomalli voivat palvella kohdetta koko sen elinkaaren ajan.
bSDD	buildingSMART Data Dictionary määrittelee sanaston, joka auttaa yhdistämään IFC-tiedonsiirrossa samaa tarkoittavat asiat toisiinsa riippumatta käytetystä kielestä tai ohjelmistosta.
CAD	Tietokoneavusteinen suunnittelu (Computer Aided Design). Suunnittelu voi olla 2D- tai 3D-suunnittelua.
Digital Twin	Digitaalinen kaksonen on jostain kohteesta tehty virtuaalinen malli. Rakennusalalla se tarkoittaa rakennuksen digitaalista vastinetta, joka on jonkinlaisessa vuorovaikutuksessa todellisen kohteen kanssa.
FDM	Keksimäni toiminnallisen suunnittelun menetelmä (Functional Design Method). Menetelmä helpottaa toiminnan vaatiman tilantarpeen sijoittamista suunniteltavaan rakennukseen tai muuhun

kohteeseen. Menetelmälle on myönnetty patentti sekä Suomessa, että USA:ssa.

- FPC** **First Person Controller** on pelihahmo, joka tarjoaa pelaajalle ns. ensimmäisen persoonan näkymän, eli suoran näkymän pelimaailman kameran läpi.
- IAI** **Kansainvälinen yhteistyöfoorumi** (International Alliance for Interoperability), joka tunnetaan ehkä paremmin nimellä buildingSMART. BuildingSMART kehittää avointa tietomallia, jota kutsutaan myös nimellä Open BIM.
- IDM** **Information Delivery Manual.** Avoimen tietomallinnuksen standardi, joka kuvailee liiketoimintaprosesseja.
- IFC** **IFC** (Industry Foundation Classes) on avoin tiedostomuoto (tai oikeastaan tiedonsiirtomuoto), joka on kehitetty mahdollistamaan avoin tiedonsiirto tietomallinnusta tukevien suunnitteluohjelmistojen välillä.
- IFC 3D -tilaobjekti** Toiminnallisen suunnittelun menetelmän tuottama **3D-objekti**, joka sisältää tietyn toiminnallisuuden vaatiman suurimman mahdollisen tilantarpeen tai vaihtoehtoisesti ulottuvuuden. IFC-tilaobjektit tallennetaan IFC-tiedostomuodossa.
- Joukkoistaminen** Joukkoistaminen (crowdsourcing) on vielä hieman vakiintumaton termi, mutta sillä tarkoitetaan tässä väitöskirjassa yhteistä suunnittelua eli jonkinlaista suunnittelun yhteisöllistämistä.
- Lean Construction** Rakennusalalle sovitettu ajatusmalli **Leanista**. Sen perusideana on Leanin tavoin pyrkiä minimoimaan rakennushankkeessa syntyvän työn, materiaalien, energian ja muiden resurssien käyttöä.
- Monipelit** Tarkoittaa tässä yhteydessä pelillistettyjä ympäristöjä, joissa voi olla useampi samanaikainen pelaaja (käyttäjä) siten, että pelaajat näkevät toistensa pelihahmot ja voivat kommunikoida keskenään.
- MR** **Yhdistetty todellisuus** (Mixed Reality) tarkoittaa oikean todellisuuden ja virtuaalisen todellisuuden elementtien yhdistämistä toisiinsa.

MVD	Model View Defination on tekninen kuvaus siitä, mitä tietoa eri toimijoiden välillä siirretään eri käyttötilanteissa tietomallinnuksessa. Tieto on IFC-muotoista.
NBIMS	Standardi , joka kuvaa USA:n rakennusmarkkinoiden tietomallinnuksen yleisiä suuntaviivoja ja kehitystä.
Open BIM	Tietomallinnus tai tietomalli , jotka käyttävät avoimia BIM-standardeja.
Pelillistäminen	Pelillistämiseksi (Gamification) on paljon erilaisia määritelmiä riippuen siitä, missä yhteydessä siitä kulloinkin puhutaan. Tässä väitöskirjassa pelillistämällä tarkoitetaan pelimäisten elementtien käyttämistä muussa kuin pelikontekstissa.
Pelimoottori	Pelinkehitykseen tarkoitettu ohjelmisto.
TPC	Third Person Controller on pelihahmo, joka tarjoaa pelaajalle ns. kolmannen persoonan näkymän, eli näkymän, jossa kamera seuraa pelihahmoa tietyltä etäisyydeltä.
Twine	Pilotoinneissa käyttämämme epälineaarisen tarinankerronnan väline, josta löytyy myös pelimoottori-integraatio.
VaddTool	Kehittämäni ohjelmistotyökalu , joka tukee toiminnallisen suunnittelun menetelmää. Työkalun avulla voidaan luoda ja hallinnoida mm. IFC 3D -tilaobjekteja.
Virrake-alusta	Virtuaalisen rakentamisen hankkeessa kehittämämme sovellusalusta , joka mahdollistaa tietomallin pelillistämisen ja joka sisältää mm. monipeli ja VR-tuen, sekä paljon työkaluja rakennussuunnittelun helpottamiseksi.
VR	Virtuaalitodellisuus (Virtual Reality).
XML	Extensible Markup Language on merkintäkielien standardi, joka määrittää tietojen merkintämuodon.
XR	Extended Reality tarkoittaa ympäristöä, jossa oikeaa todellisuutta laajennetaan erilaisilla digitaalisilla elementeillä.

Alkuperäisjulkaisut

Tämä väitöskirja koostuu yhteenvedosta ja seuraavista alkuperäisistä julkaisuista, joiden uudelleenjulkaisuun tässä väitöskirjassa on saatu lupa.

- I. **Selin, J., & Rossi, M. (2016).** Simulation of Universal Design by a Functional Design Method and by Gamification of Building Information Modeling. In *Proceedings of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS 2016)* (pp. 1671-1674). ACSIS, Vol. 8. ISSN 2300-5963. (JUFO 1). <http://dx.doi.org/10.15439/2016F306> 155
- II. **Selin, J., & Rossi, M. (2018).** The functional design method for buildings (FDM) with gamification of information models and AI help to design safer buildings. In *Proceedings of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS 2018)* (pp. 907-911). ACSIS, Vol. 15. ISSN 2300-5963. (JUFO 1). <http://dx.doi.org/10.15439/2018F162> 161
- III. **Selin, J., Letonsaari, M., & Rossi, M. (2019).** Emergency exit planning and simulation environment using gamification, artificial intelligence and data analytics. *YSC2019, 8th International Young Scientist Conference on Computational Science* (pp. 283-291). *Procedia Computer Science, Elsevier, Vol. 156.* ISSN 1877-0509. (JUFO 1). <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.08.204> 169
- IV. **Selin, J., & Rossi, M. (2019).** The Functional Design Method for Public Buildings Together with Gamification of Information Models Enables Smart Planning by Crowdsourcing and Simulation and Learning of Rescue Environments. *Intelligent Systems Conference (IntelliSys 2019)* (pp. 567-587). *Intelligent Systems and Applications, Springer, Volume 2.* ISBN 978-3-030-29512-7. (JUFO 1). https://doi.org/10.1007/978-3-030-29513-4_42 181

- V. Letonsaari, M., & Selin, J. (2017). Modeling computational algorithms using nonlinear storytelling methods of computer game de-sign. *6th International Young Scientist Conference on Computational Science, YSC 2017, 01-03 November 2017, Kotka, Finland* (pp. 131-138). (Procedia Computer Science). Amsterdam: Elsevier Scientific Publ. Co. (JUFO 1). <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.11.169> 205
- VI. Letonsaari, M., & Selin, J. (2018). Social Media Integration with Nonlinear Educational Storytelling Application. *In 2018 17th International Conference on Information Technology Based Higher Education and Training (ITHET) Danvers, MA: IEEE.* (JUFO 1) <https://doi.org/10.1109/ITHET.2018.8424793> 215
- VII. Letonsaari, M., & Selin, J. (2019). Nonlinear storytelling method for interdisciplinary and cross expertise-level communication of knowledge. *International Conference on Interdisciplinarity of Knowledge, Education and Research, IKER 2019, At Pilani, India.* (JUFO 0). 223
- VIII. Letonsaari, M., Selin, J., & Lampi, M. (2017). Co-creative serious games design process using nonlinear storyline editing. *The 9th International Conference on Computer Supported Education* (Vol. Volume 1, pp. 582-588). Porto, Portugal: SCITEPRESS Science And Technology Publications. (JUFO 1). <https://doi.org/10.5220/0006320305820588> 241
- IX. Letonsaari, M., Karjalainen, L., & Selin, J. (2019). Nonlinear Storytelling Method and Tools for Low-Threshold Game Development. *Seminar.Net*, 15(1), 1-17. (JUFO 1). 251
- X. Ojala, J., Selin, J., Partala, T. & Rossi, M. (2020). Virtual Construction: Interactive Tools for Collaboration in Virtual Reality. *Advances in Intelligent Systems and Computing (FICC 2020)*, vol 1130. Springer, Cham. In book: *Advances in Information and Communication*, pp. 341-351. (JUFO 1). https://doi.org/10.1007/978-3-030-39442-4_26 271

Tekijän osuus julkaisuissa

Olen ollut kehittäjänä merkittävässä roolissa kaikissa väitöskirjan eri julkaisuissa esitetyissä TKI-hankkeissamme. Julkaisuissa esitetty menetelmä ja menetelmää tukeva prosessi BIM-standardeihin perustuvan tietomallin pelillistämiseksi metatietoineen on kehittämäni. Lisäksi olen keksinyt työsuhdekeksintönä useammassa julkaisussa esitellyn ja pilotoidun toiminnallisen suunnittelun menetelmän (FDM). Olen myös menetelmälle myönnettyissä **Suomi-** ja **USA-patenteissa** menetelmän ainoa keksijä. Olen toteuttanut julkaisuissa esitettävät tietomallien pelillistämiset ja niihin liittyvät pilotoinnit kokonaisuudessaan lukuun ottamatta Virrake-sovellusalueen avulla tehtyjä pelillistämisiä. Olen osallistunut Virrake-sovellusalueen kehitystyöhön sen alusta alkaen suunnittelijan ja kehittäjän rooleissa. Lisäksi olen ollut Virrake-sovellusalueen avulla tehdyissä pilotoinneissa, sekä sovellusalueen tuotteistamisessa ja kaupallistamisessa mukana yhtenä toteuttajana ja suunnittelijana.

Olen toteuttanut **julkaisut I, II, III ja IV** ja niihin liittyvät pelillistämiset, sekä pilotoinnit kokonaan itse. Olen näissä julkaisuissa ensimmäinen ja käytännössä ainoa kirjoittaja.

Julkaisuun VIII olen toteuttanut käytettyjä menetelmiä ja tekniikoita käsittelevän osan kokonaisuudessaan. Olin myös julkaisussa esiteltävän työelämäpelin suunnittelussa ja käytännön toteutuksessa mukana keskeisessä roolissa suunnittelijana ja ohjelmoijana.

Julkaisussa X olen toteuttanut pelillistämistä ja siihen liittyviä tekniikoita kuvaavan osan. Lisäksi olen ollut julkaisussa käsiteltävän ja pilotoitavan Virrake-sovellusalueen suunnittelussa ja toteutuksessa mukana eri rooleissa.

Julkaisussa XI olen ollut mukana hankkeen ja opetustyöni kautta suunnittelemassa ja toteuttamassa julkaisussa kuvattavaa työelämäpeliä ja siihen liittyvää koulutusta. **Julkaisuissa V, VI ja VII** olen tuonut lähinnä ohjelmoinnin näkökulmaa epälineaarisen tarinankerronnan menetelmien ja tekniikoiden kuvaamiseen. Näissä julkaisuissa pyritään tuomaan esille epälineaarisen tarinankerronnan ja sen välineiden ideologiaa ja teoriaa yleisesti. Jouduimme tekemään paljon selvitystyötä hankkeisiimme liittyen tutkiessamme epälineaarisen tarinankerronnan menetelmien ja välineiden soveltuvuutta esimerkiksi pelimaailmoissa tapahtuvan joukkoistetun suunnittelun hallintaan, samoin kuin myös esimerkiksi tarinoiden luomiseksi pelimaailmaan ilman peliohjelmoinnin osaamista.



1 Johdanto

Rakennuksen suunnittelussa ja elinkaaren eri vaiheissa tarvitaan useamman eri alan ja toimijan asiantuntemuksen yhdistämistä. Tarvitaan mm. rakennussuunnittelua, rakennesuunnittelua, sähkösuunnittelua ja LVI-suunnittelua. Jokainen asiantuntija on tehnyt työtään perinteisesti melko itsenäisesti ja omista lähtökodistaan käsin hyödyntäen oman alansa menetelmiä ja erikoisohjelmistoja. Erilaisilla alakohtaisilla CAD-ohjelmistoilla tuotetut suunnitelmat on tallennettu perinteisesti valmiina piirustuksina omiin tiedostoihinsa ohjelmistojen omissa natiiveissa tallennusformaateissa. Tiedostojen siirrettävyys eri ohjelmistojen välillä on ollut heikkoa. Tiedostojen jakelu eri toimijoiden välillä on tapahtunut tyyppillisesti kaupallisten projektipankkien, kuten BUILDERCOMIN kautta (Buildercom Oy, 2019). Joissain tapauksissa suunnitelmat ovat olleet vain suunnittelijoiden itsensä halussa hajautetusti ja niitä on lähetelty milloin mitenkään eri toimijoiden välillä. Määrätyn tiedon saaminen tai dokumentin löytäminen on voinut olla hyvinkin työlästä ja aikaa vievää.

Nykyisin suurimassa osassa rakennussuunnittelua ollaan siirrytty kolmiulotteiseen suunnitteluun ja tietomallinnukseen. Tietomallinnusta kutsutaan yleisesti nimellä BIM (Building Information Modeling). BIM on eräänlainen rakennusalan suositus ja ohjeistus rakennusten elinkaaren aikaiseen tietojen hallintaan ja esittämiseen. BIM helpottaa ja lisää tiedonkulkua eri toimijoiden välillä, sekä tarjoaa keskitetyn kokonaisratkaisun rakennuksen tietojen hallintaan. BIM sisältää myös ajatuksen, että perinteisten muotojen ja mittojen lisäksi rakennuksen tietomalli voi sisältää paljon muutakin rakennukseen ja sen käyttöön liittyvää tietoa (Eastman, Teicholz, Sacks & Liston, 2008). Tällaista tietoa voi olla esimerkiksi kustannuksiin, materiaaleihin, aikatauluihin, turvallisuuteen tai rakennuksessa tapahtuvaan toiminnallisuuteen

(käyttötarkoitukseen) liittyvä tieto. (Kunz & Fischer, 2012; Waly & Thabet, 2003.)

Tutkimukset ovat myös osoittaneet, että kohteiden kolmiulotteinen mallintaminen kannattaa. Kohteiden esittely kolmiulotteisesti helpottaa huomattavasti ymmärrystä kohteesta ja parantaa tätä kautta eri toimijoiden välistä yhteistyötä rakennuksen elinkaaren kaikissa vaiheissa aina suunnittelusta ylläpitoon. (Hilfert & König, 2016.)

1.1 TIETOMALLIN PELILLISTÄMISESTÄ APUA SUUNNITTELUUN

Koska rakennuksen tietomalli sisältää keskitetysti ja ajantasaisesti suunniteltavasta rakennuksesta tuotetun tiedon, voidaan sen avulla luoda kaikki suunnittelijoiden tarvitsemat piirustukset ja muut dokumentit. Lisäksi tietomallista voidaan tuottaa suoraan erilaisia raportteja tai laskelmia riippuen siitä, mitä tietoja tietomalliin on kulloinkin sisällytetty. Tietomallista voidaan tuottaa myös esimerkiksi tietokonepelimäinen 3D-malli, joka mahdollistaa mm. vapaan liikkumisen suunniteltavassa rakennuksessa. Tällöin puhutaan tietomallin pelillistämisestä. Mikäli tietomalli on laaja ja sisältää paljon erilaista tietoa, voidaan kolmiulotteisuudella ja pelillistämällä havainnollistaa ja simuloida rakennuksen tai muun kohteen käyttöä ja saada hyvinkin aidontuntuksia käyttökokemuksia (Kuliga, Thrash, Dalton & Hölscher, 2015).

Perinteisten CAD-ohjelmistojen käyttöön liittyviä rajoituksia on tutkittu ja todettu niiden mm. rajoittavan tehokkuutta, luovuutta, motivaatiota ja vuorovaikutusta toimijoiden välillä. Parannukseksi tähän on ehdotettu esimerkiksi pelillistämistä ja pelitekniikoiden hyödyntämistä, jolloin saadaan luotua havainnollisempia ja motivoivempia suunnitteluympäristöjä. (Kosmadoudi, Lim, Ritchie, Louchart, Liu & Sung, 2013.) Joidenkin tutkijoiden mielestä CAD-suunnittelutyökaluista on tullut liian monimutkaisia ja vaikeasti hallittavia. Tämä aiheuttaa käyttäjille tutkijoiden mielestä liian suurta kognitiivista kuormitusta. Tutkijat ehdottavat parannuskeinoiksi mm. havainnollisuuden ja graafisuuden lisäämistä, sekä työkalujen yksinkertaistamista. (Lee, Eastman, Taunk & Ho, 2010.)

Pelillistämällä tarkoitetaan pelisuunnitteluelementtien käyttämissä muussa kuin pelikontekstissa. Tässä tapauksessa konteksti on ensisijaisesti rakennusten suunnittelu ja rakentaminen, sekä tätä kautta suunnitelmien havainnollistaminen. (Seaborn & Felsh, 2015.) Tutkijoiden mielestä näyttäisi siltä, että pelimoottorit ja pelillistäminen tarjoavat ratkaisuja edellä esitettyjen perinteisen CAD-suunnittelun rajoitusten minimoimiseksi ja rakennussuunnittelun parhaiden käytänteiden edistämiseksi. Pelien on myös osoitettu lisäävän kognitiivista sitoutumista suunnitteluun. (Kosmadoudi, Lim, Ritchie, Louchart, Liu & Sung, 2013.)

Pelimoottoreiden avulla on mahdollista toteuttaa esimerkiksi vapaa liikkuminen, sekä eri suunnitelmavaihtoehtojen vertailu ja tarkastelu suunniteltavassa rakennuksessa. Näin saadaan lisättyä huomattavasti tarkastelun realismia. Voidaan esimerkiksi tarkastella, miltä kohde näyttää erilaisilla materiaaleilla tai erilaisissa valaistusolosuhteissa. (Partala, Nurminen, Vainio, Laaksonen, Laine & Väänänen, 2010; Partala & Salminen, 2012.)

Tietomallien pelillistäminen tarjoaa myös erilaisia mahdollisuuksia hyödyntää nykyaikaisia virtuaalitodellisuuden (VR) tekniikoita rakennussuunnittelussa. Tutkijoiden mukaan näiden mahdollisuuksien käyttö on vielä rajoittunut hyvin pitkälti valmiiden mallien tarkasteluun sen sijaan, että tekniikoita hyödynnettäisiin suunnitteluun ja uusien ideoiden luomiseen. Tutkijat ovat sitä mieltä, että pelimoottoreiden avulla pelillistetyt virtuaaliympäristöt sopivat hyvin tukemaan suunnittelua jo heti suunnittelun alusta lähtien. Tällöin tehdään suuria linjauksia ja lisääntynyt havainnollisuus parantaisi erityisesti eri toimijoiden välistä vuoropuhelua ja yhteistyötä. (De Klerk, Duarte, Medeiros, Duarte, Jorge & Lopes, 2019; Moloney & Amor, 2003.) Tätä osa-aluetta olemme tutkineet ja pilotoineet väitöskirjassa esitetyissä hankkeissamme.

Myös Lin, Chen, Yien, Huang & Su (2018) toteavat melko tuoreessa tutkimuksessaan tietomallinnuksesta ja VR-pohjaisesta suunnittelusta, että tietomallinnuksen ja virtuaalitodellisuuden yhdistäminen voi lisätä ja tehostaa hankeen viestinnän tehokkuutta ja toimijoiden välistä vuorovaikutusta. Tätä kautta päätöksenteko nopeutuu ja helpottuu. Tutkimuksessa kohteena oli sairaalan suunnittelu, mutta tulokset ovat yleistettävissä myös muunlaisiin kohteisiin.

Mikäli tietomalliin yhdistetään paikkatietoa ja lisätyn todellisuuden elementtejä, mahdollistaa se tietomallin tarkastelun ja yhdistämisen reaali maailmaan suoraan kohteessa. Tällaiset mahdollisuudet tarjoavat aivan uusia ulottuvuuksia rakennusten suunnitteluun, sekä elinkaaren aikaiseen ylläpitoon ja tietojen hallintaan. Lisäksi tietomallin ja pelillistämisen avulla voidaan toteuttaa erilaisia simulaatioita ja analyysyjä. Mahdollisia simuloinnin ja analysoinnin kohteita voivat olla mm. rakennuksen käyttötarkoituksen mukaisten toimintojen mahdollistaminen suunniteltaviin tiloihin, kalusteiden sijoittelu tarkoituksenmukaisesti, turvallisuus, esteettömyys, energian kulutus, valaistus, äänieristys tai ilmastointi.

Kun rakennuksen tietomallin pelillistämiseen yhdistetään monipelitekniikat, voidaan toteuttaa erilaisia monen samanaikaisen käyttäjän suunnittelu ympäristöjä. Tämän kaltaiset monipeliympäristöt mahdollistavat esimerkiksi suunnittelun joukkoistamisen. Olemme myös kehittäneet ajatuksen virtuaalisista työmaakokouksista pelillistetyn tietomallin ja monipelitekniikoiden avulla. Virtuaalisen työmaakokouksen

tai muun vastaavan monipelitapahtuman kulun ohjaamiseen ja hallintaan olemme pilotoineet epälineaarisen tarinankerronnan työkalujen hyödyntämistä. Niiden avulla voitaisiin toteuttaa esimerkiksi kokouksen esityslista ja esityslistan mukainen kokouksen eteneminen. Kokouksen kulun dokumentointi ja kokouspöytäkirjan muodostaminen olisi myös tätä kautta mahdollista. Muutamista epälineaarisen tarinankerronnan työkalusta löytyy myös valmiit integraatiot pelimoottoreihin.

Epälineaarilla tarinankerronnalla tarkoitetaan periaatteessa mitä tahansa kerrontaa, jossa eteneminen ja tapahtumat menevät jossain muussa kuin kronologisessa järjestyksessä. Lineaarisuus tai epälineaarisuus ovat tuotoksen rakenteellisia ominaisuuksia. Niitä käytetään mm. digitaalisessa mediassa, peleissä, elokuvissa ja kirjallisuudessa. Peleissä epälineaarinen tarinankerronta mahdollistaa pelaajalle mahdollisuuden vaikuttaa omalla toiminnallaan pelin kulkuun, eli peli ei etene aina samalla tavalla. Lisäksi monipeleissä pelaajien tekemät valinnat vaikuttavat muihin pelaajiin. (Müller, Reise & Seliger, 2015.) Meidän tapauksessamme epälineaarisen tarinankerronnan menetelmiä käytetään myös pelin tapahtumien suunnittelussa ja ohjauksessa yksin-, sekä monipelilympäristöissä.

Monipelitekniikoihin perustuvasta rakennussuunnittelun joukkoistamisesta ja yhteistoiminnallisesta rakennussuunnittelusta löytyy vielä melko vähän tutkimustietoa. Markkinoille on tullut muutamia yhteisöllistä suunnittelua tukevia alustoja kuten Glue (Glue, 2019) ja Fake (Fake, 2019), mutta kokemukset niistä ovat vielä melko vähäisiä. Myöskin meidän hankkeissamme toteuttama Virrake-sovellusalusta (Virrake, 2019; Virrake, 2020) tulee kilpailemaan näillä markkinoilla. Tutkimukset ovat osoittaneet, että minkä tahansa suunnittelun kannalta on hyödyllistä saada eri alojen toimijat työskentelemään yhdessä ja tähän juuri epälineaarisen tarinankerronnan menetelmät ja välineet, sekä monipelitekniikat tarjoavat työkaluja (Friedow, Blankenship, Green & Stroup, 2012).

1.2 TUTKIMUKSEN TAUSTAA

Vuonna 2012 joukko Etelä-Savolaisia kokeneita rakennusalan toimijoita otti työnantajana Mikkelin ammattikorkeakouluun (nykyinen Kaakkois-Suomen Ammattikorkeakoulu eli XAMK) yhteyttä ensisijaisena tavoitteenaan kehittää rakennusten toiminnallista suunnittelua. Heidän näkemyksensä oli, että rakennussuunnitteluun käytettävät menetelmät ja ohjelmistot eivät tue riittävän hyvin rakennuksissa tapahtuvan toiminnallisuuden huomioimista jo rakennusten suunnitteluvaiheessa. Heidän lähtökohtanaan oli, että voisiko peliohjelmoinnin tekniikoista ja menetelmistä saada apua tämän ongelman ratkaisemiseksi? Esimerkiksi vanhusten palvelutalossa pitäisi joustavasti mahtua suorittamaan erilaisia toimintoja niin pyörätuolin, rollaattorin, kuin muidenkin mahdollisten

apuvälineiden kanssa. Mukana saattaa olla lisäksi avustajia, joiden tulisi myös mahtua työskentelemään suunniteltavissa tiloissa. Aalto-yliopistossa vuonna 2011 valmistuneesta väitöskirjasta ”Kuntouttavan hoivatyön vaatimukset ikäihmisten asunnoille” käy hyvin ilmi, kuinka monenlaiseen toimintaan rakennuksen tilojen tulee soveltua, kun asukkaana on esimerkiksi pyörätuolia käyttävä henkilö (Sipiläinen, 2011). Tämänkaltaisten tilojen suunnittelu sellaisiksi, että ne täyttävät kaikkien osapuolten tarpeet ja vaatimukset, asettaa suunnittelulle ja suunnittelijoille isoja haasteita. Oma lukunsa ovat vielä esimerkiksi erilaiset tuotantotilat, joihin tulisi mahdollistaa vaadittavat tuotantoprosessit toimivasti, turvallisesti ja kustannustehokkaasti.

Rakennustieto Oy:ltä löytyy ohjeistus (RT-kortisto, 2019) esimerkiksi esteettömien tilojen suunnitteluun, mutta ohjeistus on pääosin tekstimuotoinen ja melko yleisluontoinen (Rakennustieto Oy, 2019). Meitä lähestyneet rakennusalan toimijat halusivat kehittää tekniikoita ja menetelmiä, jotka mahdollistaisivat nykyistä havainnollisemmin ja tarkemmin juuri sen toiminnan huomioimisen rakennussuunnittelussa, jota rakennuksessa tullaan oikeasti harjoittamaan. Rakennussuunnittelu ei heidän mielestään antanut suunnittelijoille riittäviä mahdollisuuksia rakennuksissa tapahtuvan toiminnan vaatimien tilantarpeiden sisällyttämiseksi suunnitteluun. Eräässäkkin heidän aiemmassa rakennusprojektissaan oli pyörätuolin ja avustajien vaatimaa tilaa mitoitettu isossa teollisuushallissa rakentamalla tilat pahvilaatikoista ja testaamalla näin saadussa ”testilaboratoriossa” eri toimintojen vaatimaa todellista tilantarvetta.

Kuvattujen ongelmien innoittamana ja niiden ratkaisemiseksi tein työsuhtekeksinnön toiminnallisen suunnittelun menetelmästä (FDM), jonka perusajatuksena on auttaa rakennussuunnittelijoita ottamaan suunniteltavassa rakennuksessa tapahtuva toiminta nykyistä paremmin ja ennen kaikkea havainnollisemmin huomioon jo suunnittelun alkuvaiheessa. Keksinnön perusajatuksena on kuvata todellinen toiminta (esim. pyörätuoli kahden avustajan kanssa) videolle riittävän monella kameralla siten, että toiminnan vaatima tila-avaruuden maksimi tilantarve kaikkien kolmen koordinaattiakselin suhteen tallentuu videolle. Tämän jälkeen videoilta etsitään kunkin toiminnon vaatima suurin tila kolmiulotteisessa avaruudessa eri koordinaattiakseleiden (z, y ja z) suhteen. Näin saadaan luotua staattinen 3D-tilaobjekti, joka kuvaa kyseisen toiminnan vaatimaa suurinta tilaa.

Toki toiminnasta kuvatut videot auttavat jo sinällään suunnittelijoita hahmottamaan, minkälaisesta toiminnasta kulloinkin on kysymys. Suunnittelumenetelmästä haluttiin tehdä Open BIM -suositusten mukaisen, joten 3D-tilaobjektien ensisijaiseksi tallennusformaattiksi valittiin IFC-formaatti. Näin saadut IFC-formaatissa olevat, toiminnan

suurinta tilantarvetta kuvaavat IFC 3D -tilaobjektit voidaan tuoda käytännössä kaikkiin BIM-yhteensopiviin suunnitteluohjelmistoihin ja tätä kautta päästään hyvin havainnollisella tavalla testaamaan, mahtuuko kyseinen toiminto tapahtumaan suunniteltavassa tilassa. (Rossi & Dave, 2015.) IFC-formaatti mahdollistaa myös erilaisten tietomallin objekteja kuvaavien metatietojen liittämisen suoraan objekteihin. Tällöin IFC 3D -tilaobjekti voi olla esimerkiksi tietoinen siitä, mitä toimintoa se kuvaa ja mihin toimintoperheeseen kyseinen toiminto kuuluu (Esimerkiksi: pääluokka 5: pyörätuolilla liikkuminen, aliluokka 5.3: pyörätuoli kahden avustajan kanssa WC-tiloissa, aliluokka 5.3.6: käsien pesu). Keksintö tarjoaakin uudenlaisen tavan rakennusten toiminnalliseen suunnitteluun.

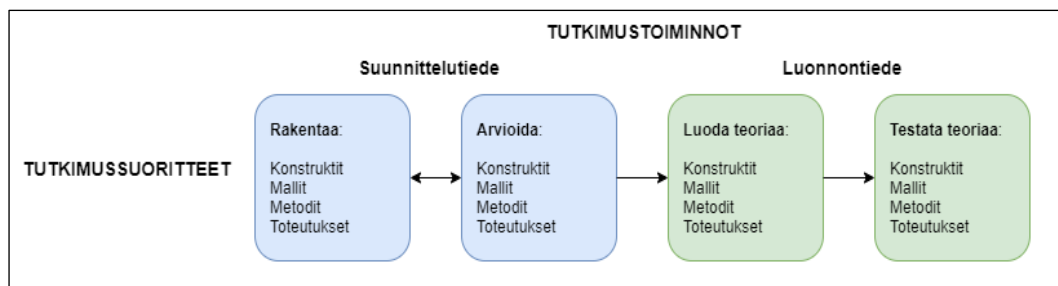
Olemme hyödyntäneet keksinnön ideaa yhdessä tietomallin pelillistämisen kanssa useammassa rakennusalan yritysten kanssa yhteistyössä toteuttamassamme kehityshankkeessa. Merkittävimmät hankkeiden yhteistyökumppanimme ovat olleet Rakennusliike U. Lipsanen Oy, Ohjelmistotalo Documtec Oy, Suunnittelutoimisto U-Cont Oy, Arkkitehtitoimisto Art Michael Oy ja Insinööritoimisto Jennacon Oy. Hankkeiden pääasiallinen rahoittaja on Business Finlandin Euroopan aluekehitysrahaston (EAKR) Fiksu-kaupunki ohjelma (Virrake, 2019). Samalla olemme pyrkineet löytämään keksinnölle ja rakennuksen pelillistetyille tietomallille uusia käyttötapoja ja sovellusalueita. Pilotointien ja niihin liittyvien tutkimusten kohteena ovat olleet tilojen mitoittaminen todellisen toiminnan perusteella, esteettömyyden suunnittelu ja mitoitus, hätäpoistumisen suunnittelu ja mitoitus, kalusteiden sijoittelu ja mitoitus sekä virtuaaliset työmaakokoukset ja suunnittelun joukkoistaminen. Näihin pilotointeihin ja niihin liittyviin tutkimuksiin liittyvät myös tämän väitöskirjan julkaisut joko suoraan tai välillisesti.

1.3 KÄYTETYT TUTKIMUSMENETELMÄT JA TUTKIMUSOTE

Väitöskirjan edustama tieteenfilosofinen suuntaus on konstruktivismi. Väitöskirjassa hyödynnetään laadullista tutkimusta ja konstruktivistista tutkimusotetta suunnittelutieteen ja suunnittelututkimuksen menetelmien avulla. Suunnittelutiede pyrkii testaamaan käytännön elämän innovaatioita ja ideoita rakentamalla niistä konstruktioita ja arvioimalla (evaluoimalla) niiden toimivuutta ja hyödyllisyyttä. (March & Smith, 1995; Järvinen ja Järvinen, 2011.) Väitöskirjassa esitetty suunnittelututkimus sisältää kehittämiemme ideoiden pilotointia käytännön artefaktien avulla yhteistyössä TKI-hankkeidemme eri yhteistyökumppaneiden ja muiden sidosryhmien kanssa. Tässä yhteydessä artefakteilla tarkoitetaan konstruktioiden pohjalta luomiamme pilottisovelluksia ja ne ovat keskeinen osa tutkimusmetodia.

Tutkimusten empiirinen aineisto on kerätty pääosin haastattelujen ja osallistuvan havainnoinnin avulla. Lisäksi väitöskirja sisältää kirjallisuuskatsauksen, jonka avulla esitetään alan aikaisempaa tutkimusta ja jonka avulla perustellaan myös tämän väitöstutkimuksen tarvetta.

March ja Smith (1995) esittelivät luokittelun (**Kuvio 1**), jossa he jakoivat tutkimustoiminnan suunnittelutieteeseen (suunnittelututkimus) ja luonnontieteeseen. He esittivät luokittelussaan neljä erillistä toimintoa ja myös neljä mahdollista tuotosta. Toiminnot ovat rakentaminen, arviointi, teorian luominen ja testaus. Vastaavasti tuotokset ovat konstruktit, mallit, metodit sekä toteutukset. Heidän mallissaan suunnittelutiede tutkii ja luo asioita inhimillisiä tarkoitusperiä varten. Suunnittelutiede on heidän mukaansa teknologisesti suuntautunutta tiedettä, jonka tuloksia arvioidaan ensisijaisesti arvon ja hyödyllisyyden perusteella. Heidän luokittelussaan luonnontiede edustaa yleisesti kaikkia muita tieteenaloja.



Kuvio 1. Luokittelu tutkimuksen toiminnoista ja suoritteista. (Muokattu lähteestä March & Smith, 1995).

Marchin ja Smithin (1995) mukaan suunnittelutiede ei tuota niinkään yleisiä teorioita, vaan erilaisia innovatiivisia malleja, metodeja ja toteutuksia tehokkaiden konstruktien (artefaktien) aikaansaamiseksi. Suunnittelutiede koostuu heidän mukaansa rakentamisesta ja arvioinnista, jotka ovat heidän mielestään suunnittelutieteen tutkimuksen perustoiminnot. Rakentaminen on heidän mukaansa prosessi, jossa rakennetaan konstrukti (artefakti) johonkin erityiseen tarkoitukseen. Vastaavasti arvioinnin he näkevät prosessina, jossa arvioidaan kuinka hyvin toteutettu konstrukti (artefakti) täyttää sille asetetut tavoitteet ja vaatimukset.

Järvinen ja Järvinen (2011) ryhmittelevät erilaiset tutkimusotteet kahteen pääryhmään riippuen siitä, onko tutkimuksen kohteena reaali maailma vai jokin symbolijärjestelmä. Symbolijärjestelmien alueen tutkimusotteisiin kuuluvat erilaiset matemaattiset tutkimusotteet. Reaali maailmaan kohdistuvat tutkimusotteet he jakavat edelleen sillä perusteella, keskitytäänkö tutkimaan jonkun innovaation hyödyllisyyttä vai tutkitaanko yleisesti reaali todellisuutta ja sen olemusta. Heidän mukaansa Innovaatioiden hyödyllisyyteen keskittyvät tutkimusotteet muodostuvat pääosin innovaation toteuttamisesta ja innovaation arvioinnista.

Sekä March ja Smith (1995), että Järvinen & Järvinen (2011) erottavat suunnittelututkimuksen muusta tieteellisestä tutkimuksesta erilaisen peruslähtökohtansa vuoksi. Luonnontieteessä on heidän mukaansa kaksi peruselementtiä, jotka ovat uuden teorian luominen ja teorian testaaminen. Suunnittelutiede tai suunnittelututkimus pyrkii heidän mielestään palvelemaan inhimillisiä tarkoituspäitä, jolloin sen tuloksia arvioidaan ensisijaisesti tulosten hyötyarvojen mukaan. Toimiiko innovaation pohjalta rakennettu systeemi ja tuoko se jotain uutta entiseen verrattuna? Suunnittelutieteen tekemisen päätoiminnot ovat siis heidän mielestään rakentaminen ja arviointi. Suunnittelutieteessä pyritään kulloistakin tarvetta ja aikaisempaa tietämystä, sekä kokemusta soveltaen luomaan tehokkaita artefakteja. Suunnittelutieteen tuloksena saadaan konstruktteja, malleja, metodeja ja toteutuksia. Artefakti toteutetaan aina johonkin tiettyyn toimintaympäristöön, kuten esimerkiksi rakennusalalle. Tällöin on ensiarvoisen tärkeää, että suunnittelutieteilijöiden tulee ymmärtää riittävästi myös kohdeympäristöä, joka meidän tapauksessamme on rakennusala ja rakennusteollisuus.

Tutkijoiden mielestä suunnittelutiede ja suunnittelututkimus puoltavat paikkaansa tieteen tekemisessä, mutta he painottavat myös, että kaikkia artefakteja ei tule hyväksyä tieteeksi. Ainoastaan hyödyllisiksi todetut artefaktit tulevat hyväksyä tieteen piiriin tai tieteen portfolioon, kuten eräs tutkija asian ilmaisi. (Hevner, March, Park ja Ram, 2004; March & Smith, 1995; Järvinen & Järvinen, 2011.)

Suunnittelututkimuksen tuloksina saadaan konstruktteja, malleja, metodeja ja toteutuksia. Mallin avulla kuvataan lähtötilanne ja konstrukt on ikään kuin tavoitetila. Menetelmät ovat sitten ne vaiheet, joiden avulla mallista päästään tavoitetilaan eli konstruktin. (March & Smith, 1995.) Tavoitteena on näin testata uutta innovaatiota luomalla siitä konstruktin mukainen artefakti ja testaamalla tällä tavoin innovaation tai idean toimivuutta käytännössä. Järvinen & Järvinen (2011) mukaan suunnittelutieteessä uusia ideoita voidaan etsiä joko tekniseltä, sosiaaliselta tai tietoresurssien hyödyntämisen alueelta tavoitellen näiden resurssien uusia käyttömahdollisuuksista.

Kaikki väitöskirjan pilotoinnit ja niihin liittyvät tutkimukset edustavat edellä kuvattua suunnittelututkimusta. Niissä lähtökohtana on ollut yleensä jokin tietomallin pelillistämiseen tai pelillistetyn tietomallin hyödyntämiseen liittyvä idea tai innovaatio. Idean tai innovaation pohjalta on kehitetty konstruktio, minkä pohjalta on kehitetty konstrukt ja sen perusteella käytännön artefakti. Idean tai innovaation käyttökelpoisuutta on pyritty arvioimaan (evaluoimaan) artefaktin avulla saatujen havaintojen ja haastattelujen avulla. Haastattelut ovat olleet ensisijaisesti yhteistyöryhtymämme edustajiin ja hankkeen muihin toimijoihin kohdistettuja avoimia haastatteluja. Joissain tapauksissa on käytetty myös

teemahaastatteluja, kun haastateltavat ovat olleet hankkeen ulkopuolisia tahoja.

Osallistuva havainnointi voi olla joko aktiivista tai passiivista. Aktiivisessa havainnoinnissa havainnoija vaikuttaa omalla läsnäolollaan aktiivisesti siihen ilmiöön, jota ollaan tutkimassa. Esimerkiksi hän voi itse osallistua kehitystyöhön, eli olla projektissa tai vastaavassa tilanteessa aktiivisena toimijana. Passiivisella havainnoinnilla tarkoitetaan havainnointia, jossa havainnoija ei itse vaikuta havainnoitavaan ilmiöön eli tapahtumien kulkuun. Kummassakin tapauksessa havainnoijan (tutkijan) on tiedettävä oma roolinsa ja ymmärrettävä roolin mahdollinen vaikutus itse tutkimustilanteeseen. (Anttila 1996.) Meidän pilotoinneissamme yritysyhteistyökumppanimme edustajat, sekä hankkeiden työntekijät suorittivat ensisijaisesti aktiivista osallistuvaa havainnointia ollen samalla yleensä myös aktiivisina toimijoina ja näin vaikuttaen myös pilotointien kulkuun.

Avoimessa haastattelussa haastattelija ja haastateltavat ovat keskustelunomaisessa vuorovaikutuksessa keskenään. Haastattelijan tavoitteena on luoda tilanteesta mahdollisimman luonteva ja avoin. Avoin haastattelu muistuttaa hyvin pitkälti tavallista keskustelua. Keskustelun etenemistä ei määritellä kovinkaan tarkasti etukäteen. Keskustelu etenee vapaasti valitun aihepiirin sisällä ja ensisijaisesti haastateltavien ehdoilla. Haastattelija määrittelee etukäteen ainoastaan teemat ja pyrkii huolehtimaan, että keskustelu pysyy suurin piirtein näissä teemoissa. Toki rönsyilyäkin sallitaan. Avoimessa haastattelussa pyritään antamaan paljon tilaa haastateltavien kokemuksille, tuntemuksille, muistoille, mielipiteille ja perusteluille. Haastattelija vain johdattelee keskustelun kulkua ja haastateltavien annetaan puhua asioista hyvin vapaasti. (Hirsjärvi & Hurme, 2001; Eskola & Suoranta, 2000) Avoin haastattelu sopii hyvin meidän pilotointiemme kaltaiseen toimintaan, jossa kaikki haastateltavat ovat ammattilaisia ja jotka tuntevat aihealueen hyvin. Lisäksi heillä on selkeät näkemykset ja mielipiteet asioista, sekä kova halu kehittää asioita eteenpäin.

Teemahaastattelukaan ei etene tarkkojen, ennalta määriteltyjen kysymysten kautta, vaan väljemmin. Keskustelu kohdennetaan ennalta suunniteltuihin aiheisiin eli teemoihin. Teemahaastattelu on hieman avointa haastattelua strukturoidumpi. Teemahaastattelussa määritellään etukäteen aihepiirit eli teemat, jotka ovat kaikille haastateltaville samoja. Niiden välillä toki voidaan liikkua melko vapaasti ilman ennalta määriteltyä tiukkaa etenemisreittiä. (Hirsjärvi & Hurme, 2001; Eskola & Suoranta, 2000.) Teemahaastattelussa käydään keskustelunomaisesti läpi ennalta suunniteltuja teemoja. Järjestys on vapaa, eikä kaikkien haastateltavien tarvitse ottaa yhtä voimakkaasti kantaa kaikkiin teemoihin. Haastattelija on määritellyt ennalta ainoastaan keskustelun teemat

karkealla tasolla ja hän pyrkii ohjaamaan keskustelua siten, että keskustelu ei kovin paljon menisi teemojen ulkopuolelle. Meidän pilotoinneissamme teemahaastattelua käytettiin tilanteissa, joissa haastateltavat olivat hankkeiden ulkopuolisia tahoja, kuten pilottikoulun oppilaita. Tässäkin tapauksessa heidän haluttiin antaa ilmaista omat näkemyksensä ja mielipiteensä asioista melko vapaasti siten, ettei haastattelija liikaa pyri ohjaamaan haastattelua johonkin tiettyyn suuntaan. Tarkemmat kuvaukset haastatteluista ja haastattelujen teemoista löytyvät väitöskirjan pilotointeja käsittelevästä **luvusta 4** (s. 69).

1.4 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET, RAJAUS, TULOKSET JA HYÖDYT

Tutkimuksen tavoitteet

Väitöskirja sisältää **kolme erillistä tutkimuskysymystä** liittyen ensisijaisesti keksimääni toiminnallisen suunnittelun menetelmään, Open BIM -standardin mukaisen tietomallin pelillistämiseen, sekä suunnittelun joukkoistamiseen monipelitekniikoita ja epälineaarisen tarinankerronnan menetelmiä ja työkaluja hyödyntäen. Tutkimuskysymyksiin vastaavat tutkimukset ja niihin liittyvät käytännön pilotoinnit on toteutettu konstruktiivisella tutkimusotteella perustuen kehittämiimme ideoihin ja innovaatioihin suunnittelututkimuksen periaatteita ja menetelmiä hyödyntäen. Kehitimme pilotoinneissamme useita konstruktioita. Konstruktioiden pohjalta toteutimme käytännön artefakteja. Artefaktien avulla testasimme ideoidemme ja innovaatioidemme toimivuutta sekä käyttökelpoisuutta käytännössä. Ideoiden ja innovaatioiden toimivuutta arvioimme laadullisen tutkimuksen menetelmin pääasiassa osallistuvan havainnoinnin ja pilotointeihin osallistuneisiin hankkeen toimijoihin kohdistettujen haastattelujen avulla. Haastattelut olivat luonteeltaan avoimia haastatteluja. Lisäksi käytimme kolmen pilottitutkimuksen yhteydessä teemahaastattelua. Nämä olivat työelämän oppimispelin kehittäminen (**pilotointi 3**), paloaseman virtuaalinen työmaakokous (**pilotointi 4**) ja koulurakennuksen kalustesuunnittelu (**pilotointi 4**).

Merkittävimpinä ideoina ja innovaatioina väitöskirjan tutkimuskysymyksiin vastaamiselle toimivat keksimäni ja patentoimamme toiminnallisen suunnittelun menetelmä (FDM), sekä ideoimamme menetelmä ja menetelmää tukeva prosessi Open BIM -standardin mukaisen rakennuksen tietomallin pelillistämiseksi. Väitöskirjan kolmanteen tutkimuskysymykseen vastataan ensisijaisesti ideallamme yhdistää monipelitekniikat, epälineaarinen tarinankerronta ja pelillistetyt tietomallit. Tämä avaa mahdollisuuksia esimerkiksi rakennussuunnittelun joukkoistamiselle, virtuaalisille työmaakokouksille, sekä muulle vastaavalle yhteisölliselle toiminnalle.

Väitöskirjan tavoitteena on vastata tutkimuskysymykseen **”Kuinka rakennuksen tietomalliin perustuvassa rakennussuunnittelussa voitaisiin nykyistä paremmin huomioida rakennuksessa tapahtuva toiminnallisuus ja sen vaatima tila?”** Tutkimuskysymykseen vastataan kehittämälläni toiminnallisen suunnittelun menetelmällä (FDM) ja esittelemällä menetelmää hyödyntäviä, TKI-hankkeissamme toteutettuja pilotointeja ja pilotoinneista saamiamme tuloksia. Tähän tutkimuskysymykseen vastataan väitöskirjan **pilotoinneilla 1 ja 2**, sekä niihin liittyvillä **julkaisuilla I, II, III ja IV**.

Tutkimuskysymykseen vastaava aineisto on luonteeltaan laadullista. Tarkempi kuvaus pilotoinneista, käytetyistä tutkimusmenetelmistä ja pilotointien tuloksista löytyy väitöskirjan **luvusta 4 (s. 69)**. Lisäksi väitöskirjan **luvussa 5 (s. 109)** vastataan keskitetysti väitöskirjan tutkimuskysymyksiin sekä esitetään, mihin pilotointeihin ja väitöskirjan julkaisuihin vastaukset perustuvat ja minkälaisilla tutkimusmenetelmillä vastaukset on saatu.

Lisäksi väitöskirja pyrkii vastaamaan tutkimuskysymykseen **”Kuinka Open BIM -standardien mukainen tietomalli saadaan pelillistettyä eri pelimoottoreille ja kuinka toiminnallisen suunnittelun menetelmää voidaan hyödyntää rakennussuunnittelussa yhdessä rakennuksen pelillistetyn tietomallin kanssa?”** Tähän tutkimuskysymykseen vastataan esittelemällä kehittämiämme ideoita, sekä niitä tukevia menetelmiä ja pilotointeja, joissa toiminnallisen suunnittelun menetelmää hyödynnetään yhdessä rakennuksen pelillistetyn tietomallin kanssa mm. rakennuksen esteettömyyden suunnitteluun ja erilaisiin tilantarpeiden mitoituksiin.

Tutkimuskysymykseen vastaavat tutkimukset ja niihin liittyvät pilotoinnit ovat käytännössä samat, joilla vastataan myös väitöskirjan ensimmäiseen tutkimuskysymykseen. Ensimmäisen tutkimuskysymyksen vastauksissa painotetaan enemmän keksimääni toiminnallisen suunnittelun menetelmää ja sen käyttöä pelillistetyn tietomallin kanssa yleisesti. Tässä taas painotetaan kehittämäämme menetelmää ja menetelmää tukevaa prosessia Open BIM -standardin mukaisen tietomallin pelillistämiseksi ja toiminnallisen suunnittelun menetelmän erilaisia käytännön sovelluksia yhdessä pelillistetyn tietomallin kanssa.

Tähän tutkimuskysymykseen vastataan pääosin ensimmäisen tutkimuskysymyksen tavoin väitöskirjan julkaisuilla **I, II, III ja IV**. Tutkimuskysymykseen vastaava julkaisujen aineisto on luonteeltaan laadullista. Tarkempi kuvaus pilotoinneista, käytetyistä tutkimusmenetelmistä ja pilotointien tuloksista löytyy väitöskirjan **luvusta 4 (s. 69)**. Lisäksi väitöskirjan **luvussa 5 (s. 109)** vastataan keskitetysti väitöskirjan tutkimuskysymyksiin sekä esitetään, mihin pilotointeihin ja väitöskirjan julkaisuihin vastaukset perustuvat ja minkälaisilla tutkimusmenetelmillä vastaukset on saatu.

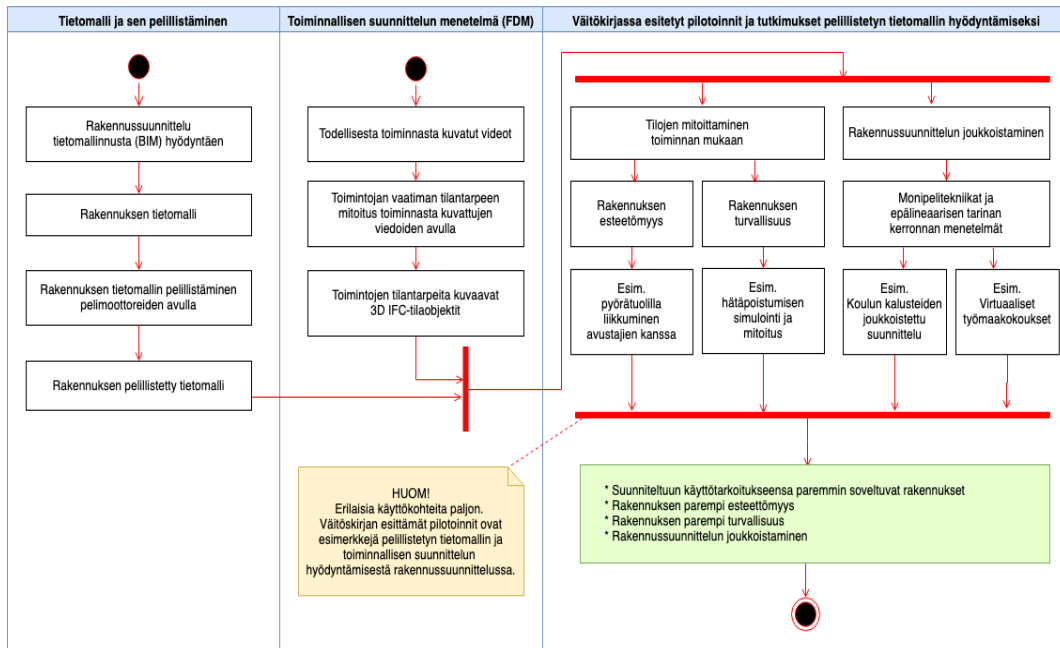
Kolmantena väitöskirjan tutkimuskysymyksenä on **”Millaisen tavan epälineaarisen tarinankerronnan menetelmät ja työkalut voisivat tarjota organisoida ja hallita joukkoistettua suunnittelua pelillistetyssä tietomallissa?”** Tähän tutkimuskysymykseen vastataan esittelemällä kehittämiämme menetelmiä ja pilotointeja. Pilotoinneissa rakennusten pelillistetyn tietomallin, toiminnallisen suunnittelun menetelmän, monipelitekniikoiden, sekä epälineaarisen tarinankerronnan menetelmien ja työkalujen avulla toteutetaan esimerkiksi joukkoistettua rakennuksen kalusteiden suunnittelua ja virtuaalisia työmaakokouksia.

Tutkimuskysymykseen vastataan väitöskirjan **pilotoinneilla 3 ja 4**. Tutkimuskysymykseen vastataan lisäksi useiden julkaisujen avulla. Tietomallin tai muun mallinnetun ympäristön pelillistämistekniikoiden osalta tutkimuskysymykseen vastataan väitöskirjan **julkaisuissa I, II, III ja IV**. Monipelitekniikoiden ja rakennussuunnittelun joukkoistamisen osalta tutkimuskysymykseen vastataan väitöskirjan **julkaisuissa II, IV, VIII ja X**. Epälineaarisen tarinankerronnan menetelmien, välineiden ja niiden pelimoottori-integraation osalta tutkimuskysymykseen vastataan **julkaisuissa V, VI, VII, VIII ja IX**. Tutkimuskysymykseen vastaava aineisto on luonteeltaan laadullista. Tarkempi kuvaus pilotoinneista, käytetyistä tutkimusmenetelmistä ja pilotointien tuloksista löytyy väitöskirjan **luvusta 4 (s. 69)**. Lisäksi väitöskirjan **luvussa 5 (s. 109)** vastataan keskitetysti väitöskirjan tutkimuskysymyksiin sekä esitetään, mihin pilotointeihin ja väitöskirjan julkaisuihin vastaukset perustuvat ja minkälaisilla tutkimusmenetelmillä vastaukset on saatu.

Tämän väitöskirjan ja siihen liittyvien julkaisujen tavoitteena on kehittää rakennusten tietomallipohjaista suunnittelua tuomalla siihen uudenlaisia toiminnallisen suunnittelun ja pelillistämisen elementtejä. Tuloksia on jo hyödynnetty ja tullaan edelleen hyödyntämään kehityshankkeissamme yhdessä useiden rakennusalan toimijoiden kanssa. Tutkimus- ja kehitystyö vastaa rakennusalan tarpeisiin saada suunniteltavassa rakennuksessa tapahtuva toiminta nykyistä paremmin ja havainnollisemmin tuotua suunnitteluun mukaan heti suunnittelun alusta lähtien.

Lisäksi tulokset auttavat rakennusalan toimijoita näkemään tietomallin pelillistämisen tuomat mahdollisuudet ja hyödyntämään niitä omassa toiminnassaan. Pelillistetyn tietomallin hyödyntäminen koko rakennuksen elinkaaren ajan on myös yksi tämän tutkimuksen tavoitteista. Tällöin pelillistetty tietomalli voisi toimia eräänlaisena kohteen digitaalisena kaksosena (Digital Twin) tarjoten esimerkiksi rakennuksen keskitetyn käyttöliittymän ylläpidon ja huollon erilaisiin tarpeisiin (Alonso, Borrás, Koppelaar, Lodigiani, Loscos & Yöntem, 2019; Kaewunruen, Rungskunroch & Welsh, 2018).

Kuvio 2 havainnollistaa väitöskirjassa käsiteltävien asioiden suhdetta toisiinsa.



Kuvio 2. Väitöskirjassa käsiteltyjen asioiden keskinäiset suhteet.

Seuraavassa on lyhyt esittely tähän väitöskirjaan liittyvistä julkaisuista. Julkaisut on ryhmitelty niiden käsittelemien aihealueiden mukaisesti siten, että ensimmäisenä aiheena tulee tietomallin pelillistäminen ja toiminnallisen suunnittelun menetelmä yleisesti sovellettuna yhteistyökumppanimme pääkonttorin tietomallin pelillistämiseen ja rakennuksen esteettömyyden suunnitteluun. Seuraavaksi tulee tekemämme pilotoinnit ja analyysit liittyen yhteistyökumppanimme rakentaman kauppakeskuksen hätäpoistumisen simulointiin ja analysointiin. Tätä seuraa tekemämme pilotoinnit ja tutkimukset liittyen rakennussuunnittelun joukkoistamiseen ja mm. virtuaalisiin työmaakokouksiin. Pilotoimme mm. yhteistyökumppanimme rakentaman koulukeskuksen kalustesuunnittelun joukkoistamista koulun oppilaille ja henkilökunnalle. Tähän liittyy oleellisena osana myös tekemämme tutkimukset epälineaarisen tarinankerronnan menetelmistä ja välineistä, sekä niiden soveltamisesta monipelitapahtumien kulun ohjaamiseen rakennuksen pelillistetyssä tietomallissa.

Julkaisussa I tutkin ja analysoin rakennuksen tietomallin pelillistämiseen liittyviä menetelmiä ja tekniikoita. Lisäksi esittelen keksimäni toiminnallisen suunnittelun menetelmän (FDM) hyödyntämistä tilojen tarkoituksenmukaisessa mitoituksessa. Julkaisussa esitetään idea siitä, kuinka toiminnallisen suunnittelun menetelmän avulla voidaan esimerkiksi suunnitella ja testata rakennuksen esteettömyyttä. Julkaisussa esitellään tilanne, jossa pelillistetyt tietomallin ”pelaajalla” on käytössään pyörätuoli ja pyörätuolin ympärille on luotu vaihdettavat törmäystunnisteet (Colliders), jotka kuvaavat pyörätuolin käytön

erilaisten toimintojen vaatimia tilantarpeita joko ilman avustajia, tai avustajien kanssa. Tällöin pelillistetyssä tietomallissa päästään havainnollisesti testaamaan, kuinka hyvin pyörätuolin käyttäjä mahtuu liikkumaan ja toimimaan suunniteltavassa rakennuksessa. Törmäystunnisteet, eli toimintojen vaatimat tilantarpeet, on mitoitettu hyödyntäen toiminnallisen suunnittelun menetelmää. Tämä artikkeli muodostaa väitöskirjani ja siihen liittyvien muiden julkaisujen lähtökohdan ja perustan.

Julkaisussa II esittelen ja analysoin kehittämäämme ideaa rakennuksen hätäpoistumisen mitoittamisesta ja analysoinnista hyödyntäen rakennuksen pelillistettyä tietomallia, toiminnallisen suunnittelun menetelmää, tekoälyä ja monipelitekniikoita sekä muita pelillisiä elementtejä. Julkaisu esittelee pilotoinnin, jossa simuloimme yhteistyökumppanimme rakentaman kauppakeskuksen hätäpoistumista kauppakeskuksen pelillistetyn tietomallin avulla (Construction Company U. Lipsanen Oy, 2018). Pelillistetty tietomalli mahdollistaa hätäpoistumisen simuloinnin ja tarkastelun yleisesti, tai vaihtoehtoisesti kenen tahansa poistujan (asiakkaan) näkökulmasta katsottuna. Lisäksi se mahdollistaa esimerkiksi pelastushenkilöstön yhteistyön suunnittelun ja harjoittelun pelillistettyyn tietomalliin liitettyjä monipelitekniikoita hyödyntäen.

Määrittelimme pilotoinnissa joukon erilaisia kauppakeskuksen käyttäjäprofiileja. Määrittelimme jokaiselle käyttäjäprofiilille profiilinsa mukaisen tilantarpeen eli törmäystunnisteen hyödyntäen toiminnallisen suunnittelun menetelmää. Lisäksi määrittelimme jokaiselle käyttäjäprofiilille yksilöllisen etenemisnopeuden ja muut liikkumiseen ja käyttäytymiseen liittyvät parametrit. Jokaisessa pelihahmossa on oma tekoälyyn perustuva logiikkansa, joka ohjaa kunkin hahmon profiilin mukaista hätäpoistumista. Tämän jälkeen loimme kauppakeskuksen pelillistettyyn tietomalliin erilaisia hätäpoistumista vaativia skenaarioita. Simuloinnit auttoivat hätäpoistumisteiden määrän ja sijainnin suunnittelua, sekä valmiiden suunnitelmien testausta ja vertailua.

Lisäksi pilotoimme kauppakeskuksen pelillistetyn tietomallin hyödyntämistä pelastushenkilöstön yhteistyön suunnitteluun ja harjoitteluun. Pelillistettyyn tietomalliin lisätyt monipelitekniikat mahdollistavat sen, että useampi pelaaja näkee saman pelimaailman tapahtumat omasta näkökulmastaan ja voi kommunikoida muiden pelaajien kanssa. Tällöin esimerkiksi pelastus- ja muu henkilöstö voivat harjoitella eri rooleissa toimimista erilaisissa poikkeustilanteissa, kuten tulipallon sattuessa.

Julkaisussa III esittelen ja analysoin aiemmin kehittämämme hätäpoistumisen simuloinnin jatkokehitystä ja siihen liittyvää jatkotutkimusta. Esittelimme jo **julkaisussa II** kehittämämme idean, jossa

rakennuksen pelillistetyn tietomallin avulla voidaan suunnitella ja simuloida hätäpoistumista. Julkaisuun liittyvässä pilotoinnissa käytimme yhteistyökumppanimme rakentaman kauppakeskuksen pelillistettyä tietomallia. Totesimme pilotoinnissa idean jatkotutkimuksen arvoiseksi ja kehitimme sitä edelleen suuntaan, jossa hyödynnetään data-analytiikkaa ja koneoppimista hätäpoistumisen ongelmakohtien löytämiseksi.

Toteutimme tätä pilotointia varten kauppakeskuksen pelillistetyn tietomallin avulla sovelluksen, jossa kauppakeskuksen lattia jaettiin muutaman neliömetrin kokoisiin ruutuihin. Lisäksi jokainen profiloitu pelihahmo tallentaa kaikki törmäyksensä reaaliajassa erilliseen lokitiedostoon. Törmäys kielii aina ongelmasta ja se voi kohdistua toisiin pelihahmoihin tai esimerkiksi kauppakeskuksen rakenteisiin ja kalusteisiin. Testasimme erilaisia hätäpoistumisvaihtoehtoja toteuttamalla jokaisen vaihtoehdon kohdalla ison joukon simuloituneita erilaisilla hätäskenaarioilla ja erilaisilla asiakasmäärillä. Etsimme näin kerätystä data-aineistosta data-analytiikan menetelmiä hyödyntäen mahdolliset hätäpoistumisen ongelmakohdat kunkin suunnitelmavaihtoehdon osalta. Tällä tavoin pääsimme testaamaan ja vertailemaan erilaisten vaihtoehtojen hyvyyttä ja keskinäistä paremmuutta. Toteutimme lisäksi koneoppimisen menetelmiä hyödyntäen mallin, jonka avulla voidaan ennustaa esimerkiksi kauppakeskuksen tyhjenemiseen kuluvia aikoja asiakasmäärien perusteella.

Julkaisussa IV esittelen ja analysoin pilotoitujamme, joissa pilotoimme ja tutkimme toiminnallisen suunnittelun menetelmän (FDM) erilaisia käyttökohteita yhdessä rakennuksen pelillistetyn tietomallin kanssa. Tässäkin julkaisussa esitellään eräänä toiminnallisen suunnittelun menetelmän mahdollisena käyttökohteena aiemmin esille tullut hätäpoistumisen simulointi ja ensisijaisesti toiminnallisen suunnittelun menetelmän hyödyntäminen profiloitujen asiakkaiden tilantarpeen mitoituksessa. Toisena pilotoinnin kohteina on toiminnallisen suunnittelun menetelmän hyödyntäminen kauppakeskuksen lastausalueen mitoituksessa. Kolmantena pilotoinnin kohteena on teollisuushallin tuotantotilojen mitoitus siten, että tuotantotilat ovat turvalliset ja erilaisille tuotantolaitteille on riittävästi tilaa. Tuotantolaitteiden tilantarpeiden mitoitus, samoin kuin tuotantotiloissa toimivien työntekijöiden tilantarpeiden mitoitus voidaan toteuttaa toiminnallisen suunnittelun menetelmää hyödyntäen. Viimeisessä pilotoinnissa pilotoidaan ja tutkitaan varaston kalusteiden sijoittelua siten, että trucki ja työntekijät mahtuvat liikkumaan riittävän hyvin ja turvallisesti. Lisäksi esimerkiksi trukin on ulotuttava määriteltyihin kohteisiin. Tässäkin pilotoinnissa työntekijöiden ja trukin toimintojen vaatimat tilantarpeet on mitoitettu toiminnallisen suunnittelun menetelmällä. Lisäksi toiminnallisen suunnittelun menetelmää on käytetty ikään kuin käänteisesti mitoittamaan se alue, johon trukin tulee yltää.

Hätäpoistumisen suunnittelun ja mitoituksen lisäksi hankkeidemme kiinnostuksen kohteena on ajatuksemme rakennussuunnittelun joukkoistamisesta ja tätä kautta esimerkiksi virtuaalisista työmaakokouksista. Tätä varten kehitimme ja pilotoimme monipelitekniikoita hyödyntäviä pelillistettyjä tietomalleja, jotka mahdollistavat usean samanaikaisen käyttäjän läsnäolon ja keskinäisen kommunikoinnin. Yksittäisten pilottisovellusten lisäksi kehitimme yleisen Virrake-sovellusalustan (Virrake, 2020), jonka avulla voidaan nopeasti pelillistää mikä tahansa rakennuksen tai muun kohteen tietomalli. Virrake-sovellusalusta on monipelialusta, joka tarjoaa samanaikaisille käyttäjille mahdollisuuden kommunikoida keskenään joko tekstillä, tai suoraan puheella. Alusta tukee lisäksi mm. VR-laseja.

Kehitimme myös ajatuksen hyödyntää epälineaarisen tarinankerronnan työkaluja ja näiden pelimootorilaajennuksia virtuaalisten tapahtumien organisointiin ja hallintaan. Tällöin esimerkiksi virtuaalisen työmaakokouksen esityslista voidaan toteuttaa epälineaarisen tarinankerronnan työkalujen avulla (esim. Twinellä (Twine, 2019)). Esityslista voidaan tuoda pelimootoriin ohjaamaan virtuaalisen työmaakokouksen kulkua, jolloin kaikki kokoukseen osallistujat näkevät sen avulla, mitä asiaa kulloinkin ollaan käsittelemässä. Lisäksi kokouksen pöytäkirja voitaisiin tuottaa samoilla työkaluilla automaattisesti esityslistan perusteella. Useat tämän väitöskirjan julkaisut käsittelevät tätä aihepiiriä, sekä aiheesta tekemiämme pilotointeja ja tutkimuksia.

Julkaisuissa V, VI ja VII esitellään ja analysoidaan epälineaarisen tarinankerronnan ideaa ja erilaisia käyttökohteita yleisesti. **Julkaisuissa V, VI ja VII** esitellään myös Twine, joka on avoin ja yksi suosituimmista epälineaarisen tarinankerronnan välineistä. **Julkaisuissa VI** esitellään mm. Twinen ja sosiaalisen median välistä integraatiota. Tämä, yhdessä rakennussuunnittelun joukkoistamisen kanssa avaa myös paljon erilaisia mielenkiintoisia mahdollisuuksia. Käytimme Twinea omissa pilotoinneissamme ja niihin liittyvissä tutkimuksissa, joten tutkimme sen käyttöä ja mahdollisuuksia ensin yleisellä tasolla. Näitä tutkimuksia käsitellään kolmessa väitöskirjaan liittyvässä julkaisussa.

Julkaisuissa VIII esittelemme ”Digiosaajaksi työelämään” -hankkeessamme (Digiosaajaksi työelämään -hanke, 2019), yhdessä useiden yhteistyökumppaneidemme kanssa toteuttamaamme työelämätaitojen oppimispelin. Hanketta hallinnoi Työväen sivistysliitto. Muut yhteistyökumppanit olivat Itä-Suomen yliopisto, Mikkelin ja Savonlinnan kaupungit, sekä Suomen Ammattiliittojen Keskusjärjestö SAK ja Palvelualojen ammattiliitto PAM. Hankkeen päärahoittajana toimi Etelä-Savon ELY-keskus Euroopan sosiaalirahastosta. Oppimispelin peliympäristönä toimii Mikkelin kaupungin ydinkeskustan pelillistetty 3D-malli. Toteutimme pelistä sekä monipelin, että myös yksinpelin. Peli

sisältää monivalintatyyppejä tehtäviä, joihin vastataan joko suoraan tai valitsemalla esimerkiksi oikeaa vastausta kuvaavan sillan. Lisäksi monipelin pelaajat voivat kommunikoida tekstimuotoisesti keskenään. Pelin avulla pelaaja voi opiskella työelämän perustaitoja ja kommunikointia. Monipeliversio mahdollistaa mm. virtuaaliset työpaikkahaastattelut joko opetustarkoituksessa tai oikeasti. Pelin tehtäväsarjat on toteutettu epälineaarisen tarinankerronnan työkalulla Twine (Twine, 2019) erillään itse pelistä ja niitä voidaan helposti vaihtaa. Tehtäväsarjat on tuotu peliin epälineaarisen tarinankerronnan työkalujen tarjoaman pelimoottori-integraation avulla.

Julkaisussa IX analysoidaan, tutkitaan ja vertaillaan edelliseen aiheeseen liittyvää epälineaarisen tarinankerronnan työkalujen pelimoottori-integraatiota. Erityisen tarkastelun kohteena ovat Twine (Twine, 2019) ja Fungus (Fungus, 2019). Molemmat välineet tarjoavat mm. pelimoottori-integraation, joten niiden avulla voidaan toteuttaa peleihin esimerkiksi erialaisia tehtäväsarjoja ja toimintalogiikoita. Näitä tekniikoita hyödynnettiin myös myöhemmin rakennussuunnittelun joukkoistamista ja virtuaalista työmaakokousta käsittelevissä pilotoinneissa ja niihin liittyvissä tutkimuksissa.

Julkaisussa X esittelemme osana TKI-hankettamme kehitetyn Virrake-sovellusalustan ja siihen kehittämiämme rakennussuunnittelua helpottavia menetelmiä ja työkaluja. Alusta mahdollistaa minkä tahansa kohteen pelillistämisen tarjoten pelillistämisen perustoiminnallisuudet lähes automaattisesti. Lisäksi alusta tarjoaa kaikille sen avulla pelillistetyille tietomalleille valmiin monipelituen ja pelaajien välisen kommunikoinnin joko tekstimuotoisesti tai äänellä. Sovellusalusta sisältää useita yhdessä yhteistyökumppaneidemme kanssa ideoimiamme toiminnallisuuksia, jotka nopeuttavat ja helpottavat rakennusten suunnittelutyötä. Alusta tarjoaa mm. valmiin VR-tuen. Kehitimme alustaan myös valmiin äänestysmekanismin, joka mahdollistaa esimerkiksi suunnittelun joukkoistamisen siten, että käyttäjät voivat äänestää erilaisten suunnitteluskenaarioiden välillä.

Pilotoimme alustaa käytännössä yhteistyökumppanimme toteuttaman Pieksämäen kaupungin Hiekanpään koulukeskuksen suunnittelussa siten, että koulun tulevat käyttäjät äänestivät erilaisten kalustevaihtoehtojen välillä. Vaihtoehdot esitettiin käyttäjille mm. alustan tarjoaman VR-tuen avulla. Tämä on hyvä esimerkki rakennussuunnittelun joukkoistamisesta. Virrake-sovellusalustasta on tehty myöhemmin kaupallinen tuote. Lisäksi pilotoimme alustaa suunnittelun joukkoistamisen ja esimerkiksi virtuaalisten työmaakokousten näkökulmasta.

Tutkimuksen rajaus, tulokset ja hyödyt

Rajaan tämän väitöstutkimuksen ensisijaiseksi näkökulmaksi keksimäni rakennusten toiminnallisen suunnittelun menetelmän (FDM) ja sen

hyödyntämisen yhdessä rakennuksen pelillistetyn tietomallin kanssa erilaisissa ideoimissamme ja pilotoimissamme rakennussuunnitteluun käyttökohteissa. Lisäksi kuvaan rakennuksen tietomallin pelillistämiseksi kehittämiämme menetelmiä ja tekniikoita. Kuvaan tutkimuksessani itse tietomallinnusta (BIM) vain siinä laajuudessa, kun se väitöstutkimuksen päätavoitteiden kannalta on tarpeen.

Tutkimuksellisesta näkökulmasta tarkasteltuna väitöskirja kuvaa uuden, patentoidun menetelmän saada kuvan tai videon avulla kaapattua mikä tahansa toiminta (liike) staattiseksi, BIM- ja Open BIM -yhteensopivaksi IFC 3D -tilaobjektiksi. Tallennusformaatti voi tietenkin olla myös mikä tahansa muu 3D-formaatti. Tällä tavoin toiminnan vaatima tila saadaan tuotua standardin mukaisena IFC 3D -tilaobjektina mihin tahansa BIM-yhteensopivaan suunnitteluohjelmistoon, jolloin päästään testaamaan, kuinka hyvin kyseinen toiminnallisuus mahtuu suunniteltuun tilaan. Sama tekniikka toimii myös toisin päin, eli sen avulla voidaan varmistaa jo suunnitteluvaiheessa, että jokin kohde (esim. nosturi) saadaan sijoitettua siten, että se ylettyy tarvittaviin kohteisiin riittävän hyvin. Myös esimerkiksi kohteessa tarvittava nostovoima voidaan huomioida tilaobjektissa. Menetelmä avaa uudenlaisen tavan suunnitella esimerkiksi esteettömiä rakennuksia, koska rakennuksessa tapahtuva toiminta saadaan suunnitteluun mukaan jo alkuvaiheessa ja näin tiloista saadaan käyttötarkoituksiinsa paremmin soveltuvia. Väitöskirjassa esitetyt pilotoinnit ja niihin liittyvät tutkimukset antavat tietoa ja menetelmiä rakennuksen tai muun kohteen tietomallin pelillistämisestä siten, että mm. tietomallissa olevat metatiedot saadaan tuotua mallin mukana pelimoottoriin.

Lisäksi kehittämämme ideat ja pilotoinnit liittyen hätäpoistumisen suunnitteluun ja mitoitukseen hyödyntäen rakennuksen pelillistettyä tietomallia, tekoälyä ja data-analytiikkaa tuovat meidän ja yhteistyökumppaneidemme mielestä uudenlaisia näkökulmia tietomallin pelillistämisen tarjoamista mahdollisuuksista. Samoin myös monipelitekniikoiden ja epälineaarisen tarinankerronnan menetelmien hyödyntäminen yhdessä pelillistetyn tietomallin kanssa mahdollistaa rakennussuunnittelun joukkoistamisen ja esimerkiksi virtuaaliset työmaakokoukset tai vaikkapa pilotoimamme pelastushenkilöstön koulutusympäristön luomisen. Näitä ideoita tutkimme mm. pilotoidessamme yhteistyökumppanimme toteuttaman koulukeskuksen kalustesuunnittelun joukkoistamista koulurakennuksen pelillistetyn tietomallin avulla. Meidän ja yhteistyökumppaneidemme mielestä tulokset olivat niin merkittäviä ja rohkaisevia, että näitä asioita halutaan ehdottomasti tutkia ja kehittää edelleen myös tulevissa hankkeissamme.

Yhteiskunnan kannalta kehittämämme toiminnallisen suunnittelun menetelmä (FDM), sekä kehittämämme ideat ja menetelmät pelillistetyn

tietomallin hyödyntämiseksi rakennussuunnittelussa mahdollistavat erilaisten rakennusten ja tilojen suunnittelun käyttötarkoituksiinsa paremmin soveltuviksi. Esteettömyys ja turvallisuus ovat sellaisia asioita, jotka koskevat nykyään kaikkea rakentamista maailmanlaajuisesti. Väitöskirjassa esiteltävät toiminnallisen suunnittelun menetelmä ja ideat rakennuksen pelillistetyn tietomallin hyödyntämiseksi antavat uudenlaisia työkaluja esteettömien ja turvallisten tilojen suunnitteluun. Suunnitellut toiminnot mahtuvat rakennettuihin tiloihin. Toimintojen kannalta tarpeetonta hukkatilaa ei myöskään pääse syntymään, kun tilojen mitoitus saadaan nykyistä tarkemmaksi ja tätä kautta paremmin vastaamaan niiden todellista käyttöä. Tämä puolestaan säästää mm. rakennus- ja energiakustannuksia, sekä lisää rakennusten käyttökelpoisuutta ja käyttömukavuutta. Rakennusten turvallisuus paranee, kun erilaisia turvallisuuteen liittyviä suunnitelmia voidaan simuloida ajamalla erilaisia rakennuksen turvallisuuteen liittyviä skenaarioita pelillistetyn tietomallin ja pelitekniikoiden avulla toteutetussa simulointiympäristössä. Simulointiympäristössä voidaan toteuttaa myös mm. pelastushenkilöstön rooliensa mukaista harjoittelua ja koulutusta.

Kaikkien tässä väitöskirjassa esitettävien ideoiden ja menetelmien käyttöönoton suurimpana haasteena voidaan pitää rakennusalan melko konservatiivista luonnetta. Yleensä uusien asioiden läpimeno alalla tapahtuu pienin askelin ja se kestää kauan. Näin on käynyt mm. itse tietomallinnuksenkin kohdalla. Aluksi suhtautuminen on usein jopa melko epäluuloista. Uusien asioiden täytyy saavuttaa pikkuhiljaa alan toimijoiden luottamus. Olemme yhteistyökumppaneidemme kanssa kuitenkin sitä mieltä, että tietomallinnus ja sen mukanaan tuomat uudet pelillistämisen kaltaiset mahdollisuudet tulevat varmasti yleistymään merkittävästi tulevaisuudessa, mutta oman aikansa se tulee varmasti ottamaan. Keksimäni toiminnallisen suunnittelun menetelmän laajamittaisempi käyttöönotto vaatii myös vielä työkalujen kehittämistä. Tutkimusta varten kehittämäni prosessi ja työkalut IFC 3D -tilaobjektien luomiseksi vaativat vielä liian paljon käsityötä laajamittaisempaa menetelmän käyttöä ajatellen.

Sama koskee myös kehittämäämme menetelmää ja menetelmää tukevaa prosessia Open BIM -pohjaisen tietomallin pelillistämiseksi. Prosessi nykymuodossaan on vielä melko paljon aikaa vievä ja runsaasti käsityötä vaativa. Tavoitteenamme onkin jatkossa pyrkiä kehittämään menetelmästä ja prosessista ketterämpi ja automaattisempi, jotta rakennusalan yhteistyökumppanimme ja myös muut alan toimijat voisivat ottaa sen helpommin käyttöön. Esimerkiksi tietomallista tuotavien IFC-mallien koon optimointia käännettäessä niitä pelimoottoreiden ymmärtämiksi mesh-malleiksi on vielä kehitettävä. Sama koskee myös IFC-mallien sisältävien metatietojen tuontia pelimoottoreihin. Tilannetta helpottaa pelinkehitysympäristöjen valmistajien satsaaminen myös

pelillistämiseen. Esimerkiksi Unreal Engine -pelimoottorin kehittäjät ovat jo nyt lisänneet pelimoottoriin natiivin IFC-tuen ja monia muita pelillistämistä helpottavia työkaluja ja ominaisuuksia. On varsin todennäköistä, että myös muut pelimoottorivalmistajat seuraavat perässä jollain aikataululla.

1.5 VÄITÖSKIRJAN RAKENNE

Väitöskirjan yhteenveto muodostuu kuudesta pääluvusta. **JOHDANNOSSA** käsitellään tutkimuksen lähtökohtia ja taustaa. Lisäksi esitellään käytetyt tutkimusmenetelmät, sekä perustelu niiden käytölle. Johdanto sisältää myös väitöskirjan tutkimuskysymykset, sekä tutkimuksen rajauksen ja kuvauksen tavoiteltavista tuloksista ja hyödyistä.

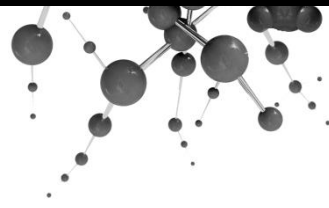
Toisessa luvussa (**TIETOMALLINNUS (BIM) JA TIETOMALLIN PELILLISTÄMINEN**) tarkastellaan ensin kirjallisuuskatsauksen avulla tietomallinnusta ja aiempaa tutkimusta yleisellä tasolla. Luvussa esitellään tietomallinnuksen keskeisimmät tekniikat ja standardit ensisijaisesti Open BIM -standardien näkökulmasta. Luvussa käsitellään lisäksi tietomallin pelillistämistä, sekä kehittämiämme ideoita ja menetelmiä Open BIM -standardin mukaisen tietomallin pelillistämiseksi.

Kolmannessa luvussa (**TOIMINNALLISEN SUUNNITTELUN MENETELMÄ ELI FDM**) tarkastellaan aluksi kirjallisuuskatsauksen avulla aihepiiriin liittyviä aiempia tutkimuksia ja niiden tuloksia. Lisäksi luvussa käsitellään tarkemmin keksimääni patentoitua toiminnallisen suunnittelun menetelmää ja sen erilaisia sovellusalueita.

Neljännessä luvussa (**VÄITÖSKIRJAN JULKAISUIHIN LIITTYVÄT PILOTOINNIT JA PILOTOINTIEN TULOKSET**) esitellään pelillistetyn tietomallin erilaisia käyttökohteita lähinnä tekemiemme pilotointien ja niihin liittyvien tutkimusten näkökulmasta. Tässä luvussa esitellään myös yleisellä tasolla ja pilotointikohtaisesti kunkin pilotoinnin keskeisimmät tulokset ja käytetyt tutkimusmenetelmät.

Viides luku (**TULOKSET**) sisältää yhteenvedon ja keskustelua väitöskirjan keskeisimmistä tuloksista. Luvussa arvioidaan myös tulosten luotettavuutta, yleistettävyyttä ja merkitystä. Viimeisessä luvussa (**JOHTOPÄÄTÖKSET**) esitellään vielä lyhyt yhteenveto tekemistämme pilotoinneista ja niissä saamistamme tuloksista. Lisäksi esitellään näkemyksiä mahdollisesta jatkokehityksestä ja jatkotutkimuksista.

Väitöskirjaan liittyvät tieteelliset alkuperäisjulkaisut on koottu omaksi kokonaisuudekseen väitöskirjan loppuun. Julkaisujen kuvauksista löytyy myös julkaisujen julkaisukanavien JUFO-luokat julkaisukohtaisesti. Julkaisut on uudelleenjulkaistu tässä väitöskirjassa niiden alkuperäisten julkaisijoiden luvalla.



2 Tietomallinnus (BIM) ja tietomallin pelillistäminen

Tietomallinnus eli BIM tukee lähtökohtaisesti sellaista toimintakulttuuria, jossa pyritään aitoon yhteistyöhön eri toimijoiden välillä koko rakennuksen elinkaaren ajan. Erilainen suunnittelu ja kehittäminen sujuvat paremmin, kun kaikki toimijat käyttävät samaa tietomallia ja heillä on koko ajan kaikki rakennuksen ajantasainen tieto käytettävissään. (Grilo & Jardim-Goncalves, 2010.) Tästä syystä väitöstutkimuksessa esitettävät ideat ja menetelmät rakennuksen tietomallin pelillistämiseksi ja pelillistetyn tietomallin edelleen hyödyntämiseksi eri tavoin ovat hyvin linjassa myös tietomallinnuksen perusajatuksen kanssa. Tietomallinnukseen liitetään oleellisena osana yleisesti IFC-formaatti (Industry Foundation Classes). IFC-formaatti on rakennusalan tietojärjestelmien väliseen oliopohjaiseen tietojen siirtoon kehitetty 3D-formaatti. (Ashcraft, 2009, 13.) IFC-formaatti mahdollistaa myös metatietojen liittämisen suoraan 3D-malliin.

Tietomallinnuksen ja siihen liittyvien standardien kehityksestä vastaa pääosin kansainvälinen yhteistyöfoorumi IAI:lle (International Alliance for Interoperability), joka tunnetaan ehkä paremmin markkinointinimellä buildingSMART. BuildingSMART kehittää avointa tietomallia, jota kutsutaan yleisesti myös nimellä Open BIM. IFC-formatilla ja sen kehittämällä on erittäin merkittävä rooli Open BIM -standardissa.

Open BIM tarjoaa kaikille toimijoille yhteisen tietomallin tallennusrakenteen ja joukon siihen liittyviä avoimia standardeja, kuten IFC, IDM, MVD ja BCF. Tietomallinnukseen ja sen standardeihin liittyvä mielenkiinto kohdistuukin ensisijaisesti juuri avoimeen Open BIM -tietomalliin ja sen ympärille kehittyviin standardeihin. BuildingSMART-

yhteisön visiona on, että tulevaisuudessa kaikki rakentaminen tehtäisiin Open BIM -standardien mukaisesti ja sen perustana oleva IFC-standardi kehittyisi palvelemaan kattavasti kaikkia rakentamisen tiedon tallennus- ja siirtotarpeita. Tämä visio koskee sekä rakennusten rakentamista (rakennukset), että myös infrarakentamista (tiet, sillat, rautatiet, puistot jne.). (BuildingSMART International, 2019.)

Meidän kehityshankkeissamme ja tässä väitöstutkimuksessa tietomalliin ja sen hyödyntämiseen kohdistuva huomio ja mielenkiinto keskittyykin ensisijaisesti juuri avoimeen Open BIM -tietomalliin ja siihen liittyviin keskeisiin standardeihin, kuten IFC-formaatiin.

Samalla kun tietomallinnusta hyödyntävät prosessit ja toimintamallit kehittyvät, niin myös itse Open BIM -standardi ja sitä tukevat ohjelmistot kehittyvät. Tulevaisuudessa BIM- ja varsinkin Open BIM -yhteensopivuus onkin varmasti kaikkien rakennusprojekteihin liittyvien ohjelmistojen perusvaatimuksena. Avoimesta Open BIM -standardista tulee todennäköisesti merkittävin tietomallinnuksen kehityssuunta ja buildingSMART on tämän kehityksen veturina.

IFC-standardi on toiminnan keskiössä ja se kehittynee ja laajentunee käsittämään kaikki tietomallinnuksen tarvitsemat tiedon tallennus- ja siirtotarpeet, niin rakennusten, kuin myös infrarakentamisenkin osalta. Tietomalli voi tulevaisuudessa olla teknisesti keskitetty tai hajautettu. Hajautetun tietomallin ajatus saa todennäköisesti lisääntyvää kannatusta ja sen toteuttamiseen tullee uusia standardeja ja toteutustekniikoita. Jo nykyisellään suunnitteluohjelmistojen tulee osata tuoda ja viedä tietomallin tietoja IFC-standardin mukaisessa formaatissa, mutta tulevaisuudessa vaatimukset varmasti kasvavat.

Tässä väitöstutkimuksessa keskitytään tietomallin ja tietomallinnuksen osalta pääasiassa Open BIM -kehitykseen ja buildingSMART-yhteistyöfoorumien kehittämiin Open BIM -standardeihin. Tutkimuksen ja tutkimukseen liittyvien julkaisujen päähuomio keskittyy tietomallin pelillistämiseen ja pelillistetyn tietomallin hyödyntämiseen rakennussuunnittelun apuna erilaisista näkökulmista.

Keksimäni patentoitu toiminnallisen suunnittelun menetelmä parantaa myös omalta osaltaan tietomallin hyödyntämistä tuomalla siihen kohteessa tapahtuvan toiminnallisuuden tilantarvetta kuvaavat IFC 3D -tilaobjektit ja kuvaamalla menetelmän, jonka avulla minkä tahansa toiminnallisuuden vaatima tilantarve (esimerkiksi pyörätuoli kahden avustajan kanssa) saadaan rakennuksen suunnitteluun mukaan. Menetelmä helpottaa toiminnan sijoittamista suunniteltavaan rakennukseen. Tuloksena saadaan tarkoituksiinsa paremmin soveltuvia rakennuksia. Menetelmälle on myönnetty patentti sekä Suomessa, että USA:ssa. (Selin, 2016; Selin, 2019.)

Tässä luvussa esitellään tietomallinnus ja sen keskeisimmät standardit yleisesti. Luvussa keskitytään ensisijaisesti buildingSMART-yhteistyöfoorumin kehittämiin Open BIM -standardeihin, koska olemme käyttäneet niitä myöskin TKI-hankkeissamme ja uskomme koko tietomallinnuksen kehittyvän avoimien Open BIM -standardien suuntaan. Lisäksi luvussa esitellään tietomallin pelillistämistä ja pelillistämiseen kehittämiämme menetelmiä sekä tekniikoita. Kohteen metatiedoilla on pelillistämisessä keskeinen rooli. Tästä syystä on tärkeää, että tietomallin pelillistämisen yhteydessä myös mallin metatiedot saadaan tuotua pelimoottoriin. Olemme kehittäneet hankkeissamme erilaisia menetelmiä ja tekniikoita metatietojen tuomiseksi tietomallien mukana pelimoottoriin. Luvussa esitellään myös tämän kehitystyön tuloksia. Väitöskirjaan liittyvistä julkaisuista **julkaisut I, II, III, IV, VIII, IX ja X** käsittelevät tätä aihealuetta, joko suoraan tai välillisesti.

2.1 TIETOMALLINNUKSESTA APUA KOKO RAKENNUKSEN ELINKAAREN AJAN

Tietomallinnusta ja tietomallia voidaan hyödyntää koko rakennuksen elinkaaren ajan. Kun rakennuksesta tehdään tietomalli jo heti rakennusprojektin alussa, voidaan tietomallia hyödyntää jo rakennuslupaprosessissa. Tietomallinnuksen yleistymisen ja kehittymisen myötä on syntynyt ajatus myös tietomallipohjaisesta rakennusluvasta. Tätä on jo kokeiltu käytännön rakennushankkeissa. Suunnitteluvaiheessa tietomalli palvelee suunnittelua ja suunnittelijoiden välistä yhteistyötä. Lisäksi suunnittelun ohjaus hyötyy tietomallinnuksesta. Tietomallinnus yhdessä Lean Construction -ajattelumallin kanssa parantaa tutkimusten ja käytännöstä saatujen kokemusten mukaan rakennushankkeen suunnittelun ohjausta merkittävästi. Kun rakennusvaihe on saatu valmiiksi, palvelee tietomalli eräänlaisena kohteen digitaalisen kaksosena koko kohteen elinkaaren ajan. Tietomalli sisältää parhaimmillaan kohteen ajantasaiset tiedot keskitetysti. Tietomallia voidaan hyödyntää esimerkiksi kohteen saneeraushankkeissa ja ylläpidossa. Lisäksi tietomallin pelillistämistä hyödyntäen voidaan rakennukseen toteuttaa erilaisia rakennuksen käyttöä ja kunnossapitoa helpottavia käyttöliittymiä. Myös erilaiset simulaatiot ovat tietomallin pelillistämisen kautta mahdollisia. Jopa rakennuksen purkamisvaiheessa on ajantasaisesta tietomallista hyötyä purkutyön suunnittelun ja mitoituksen apuvälineenä.

Tietomallipohjainen rakennuslupa on noussut viime vuosina yhdeksi tietomallinnuksen mielenkiintoiseksi käyttökohteeksi. Sitä on esimerkiksi testattu vuosina 2017-2018 toteutetussa KIRA-digi hankkeessa, jossa testattiin tietomallipohjaisen rakennuslupaprosessin toimivuutta kolmessa kerrostalohankkeessa. Lisäksi testattiin erilaisten tietomallinnustyökalujen soveltuvuutta tämänkaltaiseen toimintaan. Hankkeessa oli mukana kolme kuntaa (Hyvinkää, Järvenpää ja Vantaa), sekä neljä yritystä (Evolta, Gravicon, Solibri ja Sova3D). Kohteiden tietomalleja

hyödynnettiin käymällä ensin tarkistussääntöjen avulla läpi rakennusten lupakelpoisuus. Tarkastettavia osa-alueita olivat mm. rakennusten sopimista ympäristöönsä ja valitsevaan asemakaavaan, rakennusten pintalat, esteettömyys, sekä käyttö- ja paloturvallisuuteen liittyvät ratkaisut. Periaatteessa idea tietomallipohjaisesta rakennuslupaprosessista todettiin toimivaksi. Hankkeen loppuraportissa todetaan myös, että tietomallipohjainen rakennuslupa yhdessä hyvin laadittujen tarkastussääntöjen kanssa voi parhaimmillaan nopeuttaa ja automatisoida lupaprosessia huomattavasti. Ongelmaksi pilotoinnissa kuitenkin muodostui vielä ohjelmistojen epäyhteensopivuus siitäkin huolimatta, että pyrittiin toimimaan avoimilla Open BIM -standardeilla. Loppuraportissa myös todetaan, että tarkastussääntöihin perustuva sääntöpohjainen tarkastelu on kannattavaa, sillä sen avulla voidaan yhtenäistää, parantaa ja nopeuttaa tarkastusprosessia. (KIRA-digi, 2020.)

Rakennushankkeessa tilaajan tai tilaajan edustajan tehtävänä on määritellä rakennuksen tekniset ja laadulliset vaatimukset, sekä näiden ohella myös rakennuksen toiminnalliset vaatimukset. Vaatimusten tarkoitus on varmistaa, että tuleva rakennus soveltuisi mahdollisimman hyvin määriteltyyn käyttötarkoitukseensa. (Kankainen & Junnonen, 2015.) Suunnittelun ohjaus on työkalu, jonka avulla pyritään varmistamaan, että suunnitteluprosessi johtaa asetettujen tavoitteiden täyttymiseen suunnittelun kaikilla osa-alueilla (Rakennustieto Oy. RT 10-11107, 2013).

Suunnittelun ohjauksella tarkoitetaan käytännössä suunnittelijoiden opastusta ja ohjeistusta. Sen avulla pyritään saamaan aikaiseksi mahdollisimman hyvin tavoitteiden mukaiset ja keskenään yhteensopivat suunnitteluratkaisut siten, että myös tilaajan vaatimukset ja erilaiset rakennusmääräykset täyttyvät. Eli suunnittelun ohjauksella pyritään varmistamaan, että suunnitteluprosessin tuottamat suunnitelmat ovat toiminnallisesti, teknisesti, taloudellisesti, esteettisesti, ympäristön kannalta ja muiden mahdollisten vaatimusten osalta sellaiset, että ne voidaan hyväksyä. Ohjaamalla ja koordinoimalla suunnittelua huomioidaan kaikkien eri osapuolten tarpeet. Sen avulla myös pyritään sovittamaan työtehtävät ja mahdolliset eri toimijoiden väliset ristiriidat. Suunnittelun ohjauksen avulla pyritään myös varmistamaan, että suunnittelun kustannukset, laatu ja laajuus pysyvät annetuissa puitteissa. (Rakennustieto Oy. RT 13-10860, 2013; Kruus, 2008.)

Tietomallinnus (BIM) sellaisenaan tai yhdessä Lean-ajattelumallin kanssa voidaan nähdä merkittävästi suunnittelun ohjausta parantavana toimintamallina. Näiden avulla voidaan rakennushankkeessa nostaa asiakkaan kokemaa arvokokonaisuutta huomattavasti. (Tauriainen, Marttinen, Dave & Koskela, 2016.)

Lean Construction on rakennusalalle sovitettu ajatusmalli Leanista. Sen perusideana on Leanin tavoin pyrkiä minimoimaan rakennushankkeessa

syntyvän työn, materiaalien, energian ja muiden resurssien käyttöä. Tätä kautta voidaan maksimoida asiakkaan hankkeesta saama arvo. (Koskenvesa & Sahlsted, 2013.)

Lean-ajatusmalli pyrkii osaltaan vastaamaan rakennusalan ongelmiin, kuten asiakastytymättömyyteen ja toimitusketjujen toimimattomuuteen. Lisäksi eri toimijoiden ja toimittajien siiloutuminen kasvattaa yleensä projektissa syntyvää hukkaa. Eri osapuolten välinen luottamuspuola saattaa johtaa lisäksi muiden toimijoiden työn vahtimiseen ja jatkuvaan tarkkailuun. Lean-ajatusmallissa rakentaminen on kaikkien osapuolten välistä yhteistyötä, jonka perustana on eri osapuolten sitoutuminen hankkeeseen ja myös luottamus muita kohtaan. Yhteistyön merkitystä korostetaan ja pyritään kehittämään prosessia, sekä käyttämään yhteistyötä parantavia ja helpottavia apuvälineitä. (Seed, 2015.)

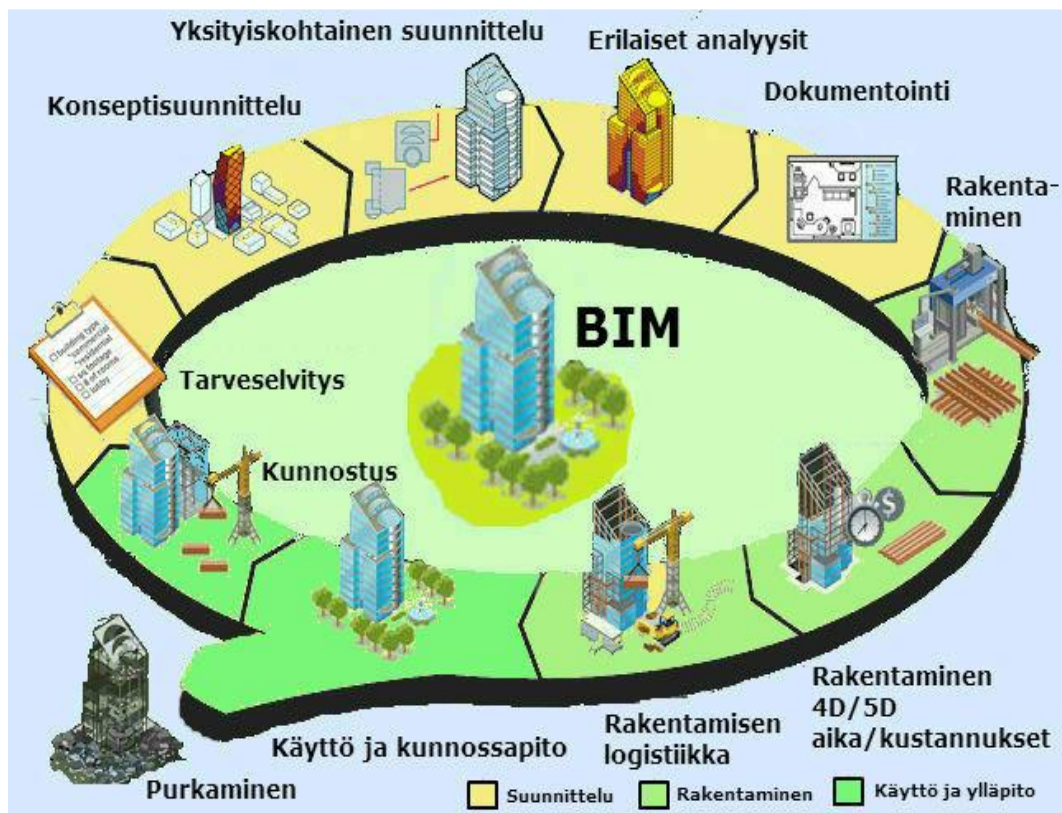
Vaikka perinteisesti on ehkä ajateltu, että rakennussuunnitelmia (kuten tietomallia) ei tarvita enää rakennuksen valmistuttua, niin tietomalli voi myös palvella eri rooleissa rakennuksen valmistumisen jälkeen koko rakennuksen elinkaaren ajan. Tietomallia voidaan esimerkiksi hyödyntää tietopankkina kohteen saneeraushankkeissa ja ylläpidossa. Lisäksi tietomallin pelillistämistä hyödyntäen voidaan pelillistettyyn tietomalliin toteuttaa erilaisia rakennuksen käyttöä ja kunnossapitoa palvelevia sovelluksia. Myös erilaiset simulaatiot ovat tietomallin pelillistämisen kautta mahdollisia. Jopa rakennuksen purkamisvaiheessa on ajantasaisesta tietomallista hyötyä purkutyön suunnittelun ja mitoituksen apuvälineenä. Oikeastaan vain mielikuvitus on rajana sille, mihin kaikkeen rakennuksen tietomallia voidaan rakennuksen elinkaaren aikana käyttää.

2.2 TIETOMALLINNUS ELI BIM (BUILDING INFORMATION MODELING)

Rakennusten suunnittelu on muuttunut tietomallinnuksen myötä enenevässä määrin piirtämisestä mallintamiseksi. Lisäksi kaikki toimijat ylläpitävät samaa 3D-tietomallia, jolloin kaikki tarvittava tieto on keskistetyesti kaikkien osapuolten saatavilla. Teknisesti tietomalli voi olla keskitetty tai hajautettu, mutta käyttäjille se näkyy kuitenkin yhtenäisenä tietomallina.

Tietomallin käyttöikä on periaatteessa sama kuin rakennuksenkin ja kaikessa rakennuksen elinkaaren aikaisissa toiminnoissa hyödynnetään tietomallia. Rakennuksesta on siis koko ajan olemassa myös virtuaalinen versio (tietomalli). Rakennus, sekä tietomalli ovat synkronoituina keskenään. Tietomalli muodostaa ikään kuin rakennuksen digitaalisen kaksosen (Digital Twin). (Alonso, Borrás, Koppelaar, Lodigiani, Loscos & Yöntem, 2019; Kaewunruen, Rungskunroch & Welsh, 2018.) **Kuvio 3** havainnollistaa karkealla tasolla rakennuksen, sekä siitä tehdyn

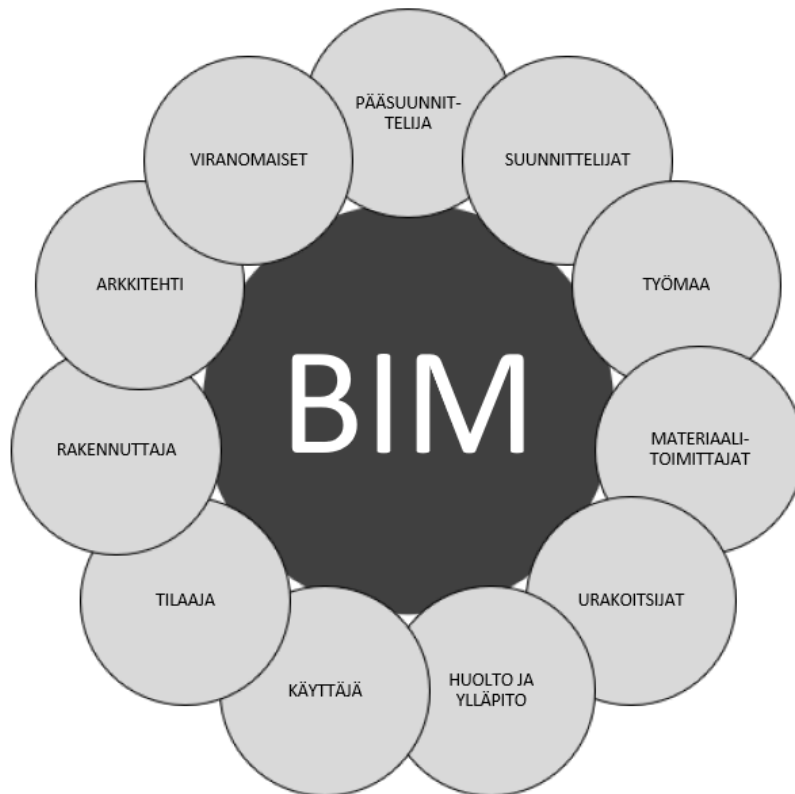
tietomallin elinkaarta (life-cycle) aina hankkeen aloittamisesta rakennuksen ylläpitoon ja purkamiseen asti (Azhar, Brown, & Farooqui, 2009; Becerik-Gerber & Kensek, 2010).



Kuvio 3. Rakennuksen ja sen tietomallin elinkaaren aikainen toiminta (life-cycle) (Muokattu lähteistä Azhar, Brown, & Farooqui, 2009; Becerik-Gerber & Kensek, 2010).

Kannattaa huomata, että **kuvion 3** kuvaama prosessi on luonteeltaan iteratiivinen ja lisäävä, eli kuvassa esitetyt elinkaaren vaiheet käydään tyypillisesti useita kertoja läpi rakennuksen elinkaaren aikana. Esimerkiksi jokainen saneerausprojekti tai laajennus on tavallaan uusi rakennushanke ja vaatii yleensä projektin kaikki vaiheet tarveselvityksestä lähtien. (Azhar, Brown, & Farooqui, 2009; Becerik-Gerber & Kensek, 2010.)

Rakennuksen elinkaaren (life-cycle) aikainen datan hallinta tietomallia ja tietomallinnusta (BIM) hyödyntäen sisältää useita eri vaiheita ja vaatii monen eri toimijan välistä laadukasta yhteistyötä. Pelkkä tekniikka ei yksin riitä, vaan tarvitaan mm. uudenlaista ajattelutapaa, uudenlaisia prosesseja ja paljon erilaista sopimista. Onnistunut hanke onkin usean tekijän muodostama kokonaisuus. (Tekla Oy, 2019.) Seuraava **Kuvio 4** havainnollistaa tyypillisessä rakennuksen elinkaaren aikaisessa BIM-projektissa toimivia tahoja. Toimijoita voi toki olla joissain tapauksissa enemmänkin.



Kuvio 4. Tyypillisen rakennushankkeen rakennuksen elinkaaren aikaisen BIM-projektin toimijoita.

Tietomalliin ja tietomallinnukseen (BIM) liittyy paljon erilaisia standardeja sekä ohjelmistoja. Ei ole vielä täysin selvää, mihin suuntaan tietomallinnus tulevaisuudessa tulee kehittymään. Selvää kuitenkin on, että se kehittyy. BuildingSMART-yhteistyöfoorumin keskittyä avoimeen Open BIM -ajattelumalliin ja siihen liittyvien standardien kehittämiseen, näyttää buildingSMART:n edustama kehityssuunta ainakin tässä vaiheessa varsin ilmeiseltä ja elinvoimaiselta. Lisäksi avoimen Open BIM -ajattelumallin kannatus on laajaa alan keskeisten toimijoiden keskuudessa.

Tässä väitöskirjassa keskitytään lähinnä buildingSMART-yhteistyöfoorumin kehittämiin keskeisiin BIM-standardeihin ja buildingSMART:n vetämään Open BIM -kehityssuuntaan, koska näyttää vahvasti siltä, että ne muodostavat tietomallinnuksen tulevaisuuden. Väitöskirjassa käsitellään itse tietomallinnusta ja Open BIM -standardeja vain siinä laajuudessa, kun se tietomallin pelillistämisen, toiminnallisen suunnitelman menetelmän ja tekemiemme pilotointien, sekä tutkimusten näkökulmasta on tarpeen.

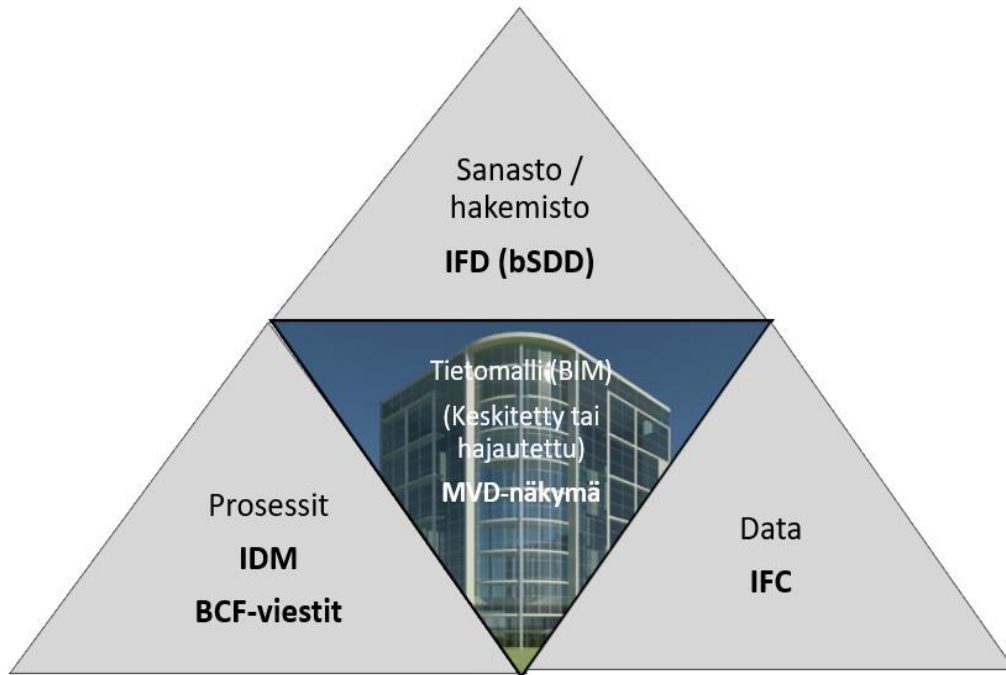
Taulukossa 1 on esitetty buildingSMART-yhteistyöfoorumin kehittämät keskeisimmät OpenBIM -standardit (buildingSMART International Standards, 2019; Hallberg & Tarandi, 2011; Oldfield, Van Oosterom, Beetz & Krijnen, 2017).

Standardin lyhyt kuvaus	Standardin nimi	Standardi
Kansainvälinen ja avoin tiedonsiirron standardi, joka määrittelee tietojen siirrossa käytettävän tiedoston rakenteen.	IFC Industry Foundation Class	ISO 16739
Prosessikuvaus, joka määrittelee, mitä tietoa siirretään suunnitteluohjelmistojen välillä missäkin käyttötilanteessa.	IDM Information Delivery Manual	ISO 29481-1 ISO 29481-2
Tiedonsiirron käyttötapauskuvaus, joka kertoo, koska ja miten sovelluksessa tulisi käyttää IDM-kuvauksia. MVD on IDM-standardia laajentava standardi.	MVD Model View Definitions	buildingSMART MVD
Määrittelee sanaston, joka auttaa yhdistämään IFC-tiedonsiirrossa samaa tarkoittavat asiat toisiinsa riippumatta käytetystä kielestä tai ohjelmistosta.	IFD International Framework for Dictionaries bSDD buildingSMART Data Dictionary	ISO 12006-3 buildingSMART Data Dictionary
Tiedonsiirtoformaatti, jonka avulla voidaan siirtää älykkäitä viestejä (esim. kysymyksiä ja kommentteja) eri BIM-ohjelmistojen välillä.	BCF BIM Collaboration Format	buildingSMART BCF

Taulukko 1. BuildingSMART-yhteistyöfoorumin kehittämät keskeisimmät Open BIM -standardit (buildingSMART International Standards; Hallberg & Tarandi, 2011; Oldfield, Van Oosterom, Beetz & Krijnen, 2017).

Vuonna 2013 julkaistun IFC 4 -version myötä buildingSMART-yhteistyöfoorumi toi selkeästi esille tavoitteensa IFC:n ja muiden Open BIM -standardien suhteen seuraavasti. "Single goal: secure IFC as the true Open BIM standard worldwide.". (buildingSMART. IFC4.1-standard, 2019.)

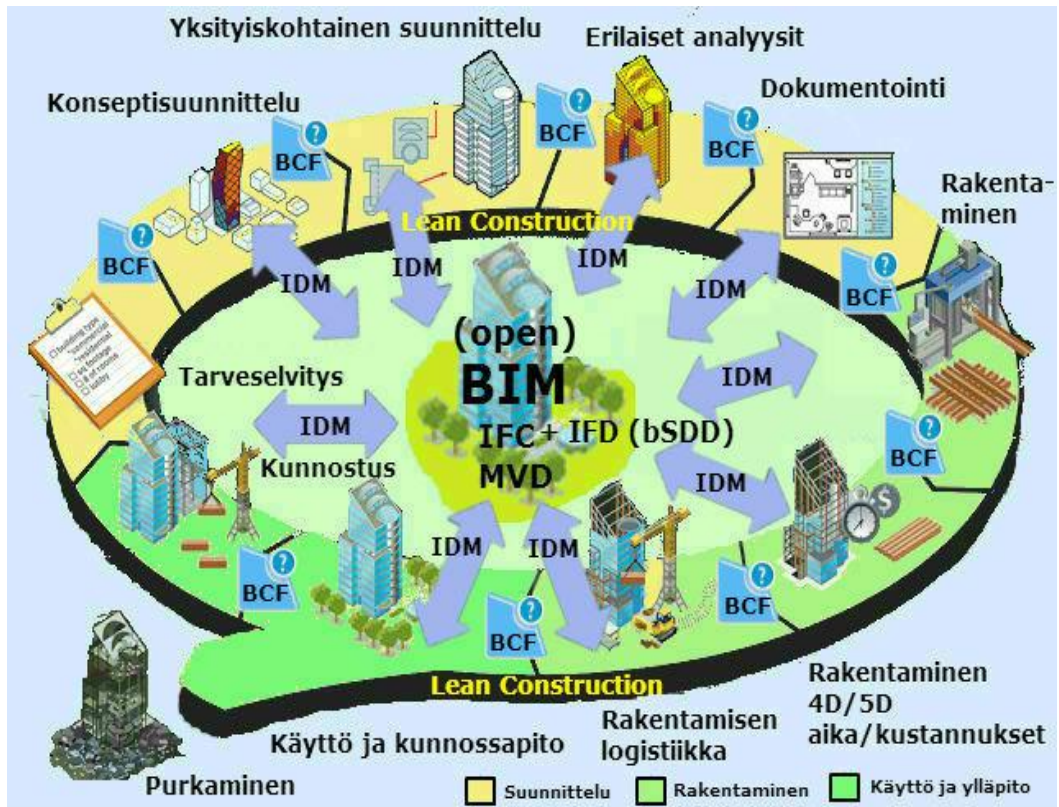
BuildingSMART-yhteistyöfoorumin rooli BIM-kehityksen veturina ja standardien kehittäjänä tulee ilmeisesti jatkossa olemaan samankaltainen, kuin esimerkiksi W3C:n (World Wide Web Consortium) rooli Web-teknologioiden kehittäjänä ja standardoijana (W3C, 2019). **Kuvio 5** havainnollistaa yksinkertaistetusti edellä kuvattujen Open BIM -standardien suhdetta toisiinsa sellaisena, kun buildingSMART-yhteistyöfoorumi kehityksen näkee (buildingSMART International Standards, 2019).



Kuvio 5. Tyypillisen rakennushankkeen rakennuksen elinkaaren aikaisen BIM-projektin toimijoita (Muokattu lähteestä buildingSMART International Standards, 2019).

Toimiakseen Open BIM -projekti vaatii käytännössä ainakin yhteiskäytössä olevan BIM-palvelimen, eri suunnittelualojen BIM-yhteensopivat suunnitteluohjelmistot, standardoidut tiedon tallennus- ja siirtoformaatit (IFC + MVD-näkymät), sekä yhteisen nimikkeistön tietojen yhteensopivuuden takaamiseksi (IFD/bSDD). Tarvitaan myös kommunikointimekanismi eri toimijoiden ja heidän ohjelmistojensa välille (BCF). Lisäksi tarvitaan yhteisesti sovittuja toimintamalleja ohjaamaan toimintaa. Tällaisia ovat mm. autonvalmistaja Toyotan kehittämästä Lean-menetelmästä rakennusosalalle kehitetty Lean Construction -menetelmä, sekä integroitu projektitoimitus IPD (Integrated Project Delivery). (Maru, 2015; Salem, Asce, Solomon, Genaidy & Minkarah, 2006; Sacks, Koskela, Dave & Owen 2010.)

Pelkät tekniikat ja prosessit eivät tietenkään vielä riitä, vaan niiden lisäksi tarvitaan paljon eri alojen ammattilaisia (sidosryhmiä), jotka sitoutuvat projektiin, luottavat toisiinsa ja pystyvät toimimaan yhteistyössä keskenään. **Kuviossa 6** on havainnollistettu rakennuksen elinkaaren aikaista BIM-projektia lisättynä keskeisimmillä buildingSMARTin Open BIM -standardeilla (buildingSMART International Standards, 2019; Hallberg & Tarandi, 2011; Oldfield, Van Oosterom, Beetz & Krijnen, 2017).



Kuvio 6. Rakennuksen elinkaaren aikainen BIM-projekti ja Open BIM -standardien käyttöä projektin eri vaiheissa (Muokattu lähteistä buildingSMART International Standards; Hallberg & Tarandi, 2011; Oldfield, Van Oosterom, Beetz & Krijnen, 2017).

IFC-standardi on Open BIM -standardeista keskeisin. Se määrittää miten tietomallin tietoja siirretään ja tarjotaan muille. IFD- ja bSDD-standardit määrittävät mitä tietoa on tarjolla siten, että projektin eri toimijat sen ymmärtävät. IDM-standardi määrittää mitä tietoja, milloin ja kenen toimesta tarjotaan. MVD-standardi tarjoaa erilaisia IFC-osajoukkoja toimijoille (Esimerkiksi tarvittavat tiedot rakennuksen energia-analyysiä varten). (Bazjanac, 2008; Palos, Kiviniemi, & Kuusisto, 2014.) BCF-standardi mahdollistaa tietomallia koskevat viestit eri toimijoiden välillä (Esimerkiksi kysymykset ja huomautukset) ilman että koko tietomallia tarvitsee välittää. Nämä ovat keskeisimmät Open BIM -standardit. (buildingSMART International Standards, 2019; Zhang, Beetz, Weisen, 2015.)

Kaikkien osa-alueiden täytyy olla kunnossa, mikäli halutaan varmistaa tietomallinnukseen perustuvan rakennushankkeen onnistuminen. Nostaisin tärkeimmäksi resurssiksi kuitenkin ihmiset, eli rakennushankkeessa toimivat eri alojen ammattilaiset, jotka sitoutuvat projektiin ja kykenevät toimimaan hyvässä yhteistyössä keskenään koko projektin ajan. Tietomallinnukseen perustuvaa rakennushanketta täytyy aina viedä eteenpäin ihmiset edellä, sillä projektin toimijoiden sitoutuminen ja motivaatio ratkaisevat viime kädessä projektin onnistumisen. Tekniset kysymykset saadaan yleensä aina jotenkin ratkaistua, vaikkakin BIM-teknologioissa ja niiden dokumentoinneissa on

vielä monien tutkijoiden ja rakennusalan toimijoiden mielestä runsaasti toivomisen varaa. Toivottavasti buildingSMART:n Open BIM -standardien kehittyminen ja vahvistuminen selkiyttää tilannetta jatkossa.

Tämän väitöskirjan kohteena olevat rakennuksen tietomallin pelillistäminen ja toiminnallisen suunnittelun menetelmä, sekä näihin liittyvät pilotoinnit ja tutkimukset liittyvät jossain määrin edellä kuvatun Open BIM -standardien muodostaman kokonaisuuden kaikkiin osiin. Esiteltävät menetelmät ja tekniikat ovat BIM- ja Open BIM -yhteensopivia. Ne perustuvat tietomallin pelillistämiseen IFC-standardia hyödyntäen. Lisäksi toiminnallisen suunnittelun menetelmän tuottamat IFC 3D -tilaobjektit tallennetaan oletuksena IFC-formaattiin mahdollisine metatietoineen.

Väitöskirjassa esitettävät menetelmät ja tekniikat muuttavat mielestämme suunnitteluprosesseja yksinkertaisemmiksi, suoraviivaisemmiksi ja tätä kautta myös ketterämmiksi (vrt. Lean Construction). Esitetyt menetelmät ja tekniikat auttavat myös projektin eri sidosryhmiä ymmärtämään suunnittelua paremmin ja osallistumaan siihen. Tämä helpottaa myös omalta osaltaan yhteistyötä, sekä parantaa toimijoiden välistä luottamusta ja sitoutumista projektiin.

2.3 IFC YLEISENÄ JA AVOIMENA STANDARDINA

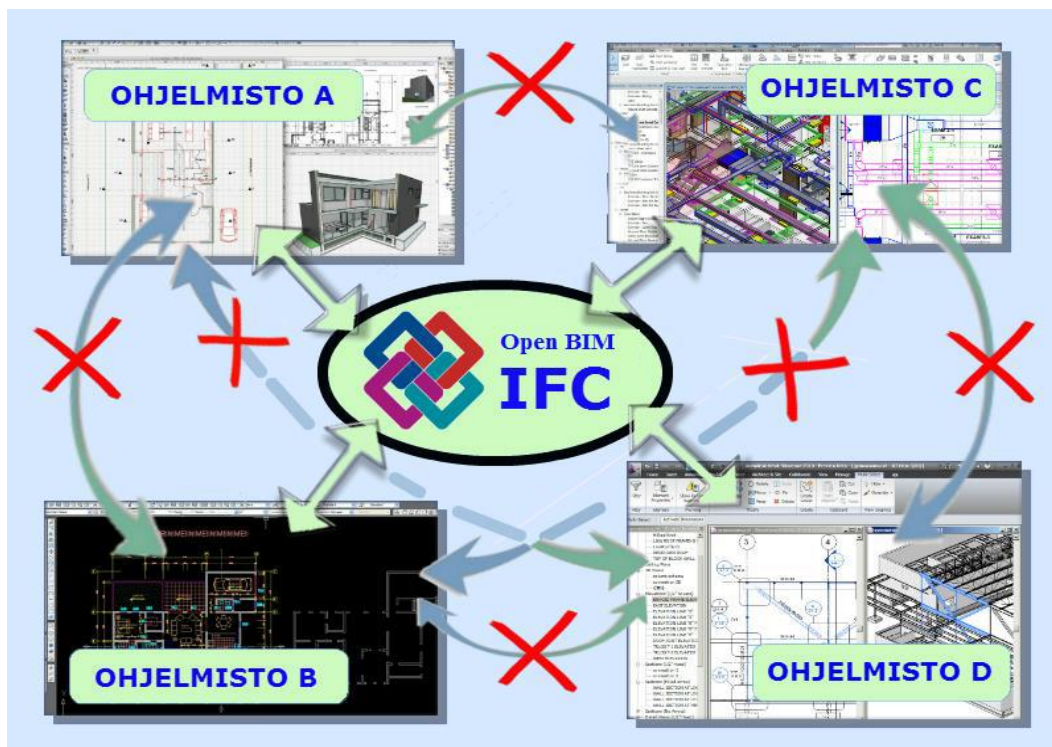
Rakennushankkeet ovat yleensä hyvin monialaisia ja hankkeen parissa työskentelee monen eri alan ammattilaisia. Yleensä eri alojen toimijat käyttävät oman alansa suunnitteluohjelmistoja, jotka tallentavat suunnitelmat omilla natiiveissa tiedostoformaateissaan. Ongelmia aiheuttaa, mikäli toisten projektin toimijoiden olisi päästävä käsittelemään muiden tekemiä suunnitelmia eri ohjelmistoilla, kuin millä suunnitelmat on alun perin luotu. Ongelmaa voidaan lähteä ratkaisemaan ainakin kahdella eri tavalla. Voitaisiin kehittää tietomallinnusta varten kokonaan uudet suunnitteluohjelmistot, joita kaikki eri alojen toimijat sitten ryhtyisivät käyttämään. Tällöin ei yhteensopivuusongelmia olisi, koska kaikki käyttäisivät samoja ohjelmistoja.

Parempana lähestymistapana kuitenkin pidetään avointa lähestymistapaa, jossa eri toimijat voivat käyttää edelleenkin omia alakohtaisia suunnitteluohjelmistojaan. Tietojen siirrettävyys eri suunnitteluohjelmistojen välillä voidaan tässä mallissa hoitaa avoimilla standardeilla, joita kaikki suunnitteluohjelmistot sitten tukevat. (buildingSMART. IFC4.1-standard, 2019.)

IFC (Industry Foundation Classes) -standardi (ISO/PAS 16739) on kehitetty tietomallinnuksen yleiseksi oliopohjaisten tietojen tallennus- ja siirtoformaatiksi. IFC-standardia kehittää IAI-järjestö (International

Alliance for Interoperability), joka tunnetaan ehkä paremmin nykyisin markkinointinimellä buildingSMART. IFC-formaattia pidetään tällä hetkellä käyttökelpoisimpana tapana toteuttaa Open BIM -standardien mukaista avointa tietojen siirtoa eri ohjelmistojen välillä. (Ashcraft, 2009; Laakso & Kiviniemi, 2011.)

IFC tarjoaa BIM-yhteensopiville sovelluksille avoimen ja standardoidun oliopohjaisen formaatin, jonka avulla sovellukset voivat varastoida tietomalliin liittyviä tietoja ja vaihtaa niitä keskenään. IFC-standardi on suunniteltu ensisijaisesti avoimeksi tietojen siirron standardiksi, jonka avulla BIM-yhteensopivat ohjelmistot voivat vaihtaa tietomallin tietoja keskenään. (Laakso & Kiviniemi, 2011.) **Kuvio 7** havainnollistaa IFC-standardin ja Open BIM -ajattelutavan tuomaa etua tiemallipohjaisessa rakennusprojektissa (van Berlo, Beetz, Bos, Hendriks, & Tongeren, 2012).



Kuvio 7. IFC-standardin käyttö ohjelmistojen välisessä tietojensiirrossa Open BIM -projektissa (Muokattu lähteestä van Berlo, Beetz, Bos, Hendriks & Tongeren, 2012).

Kuvasta voidaan helposti nähdä, että yhteinen tiedonsiirtoformaatti on ehdoton välttämättömyys, mikäli halutaan tukea eri suunnitteluohjelmistojen keskinäistä yhteensopivuutta. Mikäli esimerkiksi kuvion 7 tapauksessa ei käytössä olisi yhteistä tallennus- ja tiedonsiirtoformaattia, pitäisi jokaisen projektissa käytettävän suunnitteluohjelmiston osata tuoda ja viedä tietoa kaikkien muiden projektissa mukana olevien ohjelmistojen natiiveissa tallennusformaateissa (Kuvassa linkit, joiden päällä on rastit). Tämä olisi erittäin vaikea toteuttaa ja vaatisi jatkuvaa ohjelmistojen ylläpitoa. Jo kuvan kaltaisessa neljän suunnitteluohjelmiston tapauksessa yhteensopivuuden toteuttaminen ilman yhteistä tiedonsiirto- ja

tallennusformaattia aiheuttaisi huomattavia haasteita. Muutos yhden suunnitteluohjelmiston natiivissa formaatissa vaatisi muutoksia myös muissa ohjelmistoissa. Nyt kuvan esittämässä tapauksessa riittää, että kaikki projektissa mukana olevat suunnitteluohjelmistot ovat BIM-yhteensopivia ja osaavat tuoda, sekä viedä tietoja IFC-standardin mukaisessa formaatissa. Tämä kuvastaa myös hyvin Open BIM -standardien kehityksen syitä ja tavoitteita. Aiheesta on myöskin tehty tutkimuksia, joissa on päädytty suosittelemaan BIM-standardien käyttöä suljettujen järjestelmien sijaan (van Berlo, Beetz, Bos, Hendriks, & Tongeren, 2012).

IFC-standardi ei ota kantaa tietomallin tietojen tuottamiseen eikä niiden jakamiseen prosesseihin eri toimijoiden välillä. Tiedon tuottamiseen ja jakamiseen eri osapuolten välillä on oma standardinsa, joka on jo aiemmin esitelty IDM (Information Delivery Manual) -standardi. IDM määrittelee tietomallinnuksen eri toimijaosapuolten välisiä prosesseja, toimintatapoja ja sopimuksia (buildingSMART International Standards, 2019; Aram, Eastman, Sacks, Panushev, 2010). Aiemmin esitelty MVD (Model View Definition) -standardi määrittelee puolestaan joukon tietomallin tietojen vaihtoon liittyviä työkaluja. Nämä standardit muodostavat perustan BIM-yhteensopivien ohjelmistojen kehitykselle. (Panushev, Eastman, Sacks, Venugopal & Aram, 2010.)

IDM- ja MVD-standardin perusajatuksena on, että tietomallin tieto on tallennettuna standardoituun, kaikkien osapuolten tukemaan tallennusformaattiin. IFC on ainakin tällä hetkellä mielestämme paras vaihtoehto tietomallin yleiseksi tietojen tallennus- ja siirtoformaatiksi. IFC-standardin asema vahvistunee tulevaisuudessa vielä entisestään avoimen tietomallin ja Open BIM -standardien muodostuessa vähitellen tietomallinnuksen yleiseksi standardiksi. Voidaankin myös sanoa, että Open BIM -standardi on käytännössä hyvin pitkälti yhtä kuin IFC-standardi.

Infrarakentamisen puolella on myös vahvoja pyrkimyksiä laajentaa IFC-standardia kattamaan sen tietomallit. Maailmanlaajuisen BIM-kehityksen veturina toimivan buildingSMART-yhteistyöfoorumien visiona näyttäisikin olevan ajatus avoimesta tietomallista ja avoimista Open BIM -standardeista ja tätä kautta kehittää IFC-standardista kaiken rakentamisen yleinen ja avoin tietojen tallennus- ja siirtoformaatti. Tähän viittaavat mm. voimakkaan kehityksen alla olevat IFC-Bridge - ja IFC-Road -laajennukset IFC-standardiin, sekä buildingSMART:n esittämät tulevaisuuden visiot. (buildingSMART International Standards, 2019; Lee & Kim, 2011.)

IFC-standardin merkitystä tietomallinnuksessa kuvaa hyvin myös National BIM Standard (NBIMS), joka linjaa USA:n rakennusmarkkinoiden tietomallinnuksen yleisiä suuntaviivoja ja

kehitystä. Koko NBIMS-standardi perustuu IFC-standardin käyttöön tietomallin yleisenä tietojen tallennus- ja siirtoformaattina. NBIMS kuuluu buildingSMART-yhteistyöfoorumiin ja sillä on merkittävä rooli tietomallinnuksen kehittämisessä. (Panushev, Eastman, Sacks, Venugopal & Aram, 2010.)

IFC-standardia kehitetään jatkuvasti, mutta sen käyttö ei edelleenkään ole täysin ongelmaton. BIM-hankkeissa käytettävät sovellukset eivät välttämättä tue kovin täydellisesti IFC-standardia. Toisaalta IFC-standardin nykyiset implementoinnit eivät oikein vielä riitä kattamaan kaikkia niitä ominaisuuksia, joita suunnitteluohjelmistojen natiivit tallennusformaatit tarjoavat. Esimerkiksi Suermann ja Issa Raja (2010) tulivat tutkimuksessaan siihen tulokseen, että käytännössä IFC-standardiin perustuva tietojen tallennus ja siirto sovellusten välillä ei vielä ole täysin luotettavalla tasolla. Ainoastaan muutamassa tutkitussa projektissa IFC-standardin käyttö oli sujunut ongelmitta. Tutkimus kohdistui lähinnä tietomallipohjaiseen betonielementtien tuotantoon, mutta tulosten voidaan ajatella kuvastavan tilannetta yleisemminkin. (Suermann & Issa Raja, 2010.)

IFC-standardi on erittäin keskeisessä roolissa tämän väitöskirjan esittämässä tietomallin pelillistämisen menetelmissä ja tekniikoissa. IFC-formaatti on käytännössä ainoa ohjelmistoriippumaton tapa tuoda tietomallista osamalleja metatietoineen pelimoottoreihin pelillistämistä varten. Toki IFC-formaatinkin käyttö edellyttää usein mallin jatkokäsittelyä ja formaattimuunnoksia, sillä pelimoottoreiden natiivi IFC-tuki on vielä yleensä hyvin puutteellinen tai useammassa tapauksessa se puuttuu kokonaan. Unreal Engine on tällä hetkellä ainoa pelimoottori, joka sisältää valmiiksi natiivin IFC-tuen. Toki pelimoottorit varmasti kehittyvät tässäkin suhteessa tulevaisuudessa, kun rakennuskohteiden pelillistäminen yleistyy.

Keksimäni toiminnallisen suunnittelun menetelmä on alun alkaenkin suunniteltu Open BIM -yhteensopivaksi siten, että sen tuottamat IFC 3D -tilaobjektit tallennetaan lähtökohtaisesti mahdollisine metatietoineen IFC-standardin mukaisiin tiedostoihin. IFC-standardin ilmaisuvoima riittää esittämään toiminnan tilantarvetta kuvaavien IFC 3D -tilaobjektien mittojen lisäksi paljon muutakin tietoa (metatietoja) kohteesta. Tästä tulee olemaan paljon hyötyä, kun halutaan kehittää toiminnallisen suunnittelun menetelmiä ja prosesseja tulevaisuudessa yhä automaattisempaan suuntaan. Kaikki väitöskirjassa esitettävät pilotoinnit ja tutkimukset hyödyntävät myös IFC-standardia suoraan tai välillisesti.

IFC-standardin historia ja kehitys

IFC-standardia on kehitetty vuodesta 1996 lähtien. Vuonna 1998 julkaistu versio 1.5 (1.5.1) oli ensimmäinen versio, joka soveltui kaupallisiin ohjelmistototeutuksiin. Vuonna 1999 julkaistu 2.0-versio sisälsi

huomattavia parannuksia ja laajennuksia edellisiin versioihin nähden. Erityisesti nämä parannukset ja laajennukset koskivat arkkitehti- ja LVI-suunnittelua, sekä kiinteistön ylläpitoa. Seuraavassa, 2000-luvun alun versiossa 2x paranneltiin ja selkiytettiin pääasiassa IFC-standardin rakennetta ja tuotiin joitain lisäyksiä liittyen esimerkiksi IFC-mallin katselmointiin ja kommentointiin. IFC 2x2-versio julkaistiin seuraavaksi. Se edusti tavallaan IFC-kehityksen toista sukupolvea. Versio 2x2 toi laajennuksia (alimalleja), jotka mahdollistivat esimerkiksi rakenneanalyysit. Lisäksi mukaan tuli useita laajennuksia liittyen mm. LVI- ja sähkösuunnitteluun, sekä rakennusvalvontaan liittyviin määräytyksiin. Tämän version myötä saatiin tietomalliin myös 2D-tuki. (buildingSMART International Standards.)

Seuraava version oli 2x3 ja se julkaistiin vuonna 2006. Tässä versiossa keskityttiin pääasiassa IFC-standardin laadun parantamiseen aiemmista versioista saatujen kokemusten ja palautteen perusteella. IFC 2x3 on tällä hetkellä IFC-standardin eniten käytössä oleva versio ja IFC-standardia tukevat, BIM-yhteensopivat suunnitteluohjelmistot tukevat ensisijaisesti juuri tätä versiota. Nykyisten rakennustietomääräysten (RT) mukaan kaikkien julkisissa rakennushankkeissa käytettävien suunnitteluohjelmistojen tulee olla vähintään IFC 2x3 -yhteensopivia (sertifioituja). Yleisesti voisi todeta, että kaikkiin rakennusalan suunnitteluohjelmistoihin on syytä toteuttaa ainakin IFC 2x3 -tuki. Tämä tarkoittaa minimissään sitä, että ohjelmistojen on kyettävä tuomaan ja viemään tietoja IFC 2x3 -standardin mukaisessa tallennusformaattissa. (buildingSMART International Standards. 2019.)

IFC-standardin viimeisin versio, eli IFC 4 julkaistiin vuonna 2013. IFC 4 sisältää esimerkiksi uusia elementtejä liittyen tietomallipohjaisten hankkeiden aikatauluohjaukseen ja kustannusohjaukseen. Versio mahdollistaa lisäksi mm. erilaisten simulaatioiden (energia, lämpö jne.) toteutuksen. IFC 4 pyrkii myös korjaamaan aiemmissä versioissa havaittuja puutteita ja virheitä. IFC-standardin yhteydessä puhutaan usein 3D:n jälkeen tulevista uusista ulottuvuuksista, kuten 4D ja 5D. Nämä ulottuvuudet voivat olla esimerkiksi aikataulu ja kustannukset. Uudet ulottuvuudet laajentavat tietomallia ja sen käyttökelpoisuutta suuntaan, jossa kaikki rakennushankkeen tieto saataisiin tallennettua kokonaisuudessaan yhteen tietomalliin koko rakennuksen elinkaaren ajalta.

Taulukossa 2 havainnollistetaan IFC-standardin kehitystä vuodesta 1996 lähtien. Lisäksi taulukosta käyvät ilmi IFC-standardiin liittyvien virallisten standardien nimet ja standardointiajankohdat. (buildingSMART International Standards, 2019.)

IFC-versio	Vuosi	Standardi	Kuvaus
IFC 1.0	1997		Kehitysversio
IFC 1.5	1998		Ensimmäinen kaupallinen versio
IFC 2.0	1999		Sisältää laajennuksia ja parannuksia kuten ARK-suunnittelu ja LVI)
IFC 2x	2000	ISO 16739	Laajennuksia liittyen mm. tietomallin katselmointiin ja kommentointiin
IFC 2x2	2003	ISO 16739	IFC-standardin toinen sukupolvi (mahdollistaa mm. erilaiset analyysit)
IFC 2x3 IFC 2x3 TC1 (Technical Corrigendum 1)	2006 2007	ISO 16739	IFC 2x3 on tällä hetkellä IFC-standardin eniten käytössä oleva versio ja IFC-standardia tukevat suunnitteluohjelmistot tukevat ensisijaisesti tätä versiota
IFC 4	2013	ISO 16739	Sisältää mm. uusia elementtejä liittyen hankkeiden aikatauluohjaukseen ja kustannusohjaukseen (4D ja 5D)
IFC 5 ja IFC ?	20??		Open BIM, joka kattaa kaiken rakentamisen?

Taulukko 2. IFC-standardin kehitys (Muokattu lähteistä Laakso & Kiviniemi, (2012); buildingSMART International Standards, 2019).

IFC-standardin seuraava versio, eli viides versio on jo suunnitteilla. Tämä versio tulee tuomaan mukanaan tuen mm. eri infrastruktuurien alueille (Infra BIM). IFC-standardin ja koko buildingSMART:n Open BIM -kehityksen tulevaisuuden visiona onkin laajentaa tietomallinnus ja IFC-standardi kattamaan kaikkea rakentamista ja rakentamiseen liittyvää oheistoimintaa koko rakennuksen elinkaaren ajan (esim. aikataulutusta, projektiohjausta, kustannusseuranta ja ylläpitoa). Aika näyttää, mitä kaikkea IFC 5 ja sitä seuraavat uudet IFC-versiot tuovat tullessaan. (buildingSMART International Standards. 2019.)

Nykyiset BIM-yhteensopivat suunnitteluohjelmistot tukevat siis pääasiassa IFC 2x3 -versiota. Väitöskirjassa kuvatut tietomallin pelillistäminen ja siihen liittyvät pilotoinnit hyödyntävät BIM-yhteensopivien suunnitteluohjelmistojen kykyä viedä suunnitelmia metatietoinen juuri IFC 2x3 -formaattissa riippumatta ohjelmistojen omista natiiveista tallennusformaateista. Myös toiminnallisen suunnittelun menetelmällä tuotetut IFC 3D -tilaobjektit tallennetaan mahdollisine metatietoineen lähtökohtaisesti IFC 2x3 -formaattiin, jolloin BIM-yhteensopivat suunnitteluohjelmistot osaavat niitä tuoda ja hyödyntää sellaisenaan. Kehitimme toiminnallisen suunnittelun menetelmän tueksi selainpohjaisen VaddTool-ohjelmistotyökalun prototyypin. Työkalun

prototyyppi mahdollistaa IFC 3D -tilaobjektien luonnin toimintaa kuvaavien videoiden avulla. Lisäksi työkalu mahdollistaa mm. luotujen IFC 3D -tilaobjektien tallennuksen ja jakelun. VaddTool-ohjelmistotyökalun prototyyppi hyödyntää IFC 2x3 -standardia. VaddTool-ohjelmistotyökalun käyttöä yhdessä rakennuksen pelillistetyn tietomallin kanssa käsitellään myös väitöskirjan **julkaisuissa I ja II**.

IFC-standardi tietomallien pelillistämässä

Kuten edellä tuli ilmi, niin tietomallin pelillistäminen pelimoottoreiden avulla on mahdollista ensisijaisesti juuri suunnitteluohjelmistojen BIM-yhteensopivuuden ja tätä kautta niiden IFC-tuen ansiosta. Tietomallin osamallit voidaan viedä BIM-yhteensopivista suunnitteluohjelmistoista metatietoineen IFC-formaatissa. IFC-mallien tuonti pelimoottoreihin onnistuu yleensä muuntamalla ne pelimoottoreiden paremmin tukemiin mesh-pohjaisiin formaatteihin.

Metatiedot muodostavat edellä kuvatuissa formaattimuunnoksissa yleensä haasteen, sillä IFC-formaattia lukuun ottamatta muut 3D-formaatit eivät yleensä sisällä tukea metatietojen tallennukselle. Olemmekin kehittäneet hankkeissamme yleisen menetelmän ja menetelmää tukevan prosessin tuoda IFC-mallissa olevat metatiedot mallin mukana pelimoottoreihin. Menetelmä perusideana on jakaa IFC-tiedosto kahteen osaan siten, että kohteen 3D-malli tallennetaan johonkin pelimoottoreiden tukemaan mesh-pohjaiseen 3D-formaattiin ja metatiedot tallennetaan erilliseen XML-tiedostoon. Kohteen 3D-malli ja kohteen metatiedot sisältävä XML-tiedosto viedään erillisinä pelimoottoriin, jossa XML-tiedosto parsitaan käyttöä varten pelimoottoreiden sisältämillä XML-parsereilla. Suunnitteluohjelmistot luovat yleensä 3D-mallin eri osille yksilöivät tunnukset (id), jotka tallentuvat mallin mukana myös IFC-tiedostoon ja tätä kautta XML-tiedostoon. Mallin osat ja mallin metatiedot voidaan pelimoottorissa yhdistää tämän yksilöivän tunnusteen avulla. Kehittämäämme menetelmää ja menetelmää tukevaa prosessia IFC-standardin mukaisten tiedostojen tuomiseksi metatietoineen pelimoottoriin kuvataan väitöskirjan **julkaisuissa II ja IV**. Lisäksi aihetta käsitellään hieman myös **julkaisuissa X**.

Hankkeissa ja osassa pilotointeja käyttämämme Unreal Engine -pelimoottori sisältää ensimmäisenä pelimoottorina myös natiivin tuen IFC-tiedostomuodossa olevien mallien tuomiseksi metatietoineen pelimoottoriin (Unreal Engine Website, 2019). Unreal Enginen natiivi IFC-tuki perustuu pitkälti samankaltaisiin tekniikoihin, kun meidänkin kehittämämme yleinen menetelmä. Unrealin IFC-tuessa metatiedot ladataan erilliseen taulukkoon, josta ne on mallin osille annettujen yksilöivien tunnusten avulla liitettävissä malliin ja sen eri osiin. Kehittämämme yleinen menetelmä IFC-mallien tuomiseksi metatietoineen pelimoottoreihin toimii toki myöskin Unreal Engine -pelimoottorin kanssa.

Rakennussuunnitelmien pelillistämisen yleistymisen myötä vastavanlaisia natiiveja IFC-tukia tullaan näkemään todennäköisesti myös muissa pelimoottoreissa. Unreal Engine -pelimoottori sisältää myös Datasmith-laajennuksen, joka helpottaa tietomallien pelillistämistä tarjoten natiivin tuen myös useiden suunnitteluohjelmistojen omille natiiveille formaateille. (Unreal Engine Website, 2019; Kharvari & Höhl, 2019.) Tämä ei kuitenkaan ole yleiskäyttöinen ratkaisu, eikä se toimi kaikkien suunnitteluohjelmistojen kanssa. Toteutimme Unreal Engine -pelimoottoria ja sen tarjoamia laajennuksia hyödyntäen Virrake-sovellusalustan, joka mahdollistaa nopean tavan pelillistää erilaisten kohteiden tietomalleja. Virrake-sovellusalusta sisältää myös tuen esimerkiksi VR-laseille ja suunnittelun joukkoistamiselle. Virrake-alustaa ja sen ominaisuuksia käsitellään tarkemmin väitöskirjan **julkaisussa X**.

IFC-standardi, IFC 3D -tilaobjektit ja toiminnallisen suunnittelun menetelmä

Halusimme jo alusta alkaen tehdä keksimästani toiminnallisen suunnittelun menetelmästä (FDM) täysin BIM- ja erityisesti Open BIM -standardien kanssa yhteensopivan. Toiminnallisen suunnittelun menetelmän ideana on tuottaa minkä tahansa toiminnan tilantarvetta tai ulottuvuutta kuvaavia 3D-tilaobjekteja. Valitsimme menetelmällä tuotettujen 3D-tilaobjektien ensisijaiseksi tallennusformaatiksi IFC-formaatin.

IFC-standardin mukaiset 3D-tilaobjektit voivat sisältää myös erilaisia objektiin tai sen käyttöön liittyviä metatietoja. Tämä on käyttökelpoinen ominaisuus jatkossa, kun toiminnallisen suunnittelun menetelmää ja menetelmän käyttöä kehitetään eteenpäin mm. kohti toiminnallisuuden automaattisia simulointeja tietomallin ja pelillistämisen avulla. Lisäksi uusimpien IFC-standardin versioiden mukanaan tuomat uudet ulottuvuudet, kuten aikataulut ja kustannukset (4D ja 5D) antavat uusia mahdollisuuksia menetelmän kehittämiseksi. Toki 3D-tilaobjektit voitaisiin tallentaa mihin tahansa muuhunkin 3D-tallennusformaattiin, mutta tällöin menetettäisiin mallien BIM-yhteensopivuus ja myös metatietojen käyttö hankaloituisi.

Toteutimme toiminnallisen suunnittelun menetelmää tukevasta VaddTool-ohjelmistotyökalusta sellaisen, että se tallentaa todellisesta toiminnasta kuvattujen videoiden perusteella luodut, toiminnan tilantarvetta kuvaavat 3D-tilaobjektit IFC 2x3 -formaattiin. Kutsumme näin luotuja 3D-objekteja nimellä IFC 3D -tilaobjekti. Tällä tavoin luodut IFC 3D -tilaobjektit voidaan tuoda käytännössä metatietoineen mihin tahansa BIM-yhteensopivaan suunnitteluohjelmistoon ja näin päästään testaamaan, kuinka hyvin tilaobjektin kuvaama toiminnallisuus mahtuu tapahtumaan suunniteltavassa rakennuksessa.

Ensimmäisessä kehitysvaiheessa IFC 3D -tilaobjektit sisältävät kuitenkin vain tunnistetiedot ja toiminnan vaatiman tilan mitat kolmiulotteisesti.

Useat suunnitteluohjelmistot tukevat IFC-standardin mukaisia IFC 3D -tilaobjekteja sellaisenaan (esim ArchiCAD ja Revit). Lisäksi IFC 3D -tilaobjekteja on helppo varastoida ja siirtää eri suunnitteluohjelmistojen välillä ja ne voidaan tarvittaessa myös muuntaa muihin 3D-tallennusformaatteihin, mikäli jokin käytetty ohjelmisto ei sattuisi tukemaan IFC-standardia.

Toteutimme TKI-hankeemme puitteissa pienimuotoisen pilottitutkimuksen VaddTool-ohjelmistotyökalun prototyypillä. Testasimme erilaisissa käytännön suunnittelutilanteissa, minkä muotoisia IFC 3D -tilaobjekteja VaddTool-ohjelmistotyökalun tulisi tukea, jotta objektien avulla pystyttäisiin riittävällä tarkkuudella kuvaamaan toiminnallisen suunnittelun menetelmän tuottama toimintojen tilantarve.

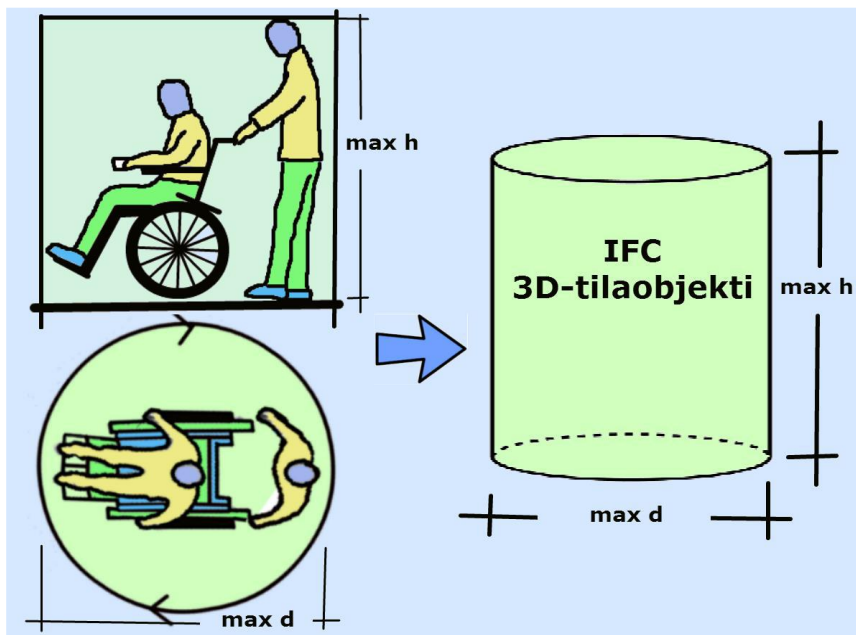
Tässä yhteistyökumppaneidemme kanssa toteuttamassamme pilotoinnissa havaittiin jopa hieman yllättäen, että suorakulmaisen laatikon ja sylinterin avulla pystytään kuvaamaan riittävällä tarkkuudella kaikkien testattujen toimintojen vaatima tilantarve. Testissä tutkitut toiminnallisuudet liittyivät pääosin esteettömyyteen, kuten liikkumiseen pyörätuolilla avustajien kanssa. Lisäksi testattiin mm. raskaiden ajoneuvojen vaatimaa tilantarvetta erilaisissa käytännön tilanteissa. Tämän kaltaisessa toiminnallisuudessa sylinteri on yleensä käyttökelpoisin muoto toimintojen vaatiman tilan kuvaamiseksi riittävällä tarkkuudella.

Sylinterin käyttökelpoisuus johtuu siitä, että yleensä toiminnon pitää mahtua tapahtumaan tasaisella alustalla kaikkiin suuntiin (esim. pyörätuolilla liikkuminen), jolloin toiminnan vaatima tila muodostaa pyörähdyskappaleen. Pilottitutkimuksen tulosten perusteella päätimme, että VaddTool-ohjelmistotyökaluun toteutetaan ensimmäisessä vaiheessa tuki laatikon ja sylinterin muotoisille IFC 3D -tilaobjekteille. Toistaiseksi ne ovat riittäneet hyvin. Tuki muille muodoille voidaan toteuttaa myöhemmin, mikäli sille ilmenee tarvetta. Lisäksi monimutkaisempi tilantarve on mahdollista toteuttaa myös yhdistämällä useampi 3D-tilaobjekti yhdeksi tilaobjektiksi.

Mikäli toiminnallisen suunnittelun menetelmän tuottama toimintojen vaatima tilantarve haluttaisiin kuvata aivan tarkasti, niin IFC 3D -tilaobjektien tulisi olla muodoiltaan lähinnä säkkimäisiä polygoniverkkoja. Käytännössä suunniteltavat tilat muodostuvat kuitenkin lähes aina selkeistä pysty ja vaakalinjoista, jolloin liian yksityiskohtaiselle toiminnon tilantarpeen kuvaamiselle ei ole käytännön tarvetta.

Kuvio 8 havainnollistaa IFC 3D -tilaobjektien muodostamista halutun toiminnon vaatiman maksimi-tilantarpeen pohjalta. Kuvan esittämässä tapauksessa kuvattavana toimintona on pyörätuolin ja yhden avustajan vaatima tila tilanteessa, jossa halutaan pyörätuolin mahtuvan kääntymään

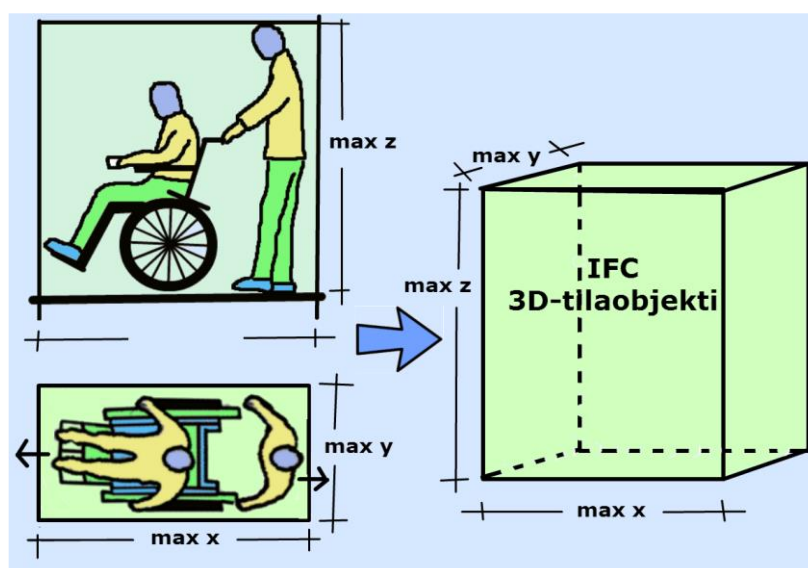
vapaasti suunniteltavassa tilassa, kuten esimerkiksi rakennuksen käytävällä.



Kuvio 8. Kuva havainnollistaa, kuinka pyörätuolilla kääntymisestä yhden avustajan kanssa tehdään sylinterin muotoinen IFC 3D -tilaobjekti toiminnallisen suunnittelun menetelmällä.

Aivan vastaavalla tavalla voidaan tuottaa esimerkiksi laatikon, tai minkä tahansa muun muotoinen IFC 3D -tilaobjekti, mikäli se on kuvattavan toiminnon kannalta tarkoituksenmukaisempi muoto.

Kuviossa 9 on myös edellisessä kuvassa esiintynyt pyörätuoli avustajan kanssa. Nyt toimintona on vain liikkuminen suoraan eteen tai taakse, jolloin ei tarvita kääntymisen vaatimaa tilaa. Tällöin tarkoituksenmukaisempi IFC 3D -tilaobjektin muoto olisi laatikko, kuten kuvastakin voidaan nähdä.



Kuvio 9. Kuva havainnollistaa, kuinka pyörätuolilla liikkumisesta yhden avustajan kanssa tehdään laatikon muotoinen IFC 3D -tilaobjekti toiminnallisen suunnittelun menetelmällä.

IFC 3D -tilaobjekteja luotaessa on muistettava myös huomioida toleranssit, jotka kyseinen toiminnallisuus vaatii. Tämä tarkoittaa käytännössä, että IFC 3D -tilaobjektien reunoille on jätettävä haluttu marginaali eri dimensioiden suuntaan. Marginaalin tarve riippuu tietenkin toiminnallisuuden luonteesta. Esimerkiksi urheiluhallia suunniteltaessa on seiväshypyn vaatimalle tilalle jätettävä enemmän marginaalia, kuin vaikkapa palvelutalon käytävällä rollaattorin kanssa liikkuvalla henkilölle.

Erimuotoisia IFC 3D -tilaobjekteja voidaan tietenkin myös yhdistellä vapaasti keskenään, mikäli kuvattavan toiminnan vaatima tila on muodoltaan sellainen, ettei sen kuvaaminen onnistu yhdellä IFC 3D -tilaobjektilla. Patentoimassamme toiminnallisen suunnittelun menetelmässä (FDM) toiminnon vaatima tilantarve saadaan todellisesta toiminnosta kuvatuista videoista tai kuvista. Tämä tekniikka kuvataan yksityiskohtaisemmin **luvussa 3**, joka käsittelee tarkemmin keksimääni toiminnallisen suunnittelun menetelmää. Samassa yhteydessä esitellään tarkemmin myös toiminnallisen suunnittelun menetelmää varten kehitetty VaddTool-ohjelmistotyökalu.

Toiminnallisen suunnittelun menetelmän ja siihen oleellisesti liittyvien IFC 3D -tilaobjektien roolia ja merkitystä tietomallin pelillistämässä käsitellään kokonaisuudessaan väitöskirjan **julkaisuissa I ja II**.

2.4 TIETOMALLIEN PELILLISTÄMINEN

Nykyiset 3D-suunnitteluohjelmistot tarjoavat yleensä myös ominaisuuksia suunnitelmien yksinkertaiseen pelillistämiseen, mikäli pelillistämällä tarkoitetaan esimerkiksi vapaata liikkumista kohteessa. Useissa suunnitteluohjelmistoissa ja niiden tarjoamissa ekosysteemeissä on myös mahdollisuuksia esimerkiksi jonkinlaiselle yhteissuunnittelulle. Suunnitteluohjelmistoja ei kuitenkaan ole ensisijaisesti kehitetty pelillistämistä varten, joten niiden tarjoamat mahdollisuudet ovat usein melko rajallisia, eivätkä ne pärjää nykyaikaisten pelimoottoreiden tarjoamille mahdollisuuksille ja ekosysteemeille.

Tietomallinnuksen ja 3D-suunnittelun ansiosta useista rakennushankkeista on heti projektin alusta lähtien saatavilla keskitetysti erilaisia kohdetta kuvaavia 3D-malleja. Lisäksi BIM-standardeista johtuen mallit ovat yleensä jo valmiiksi tallennettuina tietomalliin metatietoineen IFC-standardin mukaisessa tallennusformaattissa. Näistä lähtökohdista olemme kehittäneet TKI-hankeissamme yhdessä rakennusalan yhteistyökumppaneidemme kanssa yleiskäyttöisen menetelmän ja tätä menetelmää tukevan prosessin Open BIM -standardeja tukevan tietomallin pelillistämiseksi mihin tahansa pelimoottoriin. Menetelmän ja prosessin avulla mallin mahdollisesti sisältämät metatiedot saadaan myös tuotua tietomallin mukana pelimoottoriin ja kytkettyä malliin ja sen eri

osiin. Kehittämämme menetelmä ja sitä tukeva prosessi esitellään tarkemmin hieman myöhemmin tässä luvussa (luku 2.3, s. 31). Myös väitöskirjan **julkaisut I, II ja IV** käsittelevät tietomallin pelillistämistä, sekä kehittämämme menetelmää ja menetelmää tukevaa prosessia..

Kuvaan tässä luvussa aluksi tietomallien pelillistämistä pelimoottoreiden avulla yleisesti. Tämän jälkeen kuvaan kehittämämme yleisen menetelmän ja menetelmää tukevan prosessin tietomallien pelillistämiseksi Open BIM:n sisältämää IFC-standardia hyödyntäen. Luvun lopussa esittelen vielä pilotoinneissa tekemiämme esimerkkikohteiden pelillistämisiä.

Yleistä tietomallien pelillistämisestä

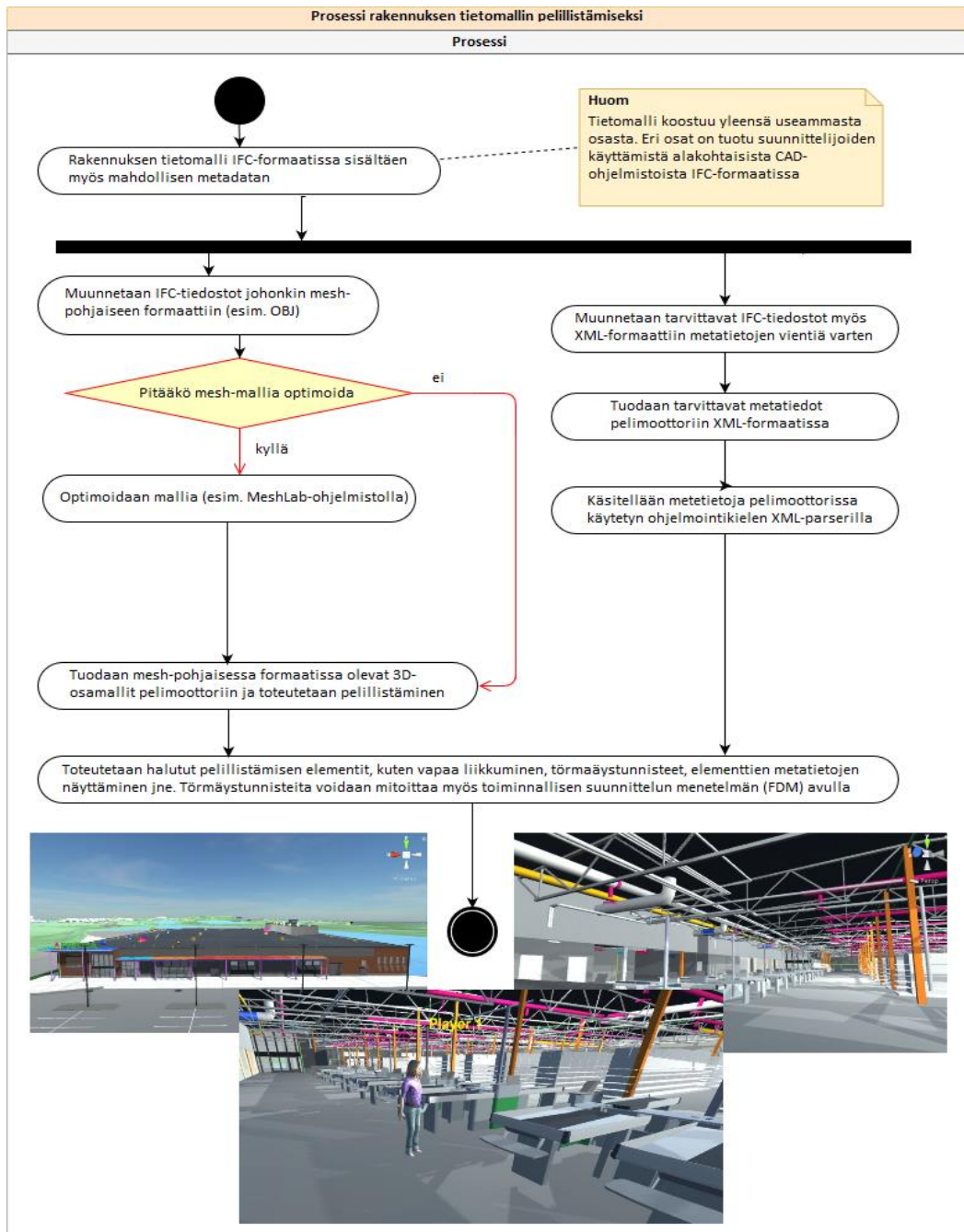
Tietomallin pelillistäminen pelimoottoreiden avulla on mahdollista suunnitteluohjelmistojen kehittyneen BIM-yhteensopivuuden ja tätä kautta niiden IFC-tuen ansiosta. Tietomallin sisältämät kohteen 3D-osamallit on yleensä tallennettu jo valmiiksi mahdollisine metatietoineen suunnitteluohjelmistoista IFC-formaattiin. Sen sijaan pelimoottoreissa ei vielä ole kovinkaan yleisesti natiivia IFC-tukea, mutta IFC-mallien tuonti pelimoottoreihin onnistuu yleensä muuntamalla ne pelimoottoreiden tukemiin mesh-pohjaisiin formaatteihin. IFC-tiedostojen sisältämät metatiedot joudutaan yleensä tuomaan pelimoottoreihin erillään varsinaisesta mallista.

Aiemmin (luku 2.2, s. 25) kuvattiin Unreal Engine -pelimoottorin tarjoama natiivi IFC-tuki. Rakennussuunnitelmien pelillistäminen pelimoottoreiden avulla on kasvattanut nopeasti suosiotaan isojen toimijoiden keskuudessa, joten uskon, että tulemme lähitulevaisuudessa näkemään samansuuntaista kehitystä myös muiden pelimoottoreiden osalta. Kehittämämme yleinen menetelmä ja sitä tukeva prosessi toimivat toki hyvin myös Unreal Engine -pelimoottorin kanssa. Tietomallien pelillistämistä erityisesti Unreal Engine -pelimoottorin avulla käsitellään tämän väitöskirjan **julkaisussa X**, jossa esitellään Unreal Enginen avulla toteuttamamme Virrake-sovellusalusta, sekä alustan käyttöä pilotoinneissamme.

Menetelmä ja sitä tukeva prosessi tietomallien pelillistämiseksi

Kehitimme pelimoottoreiden heikosta IFC-tuesta johtuen TKI-hankkeissamme yleisen menetelmän ja tätä menetelmää tukevan prosessin minkä tahansa Open BIM -yhteensopivan tietomallin pelillistämiseksi metatietoineen lähes minkä tahansa pelimoottorin avulla. Menetelmän ideana on jakaa tietomallista tuodut IFC-standardin mukaiset osamallit pelimoottoreita varten kahteen osaan siten, että itse 3D-malli ja mallin metatiedot eriytetään toisistaan. Lisäksi osamallit täytyy muuntaa johonkin pelimoottoreiden tukemaan muotoon. **Kuvio 10** havainnollistaa kehittämämme menetelmää ja menetelmää tukevaa prosessia IFC-

standardin (Open BIM) mukaisen tietomallin tai sen osan pelillistämiseksi. (Julkaisut II ja IV.)



Kuvio 10. Kehittämämme menetelmä ja menetelmää tukeva prosessi IFC-standardin mukaisen tietomallin tai sen osan pelillistämiseksi metatietoineen (Julkaisut II ja IV).

Kehittämämme menetelmän ja menetelmää tukevan prosessin perusajatuksena on, että rakennushankkeen tiedot löytyvät Open BIM -standardien mukaisesta tietomallista. Eli tietomallin osamallit on tallennettu IFC-standardin mukaiseen muotoon mahdollisine metatietoineen. Siihen, miten ja millä suunnitteluohjelmistoilla tietomallia ylläpidetään, ei kehittämämme menetelmä ja prosessi ota kantaa.

Periaatteessa kaikki BIM-standardeja tukevat menetelmät ja välineet ovat mahdollisia.

Kuten **kuviosta 10** voidaan nähdä, eriytetään itse malli ja metatiedot omiksi käsittelyprosesseikseen. Kun IFC-pohjainen malli muunnetaan johonkin pelimoottoreiden tukemaan mesh-pohjaiseen formaattiin, niin mallin koko kasvaa yleensä huomattavasti ja mallia joudutaan usein myös optimoimaan. Testaamistamme optimointityökaluista parhaaksi osoittautui käytännön testeissä ilmainen MeshLab-ohjelmisto, joka on laajan ja pitkäaikaisen kansainvälisen tutkimustyön tulos (The National Research Council, 2019). Ohjelmistoa kehitetään edelleen. Mallit olisi hyvä saada pelimoottoreita varten optimoitua enintään 2-3 miljoonan plynin kokoisiksi, jotta nykyiset tietokoneet jaksaisivat niitä riittävän sujuvasti pyörittää. Havaitimme todellisilla tietomalleilla tekemissämme testeissä, että FBX-formaatti olisi pelillistämisen kannalta paras mesh-pohjainen tuontiformaatti hyvän pelimoottoritukensa ansiosta. FBX-formaatti on kuitenkin kaupallinen formaatti, mistä johtuen varsinkaan ilmaiset ohjelmistot eivät sitä yleensä tue. (Autodesk Inc., 2019) Tästä syystä päädyimme menetelmässämme suositteluun laajasti tuettua ja ilmaista OBJ-formaattia. IFC-formaatissa olevan mallin muuntamiseksi OBJ-formaattiin löytyy myös hyviä ja ilmaisia työkaluja, kuten esimerkiksi käyttämämme avoimen IfcOpenShell-ohjelmakirjaston sisältämä IfcConvert-ohjelma (IfcOpenShell, 2019). Toki mikä tahansa pelillistämiseen valitun pelimoottorin tukema 3D-formaatti kelpaa, mikäli sen muuntaminen IFC-formaatista vain onnistuu. Kun malli on saatu käytetyn pelimoottorin tukemaan formaattiin, voidaan se tuoda pelimoottoriin pelillistämistä varten. (**Julkaisut II ja IV.**)

IFC-mallin sisältämät metatiedot käännetään kehittämässämme prosessissa XML-muotoon. BIM-yhteensopivat suunnitteluohjelmistot luovat yleensä jokaiselle mallin osalle yksilöivän tunnuksen (id), jonka avulla kyseinen osa ja siihen liittyvät metatiedot voidaan kytkeä myöhemmin toisiinsa pelimoottorissa. Käytimme testeissämme muunnokseen edellä esiteltyä IfcConvert-ohjelmaa, joka osaa muuntaa IFC-tiedoston tai sen osan XML-muotoon. (**Julkaisut II ja IV.**)

Kun alkuperäinen malli on saatu käännettyä esimerkiksi OBJ-muotoon ja mallin sisältämät metatiedot XML-muotoon, niin ne voidaan tuoda valittuun pelimoottoriin pelillistämistä varten. Tuonnin yhteydessä kannattaa yleensä mallille luoda törmäystunnisteet automaattisesti, jotta niitä ei myöhemmin tarvitse luoda käsin. Mallin metatiedot sisältävä XML-tiedosto voidaan yleensä tuoda pelimoottoreihin normaalien asettien tavoin ja parsia pelimoottoreiden tukemien ohjelmointikielten sisältämällä XML-parsereilla. Rakennuksen pelillistämisestä voidaan tehdä esimerkiksi sellainen, että pelaajan liikkuesssa rakennuksen eri huoneissa, käy huoneiden törmäystunnisteisiin liitetty ohjelmakoodi hakemassa

automaattisesti huoneen metatiedot muistiin parsitusta XML-dokumentista ja näyttää ne halutulla tavalla. Vaihtoehtoisesti, jos pelaaja osoittaa esimerkiksi jotain ikkunaa tai muuta rakennuskomponenttia, niin kyseisen rakennuskomponentin metatiedot voidaan hakea näkyville. Pelillistämässä oikeastaan mielikuvitus on vain rajana. (**Julkaisut II ja IV.**)

Kehittämämme menetelmä ja menetelmää tukeva prosessi tietomallin pelillistämiseksi on siis täysin yleiskäyttöinen ja toimii käytännössä minkä tahansa pelimoottorin kanssa. Kuvaan tässä väitöskirjassa menetelmän ja prosessin kuvausten yhteydessä meidän pilotoinneissa käyttämämme ohjelmistot ja tiedostomuodot. Samoja ohjelmistoja ja menetelmiä ei tarvitse välttämättä käyttää omissa toteutuksissa, vaan menetelmä ja prosessi ovat luonteeltaan yleisiä ja riippumattomia käytetyistä ohjelmistoista ja tiedostomuodoista. Unreal Engine -pelimoottoriin on myös tullut Datasmith-laajennus ja natiivi IFC-tuki, jotka helpottavat ja nopeuttavat tietomallin pelillistämistä merkittävästi (Unreal Engine Website, 2019; Kharvari & Höhl, 2019). Samankaltaista kehitystä on varmasti odotettavissa myös muihin pelimoottoreihin tietomallinnuksen ja pelillistämisen yleistymisen myötä. Toki kehittämämme yleiskäyttöinen menetelmä ja prosessi toimivat myös Unreal Engine -pelimoottorin kanssa. (**Julkaisut II, IV ja X.**)

Käytännön pilotointeja tietomallien pelillistämiseksi

Seuraavaksi esitellään muutama yhteistyökumppaneidemme todellinen tietomallipohjainen rakennushanke, jotka on pelillistetty erilaisia käyttötarkoituksia varten kehittämämme menetelmää ja sitä tukevaa prosessia hyödyntäen. Tässä esitettävät pelillistämiset liittyvät osana TKI-hankkeisiimme. Tässä yhteydessä kuvataan vain tietomallien pelillistämiset. Näihin pelillistettyihin tietomalleihin liittyvät pilotoinnit esitetään tarkemmin väitöskirjan luvussa neljä.

Ensimmäinen esimerkki tietomallin pelillistämisestä kehittämämme menetelmän ja prosessin avulla on pilotointi, jota varten pelillistimme yhteistyökumppanimme Rakennusliike U. Lipsasen Pieksämäen Naarajärvellä sijaitsevan pääkonttorin (julkaisu 1; Construction Company U.Lipsanen Oy, 2015). Rakennusliikkeen pääkonttori suunniteltiin tietomalli ajattelun ja Open BIM -standardien mukaisesti, joten siitä oli tarvittavat IFC-standardin mukaiset osamallit metatietoineen saatavilla heti projektin alkuvaiheesta lähtien. Pelillistimme tietomallin **kuvion 9** esittämää prosessia noudattaen (luku 2.3, s. 31). Pelillistämisen rungon muodosti kohteen IFC-muotoinen arkkitehtimalli, joka pelillistettiin Unity-pelimoottorin avulla. Pelillistäminen tehtiin täysin edellä esitetyn menetelmän ja prosessin mukaisesti. IFC-muodossa oleva tietomalli muunnettiin OBJ-formaattiin avoimen IfcOpenShell-ohjelmakirjaston sisältämällä IfcConvert-ohjelmalla. Samalla ohjelmalla myös IFC-mallin

sisältävät metatiedot tallennettiin omaksi XML-tiedostokseen. Pelimoottoriin tuonnin yhteydessä OBJ-muotoiselle mallille luotiin törmäystunnisteet. Tämä mahdollisti, että liikkumisen yhteydessä voitiin pelaajalle esittää esimerkiksi eri tiloihin liittyviä metatietoja. (Julkaisut I, II ja IV.)

Kuvio 11 havainnollistaa yhteistyökumppanimme pääkonttoria tietomallista pelillistettynä. Kuvassa näkyy rakennuksen pelillistetty tietomalli sekä ulkoa, että sisältä kuvattuna.



Kuvio 11. Yhteistyökumppanimme pääkonttori sekä ulkoa, että sisältä kuvattuna.

Pilotoimme kehittämämme menetelmän ja prosessin lisäksi myös rakennuksen esteettömyyden simulointia. Haimme simuloinnissa esteellisen rakennuksen käyttäjän immersion luomista pelillistämisen ja pelitekniikoiden avulla. Itse pilotoinnista ja sen tuloksista on tarkempi esittely väitöskirjan luvussa neljä (luku 4.1, s. 70), sekä **julkaisussa I**.

Toisena esimerkkinä esitellään rakennuksen tietomallin pelillistäminen, jossa pelillistimme yhteistyökumppanimme Pieksämäen keskustaan toteuttaman kauppakeskuksen. Tässäkin tapauksessa kauppakeskus suunniteltiin tietomallinnuksen periaatteita ja Open BIM -standardeja

hyödyntäen, joten se oli myös erinomainen kohde pilotoida kehittämäämme menetelmää ja prosessia hieman suuremman kokoluokan todellisessa rakennuskohteessa.

Kuvio 12 havainnollistaa yhteistyökumppanimme toteuttamaa kauppakeskusta kehittämämme menetelmän ja prosessin avulla tietomallista pelillistettynä. Kuvassa näkyy kauppakeskuksen pelillistetty tietomalli ulkoa ja sisältä kuvattuna. Kuvassa pelaaja on Third Person Controller -tyyppinen vaihdettava monipelihahmo, joka pystyy vapaasti liikkumaan pelillistetyssä kauppakeskuksessa.



Kuvio 12. Pelillistetty kauppakeskus ulkoa ja sisältä kuvattuna Third Person Controller -tyyppisen pelaajan näkökulmasta tarkasteltuna.

Toteutimme TKI-hankkeissamme kauppakeskuksen pelillistetyn tietomallin kanssa useita erilaisia pilotointeja liittyen mm. rakennuksen turvallisuuteen, tilojen mitoitukseen ja suunnittelun joukkoistamiseen. Näitä pilotointeja esitellään tarkemmin väitöskirjan luvussa neljä (luku 4.2, s. 72), sekä **julkaisuissa II ja IV**.

Kolmantena ja tässä yhteydessä viimeisenä esimerkkinä esitellään pelillistäminen, jossa pelillistimme yhteistyökumppanimme, niin ikään Pieksämäelle toteuttaman koulukeskuksen. Tässäkin tapauksessa

koulukeskus suunniteltiin jo lähtökohtaisesti tietomallinnuksen periaatteita ja Open BIM -standardeja hyödyntäen.

Kuvio 13 havainnollistaa koulukeskuksen pelillistettyä tietomallia pelaajan näkökulmasta. Tässä pelillistämisessä hyödynsimme TKI-hankkeessamme toteuttamaamme Virrake-sovellusalustaa, joka tarjoaa valmiin alustan tietomallien ja muiden vastaavien kohteiden pelillistämiseksi esimerkiksi suunnittelun ja markkinoinnin tarpeisiin (luku 4.4, s. 88; **Julkaisu X**).



Kuvio 13. Kuva havainnollistaa tilannetta, jossa koulun pelillistetystä tietomallista ollaan etsimässä käytävän Exit-kytille optimaalista sijoituspaikkaa (luku 4.4, s. 88; **Julkaisu X**).

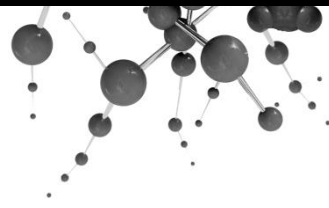
Toteutimme koulukeskuksen pelillistetyn tietomallin avulla mm. pilotoinnin, jossa tutkimme rakennussuunnittelun joukkoistamista siten, että koulun oppilaat pääsivät vertailemaan ja äänestämään erilaisten kalustevaihtoehtojen välillä. Kehittämämme Virrake-sovellusalusta tarjoaa valmiina mm. tässä pilotoinnissa tarvittavan monipelituen, sekä mahdollisuuden äänestä erilaisten skenaarioiden välillä. Tällä tavoin se mahdollistaa esimerkiksi rakennussuunnittelun joukkoistamisen.

Kuvio 14 havainnollistaa tilannetta, jossa ollaan Virrake-alustan avulla pelillistetystä koulukeskuksen tietomallista äänestämässä koulukeskuksen ruokalan ennalta määriteltujen kalustusvaihtoehtojen välillä. Alusta sisältää myös työkalut äänestystulosten hallintaa ja analysointia varten.



Kuvio 14. Kuvassa ollaan Virrake-alustan avulla pelillistetyssä koulukeskuksen tietomallissa äänestämässä alustan sisältämällä äänestystyökalulla koulukeskuksen ruokalan kalustamisesta ennalta määriteltyjen kalustevaihtoehtojen välillä (luku 4.4,s.88; **Julkaisu X**). Tätä ja muita rakennussuunnittelun joukkoistamiseen, sekä virtuaalisiin työmaakokouksiin liittyviä pilotointeja esitellään tarkemmin väitöskirjan luvussa neljä, sekä **julkaisuissa VIII ja X**.

Tähän aihekokonaisuuteen liittyvät myös epälineaarisen tarinankerronnan menetelmät ja välineet, sekä näiden mahdolliset pelimoottori-integraatiot. Nämä menetelmät ja välineet tarjoavat työkaluja esimerkiksi joukkoistetun suunnittelun ja virtuaalisen työmaakokouksen kulun määrittämiseen ja hallintaan. Tähänkin aihekokonaisuuteen liittyviä pilotointeja esitellään tarkemmin väitöskirjan luvussa neljä, sekä **julkaisuissa VI, VII, VIII ja IX**.



3 Toiminnallisen suunnittelun menetelmä eli FDM

Tässä luvussa esitellään aluksi kirjallisuuden avulla aikaisempia aihepiiriin liittyviä tutkimuksia. Tämän jälkeen käydään läpi toiminnallisen suunnittelun menetelmän taustaa ja perusidea. Seuraavaksi esitellään lyhyesti toiminnallisen suunnittelun menetelmän ja sitä tukevan prosessin pilotointia varten toteuttamani VaddTool-ohjelmistotyökalun prototyyppi. Tämän jälkeen esitellään vielä menetelmän käyttöä ja mahdollisia käyttökohteita liittyen tekemiimme pilotointeihin ja niihin liittyviin tutkimuksiin.

Rakennusten ja muiden rakennettavien kohteiden suunnittelu on perinteisesti ollut ja on vielä edelleenkin suurelta osin kohteen mitoituksen ja muotojen suunnittelua. Suunniteltava kohde ajatellaan melko staattisena. Arkkitehdit pyrkivät usein ensisijaisesti löytämään haluamansa muodon ja ulkoasun. Rakennesuunnittelijat pyrkivät mitoittamaan rakenteet siten, että ne toimivat ja kestävät käyttötarkoituksessaan. Muut tekniset suunnittelijat, kuten esimerkiksi LVI- ja sähkösuunnittelijat pyrkivät pääsemään kukin omasta näkökulmastaan mahdollisimman hyvään lopputulokseen. Tietomallinnus auttaa suunnittelijoita ja muita rakennushankkeen toimijoita kommunikoimaan ja hahmottamaan kokonaisuuksia uudella tavalla. Lisäksi tietomallinnus pyrkii kattamaan koko kohteen elinkaaren, joten esimerkiksi saneerauskohteen piirustusten katoaminen vuosien varrella ei enää jatkossa pitäisi olla ongelma, vaan kaikki tarvittava tieto pitäisi löytyä ajantasaisena rakennuksen tietomallista koko rakennuksen elinkaaren ajan.

Kehityksen ja lisääntyvien esteettömyyden kaltaisten toiminnallisten vaatimusten myötä on tarve rakennusten ja muiden kohteiden toiminnalliseen suunnitteluun oleellisesti lisääntynyt ja sen merkitys tulee varmasti tulevaisuudessa korostumaan entisestään. Suunniteltaviin kohteisiin on mahdollista mitä moninaisempaa toimintaa ja lisäksi kohteessa harjoitettava toiminta voi vaihdella kohteen elinkaaren aikana riippuen kohteen kulloisestakin käyttötarkoituksesta. Miten tämä kehitys voitaisiin ottaa nykyistä paremmin tietomallipohjaisessa rakennussuunnittelussa huomioon siten, että kohteessa tapahtuva toiminnallisuus saataisiin suunnitteluun mukaan jo heti suunnittelun alusta lähtien? Toiminnallisuuden vaatimien muutosten tekeminen kohteen tietomalliin ennen rakentamista on paljon parempi ja edullisempi vaihtoehto, kun tehdä vastaavia muutoksi valmiiseen rakennukseen jälkikäteen. Valitettavan yleistä on, että vasta rakennuksen valmistuttua huomataan, että rakennetut tilat eivät palvelekaan kaikilta osin käyttötarkoitustaan riittävän hyvin tai esimerkiksi rakennuksen esteettömyys ei toteudu vaatimusten mukaisesti.

Näihin toiminnallisen suunnittelun haasteisiin pyrkii osaltaan vastaamaan keksimäni toiminnallisen suunnittelun menetelmä eli FDM (Functional Design Method). Menetelmä auttaa suunnittelijoita huomioimaan suunniteltavassa kohteessa tapahtuvan todellisen toiminnallisuuden nykyistä paremmin. Erityisesti menetelmästä on apua tilanteissa, jossa kohdetta ei ole vielä rakennettu, vaan kohteesta on olemassa ainoastaan tietomalli. Menetelmä tarjoaa idean lisäksi valmiin prosessin, joka mahdollistaa todellisesta toiminnasta kaapattujen tilantarpeiden siirtämisen IFC 3D -tilaobjektien muodossa tietomallipohjaisen suunnittelun avuksi. Menetelmän avulla päästään kohteen tietomallia hyödyntäen testaamaan ja simuloimaan eri tavoin, kuinka hyvin vaadittu toiminnallisuus mahtuu suunniteltaviin tiloihin. Menetelmä mahdollistaa esimerkiksi hyvin monipuolisen toiminnallisen suunnittelun ja simuloinnin, kun se yhdistetään pelillistetyn tietomallin tarjoamien mahdollisuuksien kanssa.

Toiminnallisen suunnittelun menetelmä yhdessä tietomallin ja tietomallin pelillistämisen kanssa tarjoaa alustan toteuttaa erilaisia kohteessa tapahtuvaan toiminnallisuuteen liittyviä automaattisia simulointeja ja analyysejä. Yksi tällainen voisi olla esimerkiksi kohteen esteettömyysanalyysi, jossa kohteen tietomallin ja esteettömyyteen liittyvien IFC 3D -tilaobjektien avulla voitaisiin kerralla nähdä, mahtuuko kaikki suunniteltu ja/tai lain määräämä esteettömyyteen liittyvä toiminnallisuus suunniteltuihin tiloihin. Esteettömyysanalyysi voisi lisäksi näyttää ongelmakohdat ja jopa esittää tarvittavat parannusehdotukset vaaditulle tasolle pääsemiseksi. Tämän kaltainen suunnittelu ja säätäminen on huomattavasti helpompaa ja halvempaa virtuaalisesti kohteen tietomallissa, kun valmiissa kohteessa jälkikäteen.

Luvussa neljä (luku 4.2, s. 72) sekä **julkaisussa III** esitellään eräs toteuttamamme pilotointi, jossa kauppakeskuksen pelillistetyn tietomallin, toiminnallisen suunnittelun menetelmän, monipelitekniikoiden, tekoälyn ja data-analytiikan avulla toteutetaan kauppakeskuksen hätäpoistumisen suunnittelu- ja simulointiympäristö. Pilotoinnissa toteutettu ympäristö mahdollistaa myös mm. pelastushenkilöstön yhteistoiminnan harjoittelun erilaisissa ennalta määritellyissä hätäskenaarioissa.

Uskon tulevaisuuden tuovan menetelmälle vielä aivan uusia käyttökohteita, joita emme vielä osaa edes kuvitella. Menetelmä tuo tietomallipohjaiseen suunnitteluun uuden toiminnallisen suunnittelun elementin, joka auttaa suunnittelijoita paremmin ja hyvin aikaisessa suunnittelun vaiheessa huomioimaan suunniteltavassa kohteessa tapahtuvan toiminnallisuuden. Menetelmä perustuu todellisesta toiminnasta saatuihin tilantarpeisiin, joten menetelmän tuottamat IFC 3D -tilaobjektit vastaavat todellisuutta hyvin. Menetelmä auttaa suunnittelijoita suunnittelemaan käyttötarkoitukseensa paremmin soveltuvia rakennuksia ja muita kohteita.

3.1 AIHEPIIRIIN LIITTYVIÄ AIKAISEMPIA TUTKIMUKSIA

Kirjallisuustarkastelussa kävi melko selvästi ilmi, että keksimäni toiminnallisen suunnittelun menetelmän kaltaisista yleisistä menetelmistä minkä tahansa toiminnallisuuden vaatiman tilantarpeen mitoittamiseksi ei juurikaan ole tutkimustietoa saatavilla. Sen sijaan ihmisten suorittamien toimintojen analysointiin ja erilaiseen huomioimiseen suunnittelussa esimerkiksi kuvien, videoiden tai muun datan avulla löytyi jonkin verran tutkimustietoa. Lisäksi on havaittavissa, että rakennusala ja tutkijat ovat huomanneet nykyiset rakennussuunnittelun ongelmat ja niihin liittyviä tutkimushankkeita on vireillä. Meneillään näyttäisi olevan useampiakin tutkimushankkeita, joiden tarkoituksena on kehittää menetelmiä ja tekniikoita ottaa ihmisten läsnäolo ja toiminnallisuus nykyistä paremmin huomioon jo heti suunnittelun alkuvaiheesta lähtien. Menetelmien keskeisenä tavoitteena on yleensä myös parantaa vuorovaikutusta kohteen käyttäjien ja suunnittelijoiden välillä. Usein kyse on ergonomiaan ja/tai sen parantamiseen liittyvistä tutkimuksista.

Vaikka nämä tutkimukset eivät aivan suoranaisesti liitykään keksimäni toiminnallisen suunnittelun menetelmän ideaan tai kehittämäämme prosessiin, niin yhtäläisyyksiä niiden välillä on kuitenkin löydettävissä paljonkin. Myös päämäärä on molemmissa sama, eli parantaa tietomallipohjaisen rakennussuunnittelun laatua ottamalla rakennuksessa tapahtuva toiminnallisuus suunnitteluun mukaan nykyistä paremmin jo heti suunnittelun alusta lähtien. Myös keskeisenä tavoitteena on käyttäjien ottaminen mukaan suunnitteluun nykyistä paremmin. Osa kuvatuista menetelmistä soveltuu soveltaen myös toimintojen tilantarpeiden

mitoitukseen ja osaa voisi käyttää toiminnallisen suunnittelun menetelmää apuna etsittäessä esimerkiksi videokuvista toimintojen suurimpia tilantarpeita. Seuraavassa lyhyt kuvaus näistä kirjallisuustarkastelussa löytämistäni tutkimuksista.

Shen, Shen & Sun (2012) esittelevät kehittämänsä tietomallinnukseen perustuvan kehyksen (framework), jonka he ovat nimenneet käyttäjätoiminnan simulointi- ja arviointimenetelmäksi (UASEM = User Activity Simulation and Evaluation Method). Menetelmän tarkoituksena on arvioida rakennuksen käytettävyyttä ja käyttöastetta ihmisten toiminnallisuuden näkökulmasta jo suunnitteluvaiheessa ja tarjota myös rakennuksen käyttäjille nykyistä paremmat mahdollisuudet olla vuorovaikutuksessa suunnittelijoiden kanssa ja osallistua suunnitteluun jo heti suunnitteluprosessin alusta lähtien.

Samaan aiheeseen liittyen Shen, Zhang, Shen & Fernando (2013) esittelevät julkaisussaan, että suunnittelijoiden ja käyttäjien välisen vuorovaikutuksen tulisi olla jatkuvaa jo heti suunnittelun alussa, kun tehdään esiselvityksiä ja arkkitehtisuunnittelua. Heidän mielestään ongelmana on kuitenkin yleensä käyttäjien puutteellinen kapasiteetti ymmärtää rakennustekniikkaa riittävästi tai lukea rakennusteknisiä piirustuksia ja muita dokumentteja. He esittelevätkin tämän vuorovaikutuksen tehostamiseksi menetelmän nimeltään UPOEM (A User Pre-Occupancy Evaluation Method). Menetelmässä yhdistetään tietomallinnusta, rakennuksessa tapahtuvan toiminnan simulointia ja vaatimustenhallintatekniikoita. He tulivat tutkimuksessaan siihen tulokseen, että UPOEM-menetelmä parantaa suunnittelijoiden ja käyttäjien välistä vuorovaikutusta. Lisäksi menetelmä parantaa käyttäjien ymmärrystä rakentamisesta ja tätä kautta myös lisää käyttäjien halukkuutta osallistua aktiivisemmin rakennussuunnitteluun.

Mastrolembo Ventura, Simeone, Ghelfi, Oliveri & Ciribini (2016) esittävät myös rakennuksen tietomallin pelillistämistä rakennussuunnitelmien havainnollisuuden parantamiseksi rakennuksen loppukäyttäjille ja tätä kautta päätöksentekoprosessien tukemiseksi. Heidän mukaansa pelillistämisen avulla rakennuksen loppukäyttäjät saadaan paremmin ja aktiivisemmin osallistumaan suunnitteluun ja vaatimusten määrittelyyn jo heti suunnittelun alkuvaiheessa. Heidän mielestään tietomallin pelillistäminen mahdollistaa myös rakennuksen ja loppukäyttäjän välisen vuorovaikutuksen simuloimisen. Heidän näkemyksensä mukaan juuri rakennuksen toiminnallisuus ja se, että tehdyt ratkaisut vastaavat käyttäjien tarpeisiin, on ensiarvoisen tärkeää. He toteuttivat myös käytännön simulaatioita pelillistetyn tietomallin avulla.

Myös Mitarakis ja Kapogiannis (2016) nostavat esille tarpeen parantaa rakennusprojekteissa eri toimijoiden välistä yhteistyötä. He nostavat esiin tietomallinnuksen, Lean-ajattelun sekä pelillistämisen. Heidän mielestään

rakennusprojektien parantaminen vaatii kaikkien osapuolten mahdollisimman hyvää yhteistyötä ja riittävää ymmärrystä asioista. He esittävät erääksi keinoksi pelillistämisen ja sen tuoman paremman havainnollisuuden, jolloin projektin eri osapuolet on helpompi saada ymmärtämään toisiaan. Heidän mukaansa pelillistämällä voidaan parantaa mm. eri tahojen sitoutumista projektiin, sekä toimijoiden välistä yhteistyötä ja viestintää. Tämä saavutetaan mm. pelillistämisen tuoman paremman havainnollisuuden ja ymmärtämisen kautta. Tutkijoiden mielestä asiasta ei kuitenkaan vielä ole riittävästi tutkimustietoa ja sitä pitää tutkia lisää.

Erään menetelmän esittelevät Yousefi, Kondori & Li (2011) julkaisussaan. Heidän esittämässään menetelmässä samasta kohteesta otetut useat 2D stillkuvat tai videot voidaan muuntaa 3D-muotoon. Kyse ei kuitenkaan ole toiminnallisen suunnittelun menetelmän kaltaisesta menetelmästä, mutta heidän menetelmänsä voitaisiin mahdollisesti soveltaa yhdessä toiminnallisen suunnittelun menetelmän kanssa 3D-tilaobjektien automaattisempaan mitoitukseen ja määrittelyyn. Myös Shinde ja Jadhav (2012) esittelevät tutkimuksen, jossa hitsaustyöaseman ergonomiaa pyrittiin analysoimaan ja parantamaan tunnistamalla liikkeitä toiminnasta kuvatuista videoista. Tämäkin tutkimus on idealtaan samansuuntainen toiminnallisen suunnittelun menetelmän kanssa, vaikka siinä ei toiminnan suurinta tilantarvetta etsitäkään. Periaatteessa tässä tutkimuksessa esitettyä menetelmää voitaisiin laajentaa myös etsimään kuvattujen liikkeiden tilantarpeita.

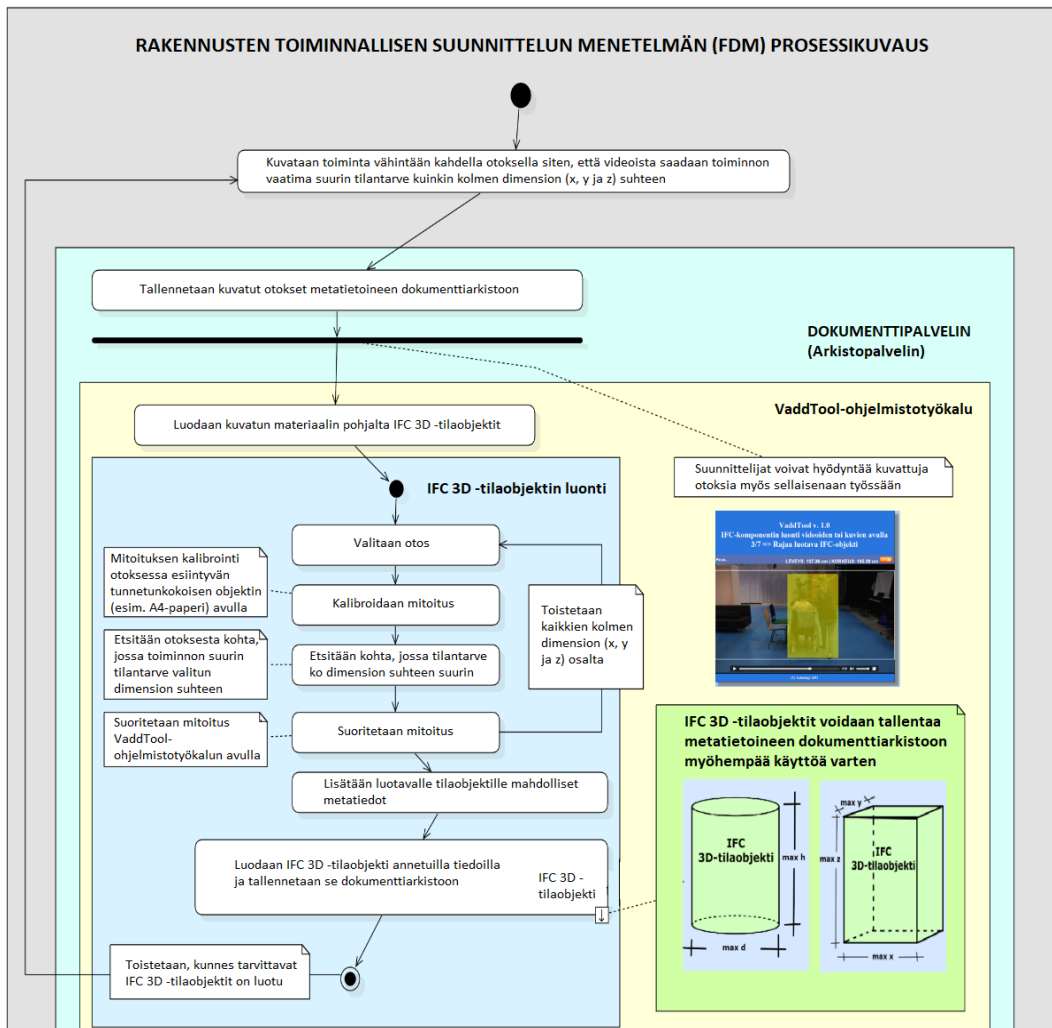
Mavrikios, Karabatsou, Alexopoulos, Pappas, Gogos & Chryssolouris (2006) kuvasivat menetelmän, jonka avulla pyritään mallintamaan ihmisen liikkeitä esimerkiksi ergonomian näkökulmasta. Tämä tutkimus on tehty hyödyntämään ensisijaisesti autoteollisuuden tarpeita parantaa autojen ergonomiaa, mutta sitä voitaisiin soveltaa myös muille alueille. Kim & Hilton (2013) esittelevät menetelmän, jossa erikoiskameroilla otetusta pallomaisista stereokuvista voidaan laskea erilaisia kolmiulotteisia malleja. Tämäkin menetelmä voisi soveltua jollain tavalla myös erilaisten toimintojen tilantarpeiden määrittämiseen joko erikseen tai yhdessä toiminnallisen suunnittelun menetelmän kuvaamien ideoiden kanssa. Kakadiaris & Metaxas (1995) esittelevät menetelmän, jossa esimerkiksi 2D siluettikuvissa tapahtuvia muutoksia hyödyntäen tunnistetaan ihmisen kehon osat ja niiden liikkeet. Tätä kautta voidaan muodostaa liikkeiden 3D-malleja. Periaatteessa tämä menetelmä voisi soveltua myös toiminnallisen suunnittelun menetelmän tavoin ihmisen toiminnan suurimman tilantarpeen määrittämiseen kolmiulotteisessa avaruudessa. Jos esimerkiksi kunkin dimension (x, y ja z) suhteen yhdistetään hahmoa kuvaavien siluettien pinta-alat, niin saadaan kuvio, jonka reunat kuvaavat toiminnan suurinta tilantarvetta eri dimensioiden suhteen.

3.2 MENETELMÄN TAUSTAA JA PERUSIDEA

Toiminnallisen suunnittelun menetelmä perustuu tekemääni työsuhdekeksintöön Mikkelin ammattikorkeakoulussa vuonna 2013. Keksinnölle on myönnetty patentti sekä Suomessa, että USA:ssa (Selin, 2016; Selin, 2019). Menetelmällä ja sen soveltamisella on ja tulee olemaan keskeinen rooli useissa rakennusalan TKI-hankkeissamme, joita olemme toteuttaneet ja tulemme toteuttamaan yhdessä rakennusalan yhteistyökumppaneidemme kanssa.

Toteutimme ensimmäisenä aiheeseen liittyvänä TKI-hankkeenamme vuosina 2013-2014 silloisen Mikkelin Ammattikorkeakoulun (nykyinen Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu eli XAMK) koordinoimana hankkeen nimellä VAddD (Value Add Data). VAddD-hankkeessa tutkittiin ensisijaisesti keksintöni markkinapotentiaalia. Lisäksi suunnittelin ja kehitin hankkeen aikana VaddTool-ohjelmistotyökalun prototyypin selaimella käytettävänä verkkopalveluna. Ohjelmistotyökalun prototyyppi sisältää mm. toiminnallisen suunnittelun menetelmän mukaisten IFC 3D -tilaobjektien luontiin tarvittavat työkalut, sekä oman dokumenttipalvelimen IFC 3D -tilaobjektien ja rakennusdokumenttien tallennukseen, ylläpitoon, jakeluun ja arkistointiin. Rakennusliike U. Lipsanen Oy pilotoi toiminnallisen suunnittelun menetelmää ja toteuttamaani VaddTool-ohjelmistotyökalun prototyyppiä omassa rakennushankkeessaan. Pilotointi onnistui odotusten mukaisesti ja se tuotti mm. joukon erilaisia kehitysehdotuksia koskien niin toiminnallisen suunnittelun menetelmän hyödyntämistä, kuin myös itse VaddTool-ohjelmistotyökalua ja siihen liittyvää verkkopalvelua. Saamiemme tulosten ja kehitysehdotusten pohjalta olemme keskittyneet jatkohankkeissamme kehittämään toiminnallisen suunnittelun menetelmän hyödyntämistä yhdessä rakennuksen pelillistetyn tietomallin kanssa erilaisissa käyttökohteissa. Toiminnallisen suunnittelun menetelmää on myös suunniteltu tarjottavaksi tulevaisuudessa buildingSMART-yhteistyöfoorumille Open BIM -standardien mahdolliseksi laajennukseksi.

Kuvio 15 havainnollistaa toiminnallisen suunnittelun menetelmää ja menetelmän mukaista prosessia alkaen todellisen toiminnan kuvaamisesta ja päätyen toiminnan suurinta tilantarvetta kuvaaviin IFC 3D -tilaobjekteihin, joita voidaan hyödyntää suoraan tai välillisesti tietomallipohjaisessa rakennussuunnittelussa.



Kuvio 15. Toiminnallisen suunnittelun menetelmä ja prosessi (Julkaisut I ja II).

Toiminnallisen suunnittelun menetelmän perusajatuksena on kuvata todellista toimintaa (esim. pyörätuolin käyttäjän erilaiset toiminnot yksin ja avustajien kanssa) videolle (tai stillkuviksi) siten, että kuvattuun materiaaliin sisältyy kunkin toiminnon suurin tilantarve eri dimensioiden (x, y ja z) suhteen. Tämä onnistuu parhaiten kuvaamalla toimintoa vähintään kahdella kameralla, jotka on sijoitettu siten, että kohteesta saadaan kuvattua kaikki ulottuvuudet johonkin otokseen mukaan. Minimissään tarvitaan kaksi otosta, joissa kamerat ovat kohtalaisella (silmämääräisellä) tarkkuudella suorassa kulmassa toisiinsa nähden. Otoksia ei tarvitse välttämättä ottaa samanaikaisesti, jos kuvattava toiminta pystytään toistamaan riittävän tarkasti. Kuvien kalibrointi oikeaan mittakaavaan voidaan hoitaa esimerkiksi siten, että samassa otoksessa toiminnan kanssa (ja suunnilleen samalla etäisyydellä) esiintyy mitta tai jokin muu elementti (esim. pyörätuolin rengas), jonka mitat eri dimensioiden suhteen tunnetaan. Otoksista etsitään manuaalisesti tai automaattisesti ne kohdat, joissa toiminta kyseisen dimension suhteen vaatii eniten tilaa. VaddTool-ohjelmistotyökalun prototyyppi tukee tässä vaiheessa ainoastaan manuaalista etsintää. Jatkossa etsintää voidaan mahdollisesti automatisoida hyödyntäen esimerkiksi hahmontunnistusta

ja/tai liikekaappausta. Etsittyjen tilantarpeiden maksimikohtien ja kuvassa esiintyvän mittatiedon perusteella saadaan laskettua toiminnon vaatima suurin tilantarve eri dimensioiden suhteen riittävällä tarkkuudella.

Menetelmän avulla saadaan todellisen toiminnan perusteella mitoitettua toiminnan vaatima suurin tilantarve ja tarvittaessa luotua mitoituksen perusteella tätä suurinta tilantarvetta kuvaava 3D-tilaobjekti. 3D-tilaobjekti sisältää valitun toiminnallisuuden (esim. pyörätuolin kääntyminen tulosuuntaansa yhden avustajan kanssa) vaatiman tilan tilanteessa, jossa tilantarve on suurimmillaan.

Näin saatu 3D-tilaobjekti voidaan tallentaa missä tahansa käytetyn suunnitteluohjelmiston tukemassa tallennusformaattissa ja tällä tavoin objekti voidaan tuoda periaatteessa mihin tahansa suunnitteluohjelmistoon. 3D-tilaobjektin avulla voidaan suunnitteluohjelmistossa testata suoraan kyseisen toiminnallisuuden mahtumista suunniteltaviin tiloihin. Testaaminen voidaan tehdä käsityönä tai automatisoidusti käytetyn suunnitteluohjelmiston ominaisuuksista riippuen.

Menetelmän avulla voidaan myös testata käänteisesti jonkin kohteen ulottuvuutta. Esimerkkinä voisi olla testi, jossa halutaan palvelutalossa selvittää ylettääkö asukas tiettyihin kohteisiin (esim. keittiön yläkaappeihin). Tällöin 3D-tilaobjekti sisältää tietoja ihmisen ulottuvuuksista eri dimensioiden suhteen. Mikäli 3D-tilaobjekti leikkaa yläkaappia riittävästi, niin myös asukas ylettää kaappeihin riittävällä ulottuvuudella. Vastaavasti voitaisiin etsiä esimerkiksi torninosturille optimaalinen sijoituspaikka rakennustyömaalla siten, että nosturi ylittää riittävällä nostovoimalla tarpeellisiin kohteisiin. Tällöin 3D-tilaobjektit sisältäisivät torninosturin suurimpia ulottuvuuksia erilaisilla nostovoimilla eri dimensioiden suhteen. Vain mielikuvitus on oikeastaan rajana sille, mihin ja miten toiminnallisen suunnittelun menetelmää voidaan soveltaa.

Kun 3D-tilaobjektit tallennetaan IFC-standardin mukaisessa formaatissa, saadaan toiminnallisen suunnittelun menetelmästä yhteensopiva Open BIM -standardien kanssa. Näin saadut IFC 3D -tilaobjektit voidaan tuoda kaikkiin IFC-standardia tukeviin suunnitteluohjelmistoihin ja niitä voidaan hyödyntää kaikenlaisessa rakennusten toiminnallisessa suunnittelussa. IFC-standardin käyttö 3D-tilaobjektien tallennusformaattina tekee toiminnallisen suunnittelun menetelmästä täysin BIM- ja Open BIM -yhteensopivan. IFC-standardin käyttö varmistaa menetelmän BIM- / Open BIM -yhteensopivuuden kaikkien standardien suunnitteluohjelmistojen kanssa myöskin tulevaisuudessa (luku 2.2, s. 25).

3.3 VADDTOOL-OHJELMISTOTYÖKALUN PROTOTYYPPI

Kuvio 15 havainnollistaa toiminnallisen suunnittelun menetelmän ideaa ja menetelmään kuuluvan prosessin etenemistä. Kaaviosta käy myös ilmi, kuinka VaddTool-ohjelmistotyökalun prototyyppi tukee keksintööni perustuvan toiminnallisen suunnittelun menetelmän mukaista toiminnallisuutta, sekä menetelmän mukaista prosessia eri toimintojen vaatiman suurimman tilantarpeen selvittämiseksi ja tilantarvetta kuvaavien IFC 3D -tilaobjektien luomiseksi. Lisäksi VaddTool-ohjelmistotyökalun prototyyppi tarjoaa verkkopalveluna valmiin alustan toiminnallisen suunnittelun menetelmän lähtötietoina käytettävien, toimintaa kuvaavien videoiden ja/tai stillkuvien, sekä ohjelmistotyökalun tuottamien IFC 3D -tilaobjektien tallennukseen, hallinnointiin, jakeluun ja arkistointiin koko rakennuskohteen elinkaaren ajalle.

VaddTool-ohjelmistotyökalun prototyyppi ei ota kantaa siihen, miten sen avulla luotuja IFC 3D -tilaobjekteja käytetään suunnittelussa. Myöskään itse menetelmä ei rajoitu tiettyihin käyttökohteisiin tai käyttötapoihin, vaan tarjoaa yleiskäyttöisen menetelmän tuottaa minkä tahansa toiminnan suurinta tilantarvetta kuvaavia 3D-tilaobjekteja. Menetelmää ja sen tuottamia tilaobjekteja voi kukin käyttäjätaho soveltaa haluamallaan tavalla. VaddTool-ohjelmistotyökalun prototyypin tarjoama prosessi ja prosessin tuotoksena saatavat IFC-standardin mukaiset IFC 3D -tilaobjektit ovat vain yksi toiminnallisen suunnittelun menetelmän implementaatio. Samoin tässä väitöskirjassa esille nostetut IFC 3D -tilaobjektien käyttötavat edustavat vain muutamia tapoja hyödyntää menetelmää rakennusten toiminnallisessa suunnittelussa.

VaddTool-ohjelmistotyökalun prototyyppi on toteutettu siten, että toiminnallisen suunnittelun menetelmään oleellisena osana kuuluva prosessi IFC 3D -tilaobjektien tuottamiseksi tulisi työkalun käytössä selkeästi esille. Tästä syystä ohjelmistotyökaluun on toteutettu ohjattu lähestymistapa, joka opastaa käyttäjää etenemään vaihe vaiheelta prosessin mukaisesti alkaen toiminnasta kuvattujen otosten hausta dokumenttiarkistosta ja päätyen valmiiden tilantarvetta kuvaavien IFC 3D -tilaobjektien tallentamiseen metatietoineen dokumenttiarkistoon.

Kuviot 16-20 (luku 3.3, s. 59) havainnollistavat VaddTool-ohjelmistotyökalun prototyypin käyttöä tilanteessa, jossa todellisesta toiminnasta kuvatusta videosta ollaan luomassa työkalun avulla toiminnan suurinta tilantarvetta kuvaavaa 3D IFC -tilaobjektia. Mitoituksen perustana oleva toimintaa kuvaava video on kuvattu tilanteesta, jossa avustaja auttaa pyörätuolilla liikkuvaa henkilöä kenkien jalkaan laittamisessa tai niiden pois ottamisessa. Tällainen toiminto olisi tarpeen mahtua suorittamaan esimerkiksi suunniteltavan rakennuksen eteis- tai käytävätiloissa.

Tässä esimerkissä mitoituksen kalibrointi on hoidettu kuvaamalla videon alkuun kohdetta, jonka mitat tiedetään riittävällä tarkkuudella. Tunnettuna kohteena on tässä kuvattu A4-paperiarkkia suunnilleen samalta etäisyydeltä varsinaisen toiminnan kanssa. A4-kokoisen paperiarkin tunnettujen mittojen (leveys ja korkeus) avulla voidaan kalibroida otoksen mittakaava kohdalleen ja laskea kuvatus toiminnon vaatima todellinen tila valittujen dimensioiden suhteen. Käytännössä kaikki kolme dimensiota (x, y ja z) vaativat oman erillisen mitoituksensa. Esimerkiksi mitoitettavan toiminnon x- ja y-suuntaisen tilantarpeen maksimi tuskin esiintyy samassa videon pysäytyskuvassa, vaikka ne samasta videosta löytyisivätkin. Eli mitoitus täytyy yleensä tehdä kolmessa vaiheessa kunkin dimension osalta erikseen.

Vaikka VaddTool-ohjelmistotyökalun prototyypin avulla toiminnon tilantarve mitoitetaan yleensä yksi dimensio kerrallaan, niin mitoituksen helpottamiseksi mitoitus tehdään suorakaiteen muotoisen mitoitustyökalun avulla. Seuraavassa kuvassa (**Kuvio 16**) ollaan ohjelmistotyökalun käytössä tilanteessa, jossa mitoitettavasta toiminnosta kuvatut videot ovat tallennettuina metatietoineen ohjelmistotyökalun sisältämälle dokumenttipalvelimelle. Suunnittelijat voivat tässä tapauksessa katsella toimintoja esittäviä videoita VaddTool-ohjelmistotyökalun prototyypin tarjoamalla välineillä sellaisenaan. Vaihtoehtoisesti videoita hyödyntäen voidaan luoda niiden esittämien toimintojen suurimpia tilantarpeita kuvaavia IFC 3D -tilaobjekteja käyttäen apuna VaddTool-ohjelmistotyökalun prototyypin sisältämiä ohjattuja toimintoja.

VaddTool v 0.6
Dokumenttien haku arkistosta

Paluu... Näytä

ID	OTSIKKO	KUVAUS
74	Video 4	Pyörätuoli yhden avustajan kanssa / Avustetaan sivusta / O 4 / Kuvattu sivusta
73	Video 3	Pyörätuoli yhden avustajan kanssa / Avustetaan sivusta / O 3 / Kuvattu takaa
72	Video 2	Pyörätuoli yhden avustajan kanssa / Avustaminen kenkien kanssa / Oros 2 / Kuvattu takaa
71	Video1	Pyörätuoli yhden avustajan kanssa / Avustaminen kenkien kanssa / Oros 1 / Kuvattu sivusta

Suunnittelutimi video

Kuvio 16. Mitoitusvideo kuvattuna toiminnasta, jossa avustaja auttaa pyörätuolilla liikkuvaa henkilöä kenkien laitossa tai niiden pois ottamisessa. Video on tallennettu VaddTool-ohjelmistotyökalun sisältämälle dokumenttipalvelimelle.

Kuviossa 17 on aloitettu IFC 3D -tilaobjektin luominen VaddTool-ohjelmistotyökalun prototyypin ohjatun luontitoiminnon avulla ja ollaan tilanteessa, jossa mittatyökalun avulla kalibroidaan valitun dimension mitoitus kohdilleen. Mitoitus tapahtuu yhden senttimetrin tarkkuudella hyödyntäen videossa esiintyvää tunnetun kokoista objektiä (tässä esimerkissä A4-kokoinen paperiarkki).

Ohjelmistotyökalun prototyypissä käyttäjällä on käytössään työkalut, joiden avulla hän voi määrittellä kalibrointiin käytettävän mitan. Käyttäjän valitsema mitta näkyy kuvassa A4-paperiarkin levyisenä mittaviivana. Koska kalibroinnissa käytettävän objektin täytyy olla sellainen, että sen mitat tunnetaan (tässä A4-paperiarkki), niin käyttäjä voi pysäytyskuvaan tekemänsä graafisen määrittelyn jälkeen antaa syöttökenttään määrittelyään vastaavan tarkan mitta-arvon. Näiden tietojen perusteella VaddTool-ohjelmistotyökalun prototyyppi pystyy kalibroimaan mitoituksen siten, että kun käyttäjä prosessin seuraavassa vaiheessa määrittelee saman videon perusteella videon esittämän toiminnan suurimman tilantarpeen valitsemansa dimension suhteen, niin tilantarpeen mitoitus menee riittävällä tarkkuudella oikein.

Käytännön pilotoinneissa olemme huomanneet, että mitoituksen tarkkuus on muutama senttimetri. Se on mielestämme riittävä tarkkuus tämäntyyppiseen tilantarpeen mitoituksen. Mitoituksen voi halutessaan tehdä myös siten, että jättää jo mitoitusvaiheessa 3D-tilaobjektiin hieman toleranssia joka suuntaan.



Kuvio 17. Kuvassa ollaan kalibroimassa erään dimension mitoitusta A4-paperiarkista otetun videokuvan avulla (A4-paperiarkin leveys on 21 cm).

Kalibroinnin jälkeen etsitään videosta kohta, jossa kuvatun toiminnon valitun dimension suuntainen suurin tilantarve esiintyy. VaddTool-ohjelmistotyökalun prototyypissä etsiminen on vielä suoritettava käsin, mutta ehkä tulvaisuudessa apuna käytetään hahmontunnistusta suoraan videosta tai stillkuvasta. Myös peliteknologioista tutun liikekaappauksen käyttö on toiminnallisen suunnittelun menetelmän kanssa mahdollista.

Kuviossa 18 mitoituksen kohteena on syvyysuuntainen ulottuvuus. Kuten edellä jo tuli esille, niin mitoitus tapahtuu yleensä aina yksi dimensio kerrallaan. On lähes mahdotonta, että kahden dimension maksimi sattuisi samaan pysäytyskuvaan, ellei sitten kyse ole staattisesta kohteesta toiminnan sijaan. Mitoitus vaatii siis yleensä aina kolme erillistä vaihetta. Käytettävyyden parantamiseksi mitoitustyökalulla piirretään suorakaiteen muotoisia mitoituskuvioita.



Kuvio 18. Kuvassa mitoitetaan valitun toiminnon syvyysuuntaista tilantarvetta, joka näyttäisi tässä mitoituksen vaiheessa olevan hieman yli 160 cm. Korkeussuuntainen mittalukema on tässä vain apuna, eikä sillä ole merkitystä mitoituksen kannalta.

Kun toiminnallisuus on saatu mitoitettua kaikkien kolmen dimension suhteen, näyttää VaddTool-ohjelmistotyökalun prototyyppi vielä yhteenvedon ja kysyy kohteen metatiedot. Tämän jälkeen ohjelmistotyökalu luo annettujen tietojen pohjalta valmiin IFC 3D -tilaobjektin ja tallentaa sen automaattisesti annettujen metatietojen kanssa

VaddTool-ohjelmistotyökalun tarjoamalle dokumenttipalvelimelle jatkokäyttöä varten.

Seuraavassa kuvassa (**kuvio 19**) toiminnan vaatima tilantarve on mitattu ohjelmistotyökalun avulla ja ollaan antamassa luotavan IFC 3D -tilaobjektin metatietoja. Myöskin mitoitusprosessin tuloksena saadut toiminnon vaatimat suurimmat tilantarpeet eri dimensioiden suhteen ovat nähtävillä ja niihin voidaan vielä tehdä tarvittaessa muutoksia käsin ennen IFC 3D -tilaobjektin luomista.

VaddTool v 0.6
IFC-komponentin luonti
7/7 => IFC-komponentin mitat ja tiedot

Paluu...

IFC-komponentin mitat :

Leveys (cm) : 150 ▾ Korkeus (cm) : 191 ▾ Syvyys (cm) : 151 ▾

IFC-komponentin otsikko:

Pyörätuoli avsutajan kanssa 1

IFC-komponentin kuvaus:

Pyörätuoli + yksi avustaja
Toiminto 1 : Kenkien laitto ja pois ottaminen

IFC-komponentin tekijä:

Jukka Selin

Keskustelalueen linkki:

Luo IFC-komponentti >>

Kuvio 19. IFC 3D -tilaobjektin luomiseen tarvittavat tiedot on saatu mitoitetusta ja ollaan syöttämässä kohteen metatietoja ennen IFC 3D -tilaobjektin luomista.

Seuraavassa kuvassa (**kuvio 20**) toiminnan vaatimasta suurimmasta tilantarpeesta on luotu VaddTool-ohjelmistotyökalun prototyypin avulla IFC-standardin versioiden IFC 2x3 ja ifcXML 2x3 mukaiset IFC 3D -tilaobjektit. Ohjelmistotyökalu on paketoinut molemmat IFC-tiedostot yhteen pakattuun tiedostoon (ZIP-paketti) ja tallentanut paketin metatietoineen sisältämälleen dokumenttipalvelimelle. Suunnittelijat voivat ladata paketin itselleen ja hyödyntää sen sisältämiä IFC 3D -tilaobjekteja haluamallaan tavalla. Tilaobjektien käyttöön toiminnallisen suunnittelun menetelmä ei ota kantaa.

VaddTool-ohjelmistotyökalun prototyyppi sisältää valmiin rajapinnan, jonka kautta se voi keskustella myös muiden tietojärjestelmien kanssa ja tarjota esimerkiksi muille tietojärjestelmille mahdollisuuden päästä

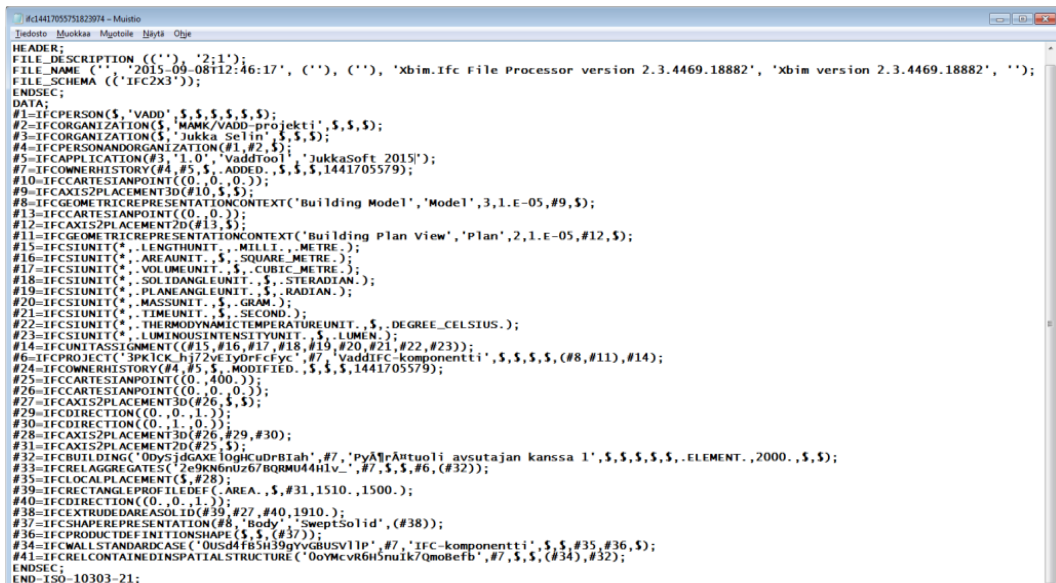
dokumenttipalvelimella oleviin IFC 3D -tilaobjekteihin ja muihin mahdollisiin dokumentteihin käsiksi.

VadTool-ohjelmistotyökalun prototyyppi pystyy rajapinnan kautta lähettämään IFC 3D -tilaobjekteja tai muita dokumentteja esimerkiksi ulkoisille arkistopalvelimille. Edellytyksenä tälle on tietenkin, että arkistopalvelimista löytyy tarvittavat rajapinnat tietojen vastaanottamiseksi.



Kuvio 20. IFC 3D -tilaobjektipaketti on haettu VaddTool-ohjelmistotyökalun prototyypin sisältämältä dokumenttipalvelimelta tarkasteltavaksi.

Suunnittelija voi ladata objektipaketin ja käyttää paketissa olevia IFC 3D -tilaobjekteja toiminnallisen suunnittelunsa apuvälineenä haluamallaan tavalla. Kuviossa 21 on edellä luotu IFC 2x3 -version mukainen IFC 3D -tilaobjekti avattuna tekstieditoriin.



Kuvio 21. Edellä luomamme IFC 3D -tilaobjekti IFC 2x3 -formaattissa avattuna tekstieditoriin.

Kuviossa 22 edellä luotu IFC 3D -tilaobjekti on vielä ifcXML 2x3 -standardin mukaisessa XML-pohjaisessa tallennusformaattissa avattuna tekstieditoriin. XML-standardin mukainen esitysmuoto on IFC 2x3 esitysmuotoa pidempi, joten kuvassa ei näy objektin koodi aivan kokonaisuudessaan, mutta perusidea käy tästäkin varmasti ilmi.

```

<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<iso_10303_28 version="2.0" xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance" xmlns:xlink="http://www.w3.org/1999/xlink" xsi:schemaLocation="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance" >
  <iso_10303_28_header>
    <name />
    <time_stamp>2015-09-08T12:46:19</time_stamp>
    <author />
    <organization />
    <preprocessor_version>Xbim.Ifc File Processor version 2.3.4469.18882</preprocessor_version>
    <originating_system>Xbim version 2.3.4469.18882</originating_system>
    <documentation />
  </iso_10303_28_header>
  <uos id="uos_1" description="Xbim IfcXml Export" configuration="i_ifc2x3" edo="" xmlns:ex="urn:iso.org:standard:10303:part(28):version(2):xml" >
    <IfcProject id="i1">
      <GlobalId>3PKICK_hj72vElyDrFyc</GlobalId>
      <OwnerHistory>
        <IfcOwnerHistory id="i7">
          <OwningUsers>
            <IfcPersonAndOrganization id="i3">
              <ThePerson>
                <IfcPerson id="i1">
                  <familyName>VADD</familyName>
                </IfcPerson>
              </ThePerson>
              <TheOrganization>
                <IfcOrganization id="i2">
                  <name>MAMK/VADD-projekti</name>
                </IfcOrganization>
              </TheOrganization>
            </IfcPersonAndOrganization>
          </OwningUsers>
          <OwningApplication>
            <IfcApplication id="i4">
              <ApplicationDeveloper>
                <IfcOrganization id="i5">
                  <name>Jukka Selin</name>
                </IfcOrganization>
              </ApplicationDeveloper>
            </IfcApplication>
          </OwningApplication>
        </IfcOwnerHistory>
      </OwnerHistory>
    </IfcProject>
  </uos>
</IfcProject>

```

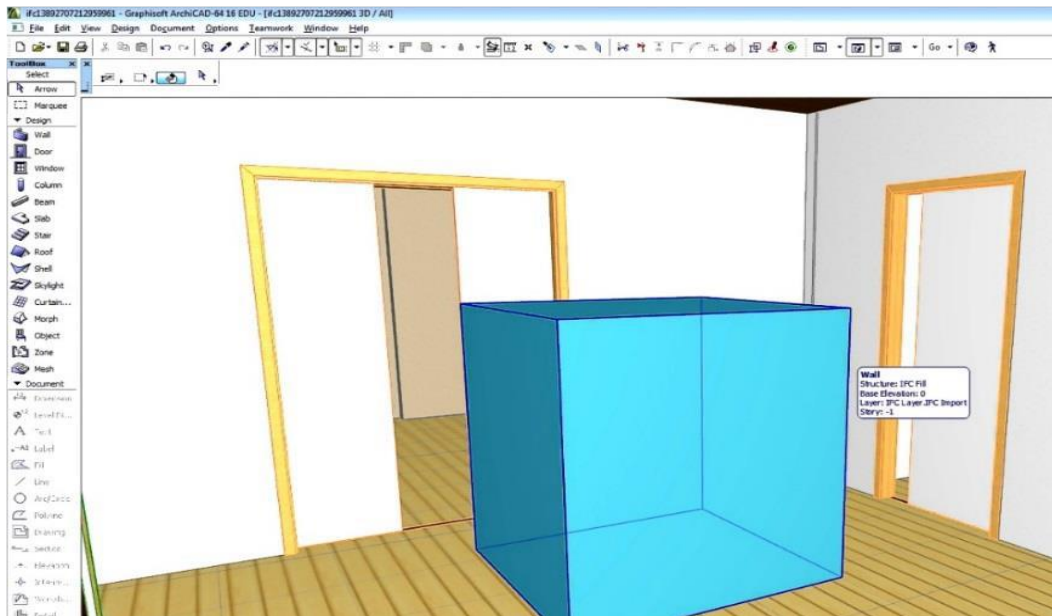
Kuvio 22. Edellä luomamme IFC 3D -tilaobjekti XML-pohjaisessa ifcXML 2x3 -formaattissa avattuna tekstieditoriin.

VadTool-ohjelmistotyökalun prototyyppi käyttää IFC 3D -tilaobjektien luomiseen avoimen lähdekoodin projektissa kehitettävää ja Open BIM -yhteensopivaa The xBIM Toolkit -ohjelmakirjastoa. Ohjelmakirjasto tarjoaa joukon yleiskäyttöisiä työkaluja IFC-standardin mukaisten objektien luomiseksi ja käsittelemiseksi. (The xBIM Toolkit, 2019.)

Menetelmän avulla luodut IFC 3D -tilaobjektit voidaan tuoda suoraan mihin tahansa BIM-yhteensopivaan suunnitteluohjelmistoon tai ne voidaan muuntaa myös tarvittaessa IFC-formaatista muihin formaatteihin, mikäli suunnittelijan käyttämä ohjelmisto ei tue IFC-standardia. **Kuviossa 23** on edellä luomamme nelikulmainen IFC 3D -tilaobjekti tuotuna arkkitehtien ja rakennussuunnittelijoiden yleisesti käyttämään ArchiCAD-suunnitteluohjelmistoon. 3D-tilaobjekti sisältää määrittelemämme toiminnan vaatiman suurimman mahdollisen tilantarpeen (luku 3.2, s. 56).

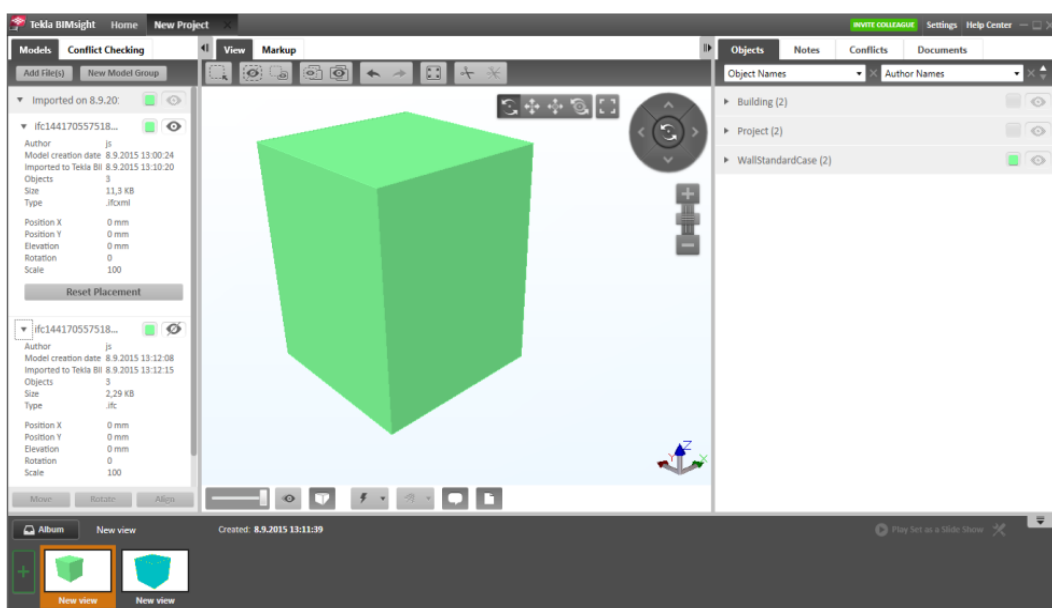
Jos 3D-tilaobjekti mahtuu johonkin suunniteltavaan tilaan, niin silloin tilaan mahtuu myös mitoituksen kohteena oleva toiminta täydessä laajuudessaan. Tilaobjektia voidaan siirrellä vapaasti suunnitteluohjelmistossa paikasta toiseen ja näin katsoa, että mitoitettava toiminta mahtuu kaikkiin niihin tiloihin, joihin sen kuuluu mahtua. Lisäksi muutamat suunnitteluohjelmistot tarjoavat jo työkaluja, joiden avulla mitoitusta voidaan automatisoida. Tämä voidaan tehdä esimerkiksi kiskottamalla kohde ja ajamalla eri toimintoja kuvaavilla 3D-tilaobjekteilla "kiskoja" pitkin, jolloin suunnitteluohjelmisto havaitsee automaattisesti törmäyskohdat, eli kohdat, joihin kyseinen toiminto ei

mahdu. Tämän kaltaista toiminnallisen suunnittelun menetelmän avulla tapahtuvaa tilojen analysointia ja mitoitusta olemme pilotoineet myös hankkeisiimme liittyen esimerkiksi rakennuksen esteettömyyteen ja hätäpoistumiseen liittyen. Näistä pilotoinneista ja pilotointien tuloksista kerrotaan tarkemmin väitöskirjan luvussa neljä (luku 4.1, s. 70; luku 4.2, s. 72), sekä **julkaisuissa I, II, III ja IV.**



Kuvio 23. Edellä luomamme IFC 3D -tilaobjekti tuotuna ArchiCAD-suunnitteluohjelmistoon.

Kuviossa 24 molemmat edellä luodut IFC 3D -tilaobjektit on tuotuna Tekla BIMsight -ohjelmistoon, joka on nykyään osa Trimble Connect -alustaa ja on tarkoitettu BIM-pohjaisten projektien yhteistyökaluksi (Tekla Oy, Trimble Connect -alustan verkkosivusto, 2019). Tätä työkalua käyttäen esimerkiksi hankkeidemme pääyhteistyökumppanina toimiva rakennusliike.



Kuvio 24. Aiemmin luomamme IFC 3D -tilaobjektit tuotuna Tekla BIMsight -yhteistyökaluun.

Käytännön pilotoinneissa on IFC 3D -tilaobjektien käytön lisäksi havaittu, että toimintaa kuvaavat videot ja stillkuvat toimivat jo sellaisenaan erinomaisina suunnittelun apuvälineinä varsinkin, jos ne ovat helposti ja keskitetysti suunnittelijoiden saatavilla. Suunnittelijat voivat niiden avulla saada pelkkiä mittatietoja paremman kuvan kohteessa tapahtuvan toiminnallisuuden todellisesta luonteesta varsinkin sellaisissa kohteissa, joissa tapahtuva toiminnallisuus ei ole aivan tavanomaista. Tällaisia tiloja voisivat olla esimerkiksi tuotantotilat ja erilaiset urheiluun tai vapaa-ajan viettoon tarkoitetut tilat.

3.4 MENETELMÄN MAHDOLLISIA SOVELLUSALUEITA

Toiminnallisen suunnittelun menetelmä ei ole valmis tuote, vaan se on yleiskäyttöinen menetelmä, joka tarjoaa työkalun ja prosessin minkä tahansa todellisuudessa tapahtuvan toiminnan suurimman tilantarpeen paketoimiseksi staattiseksi 3D-tilaobjektiksi. Mikäli 3D -tilaobjekti tallennetaan IFC-standardin kaltaiseen tallennusmuotoon, on menetelmän avulla tuotetut 3D-tilaobjektit yhteensopivia käytännössä kaikkien nykyisten ja suurella todennäköisyydellä myös tulevien standardin mukaisten suunnitteluohjelmien kanssa. Tästä pitänevät BIM- ja Open BIM -kehitys huolen pitkälle tulevaisuuteen.

Menetelmän käyttömahdollisuudet ovat laajat. Sen avulla voidaan minkä tahansa toiminnan tai jopa staattisen objektin vaatima tila vangita staattiseksi 3D-tilaobjektiksi mitä tahansa käyttötarkoitusta varten. Kuten jo aiemmin tuli ilmi (luku 3.2, s. 56), voidaan menetelmää käyttää myös käänteisesti, eli sen avulla voidaan esittää minkä tahansa objektin ulottuvuutta 3D-tilassa ja tätä kautta menetelmää voidaan hyödyntää myös kaikissa sellaisissa suunnittelutilanteissa, joissa halutaan varmistaa, että joku objekti (esim. ihminen, nosturi tai trukki) varmasti ulottuu johonkin kohteeseen. Tällöin ulottuvuutta kuvaavan 3D-tilaobjektin ja kohteen täytyy leikata riittävästi toisiaan. Tätä aihealuetta käsitellään myös **julkaisussa IV**.

Menetelmä soveltuu myös suoraan tai välillisesti pelillistetyn tietomallin sisältämien tilantarpeiden mitoitukseen erilaisissa käyttötilanteissa. Hyödynsimme toiminnallisen suunnittelun menetelmää yhdessä pelillistetyn tietomallin kanssa esimerkiksi pilotoidessamme rakennuksen esteettömyyttä pyörätuolilla liikkuvan henkilön näkökulmasta. Tällöin pyörätuolin ympärille luodut vaihdettavat törmäystunnisteet mitoitettiin toiminnallisen suunnittelun menetelmää ja VaddTool-ohjelmistotyökalun prototyyppiä hyödyntäen. Tästä pilotoinnista ja sen tuloksista löytyy tarkempi kuvaus luvusta neljä (luku 4.1, s. 70), sekä **julkaisusta I**.

Toinen menetelmän käyttöesimerkki yhdessä pelillistetyn tietomallin kanssa on pilotoimamme kauppakeskuksen hätäpoistumisen simulaatiot

ja niihin liittyvät analyysit. Näissä pilotoinneissa mitoitimme kauppakeskuksen profiloituille asiakkaille heidän profiiliensa mukaiset tilantarpeet (törmäystunnisteet) toiminnallisen suunnittelun menetelmää ja VaddTool-ohjelmistotyökalua hyödyntäen. Tästä pilotoinnista ja sen tuloksista löytyy tarkempi kuvaus luvusta neljä (luku 4.2, s. 72), sekä **julkaisuista II, III ja IV.**

Lisäksi pilotoimme pienimuotoisesti toiminnallisen suunnittelun menetelmän käyttöä yhdessä pelillistetyn tietomallin kanssa mm. lastausalueen mitoituksessa, tuotantotilojen mitoituksessa, sekä varaston mitoituksessa siten, että trucki pystyy siellä hyvin ja turvallisesti operoimaan. Näistäkin pilotoinneista ja niiden tuloksista löytyy tarkempi kuvaus **julkaisusta IV.**



4 Väitöskirjan julkaisuihin liittyvät pilotoinnit ja pilotointien tulokset

Tässä luvussa esitellään väitöskirjan julkaisuihin liittyvät pilotoinnit, sekä pilotointien keskeisimmät tulokset. Olemme TKI-hankkeissamme pilotoineet ja tutkineet useampiakin asioita, mutta rajaan käsittelyn tässä yhteydessä sellaisiin pilotointeihin ja tutkimuksiin, jotka liittyvät oleellisesti väitöskirjan julkaisuihin. Kaikki väitöskirjan julkaisut (**julkaisut I-X**) liittyvät seuraaviin hankkeisiin ja niissä toteutettuihin sovelluksiin sekä pilotointeihin.

Toteutimme hankkeisiin liittyen useita erilaisia pilotointeja yhdessä hankkeiden yhteistyökumppaneidemme kanssa. Pilotointien tarkoituksena oli testata eri hankkeissa kehittämiämme menetelmiä, prosesseja ja sovelluksia käytännössä. Pilotointien kohteet olivat yleensä yhteistyökumppaneidemme toteuttamia käytännön projekteja. Saimme pilotointien avulla arvokasta tutkimustietoa kehittämiemme menetelmien ja prosessien, sekä niihin liittyvien sovellusten toimivuudesta käytännössä. Pilotoinnit noudattivat pääsääntöisesti konstruktivisen tutkimusotteen ja suunnittelututkimuksen periaatteita. Toteutimme kaikkien pilotointien yhteydessä kehittämiemme konstruktioiden pohjalta yhden tai useamman käytännön artefaktin. Testasimme artefaktien avulla ideoitamme ja innovaatioitamme. Arvioimme (evaluoimme) tällä tavoin ideoitamme ja innovaatioitamme toimivuutta ja pohdimme samalla myös mahdollista jatkokehitystä. Arvioinnit suoritettiin laadullisella tutkimusotteella käyttäen tutkimusmenetelminä osallistuvaa havainnointia ja hankkeiden yhteistyökumppaneihin ja muihin toimijoihin kohdistettua avointa

haastattelua. Kolmen pilotoinnin yhteydessä käytettiin myös osallistujiin kohdistettua teemahaastattelua.

Avoimissa haastatteluissa käytettiin muutamaa ohjeellista ja yleisluontoista teemaa, joiden avulla pyrittiin lähinnä avaamaan keskustelu. Jokaiseen pilotointiin liittyvää haastattelua edelsi aina kyseisessä pilotoinnissa toteutetun artefaktin katselmus. Avointen haastattelujen teemana pilotoinnista riippumatta oli pilotoinnin aiheuttamat tuntemukset yleisesti. Lisäksi teemana oli artefaktin ja siihen liittyvän idean ja/tai innovaation käyttökelpoisuus, yleistettävyyys, sekä jatkokehitys. Pilotointien 1 ja 2 yhteydessä keskusteltiin myös keksimäni toiminnallisen suunnittelun menetelmän ja tietomallin pelillistämisen käyttökelpoisuudesta. Pilotointien 3 ja 4 yhteydessä keskusteltiin myös epälineaarisen tarinankerronnan menetelmien hyödyntämisestä ja suunnittelun joukkoistamisesta. Teemahaastatteluissa teemat liittyivät enemmän haastateltavien subjektiivisiin kokemuksiin ja näkemyksiin johtuen haastattelujen kohderyhmistä. Myös teemahaastattelujen haastateltavat olivat ennen haastattelua osallistuneet pilotointiin ja/tai käyttäneet kyseisessä pilotoinnissa luotua artefaktia. Teemahaastattelun keskeisimmät teemat olivat omat tuntemukset ja kokemukset pilotoinnista ja siitä saatavista hyödyistä. Myös jatkokehitys oli haastattelun teemana.

Tarkempi kuvaus tutkimusten toteutuksista, kohderyhmistä ja statistiikasta löytyy tästä luvusta kunkin pilotoinnin yhteydestä, sekä **luvusta 5** (s. 109). Samoista luvuista löytyy myös arviointia ja keskustelua tutkimusten tuloksista, tutkimusmenetelmien ja tulosten luotettavuudesta, sekä tulosten yleistettävyydestä.

Pilotoinnit on toteutettu vuosien 2015–2020 välisenä aikana ja ne liittyvät yhteensä neljään erilliseen TKI-hankkeeseemme. Hankkeiden yhteenlaskettu arvo on n. 2 milj. €. Kolme näistä TKI-hankkeista on rakennusalan kehityshankkeita. Ensimmäinen näistä hankkeista on Virrake (Virtuaalinen rakentaminen), jonka tavoitteena oli tutkia keksimäni toiminnallisen suunnittelun menetelmän (FDM) kaupallista potentiaalia. Lisäksi hankkeessa toteutettiin mm. VaddTool-ohjelmistotyökalun prototyyppi. Se mahdollistaa toiminnallisen suunnittelun menetelmän mukaisten IFC 3D -tilaobjektien luonnin, ylläpidon ja arkistoinnin. Toinen hanke oli nimeltään RedHal (Rakennuksen elinkaaren aikaisen datan hallinta) ja siinä keskityttiin kehittämään tietomallin pelillistämiseen liittyviä menetelmiä ja prosesseja. Lisäksi hankkeen osana toteutettiin RedHal-mobiilisovelluksen prototyyppi Android-laitteille. RedHal-sovelluksen prototyyppiä ei esitellä tässä väitöskirjassa tarkemmin. Syynä tähän on, että sovelluksen oikeudet omistaa tällä hetkellä Rakennusliike U. Lipsanen, joka oman käyttönsä lisäksi kehittää sovelluksesta kaupallista versiota ja sovellus kuuluu täten liikesalaisuuden piiriin. Kolmas näistä hankkeista oli

Virrake-hanke (Virtuaalinen rakentaminen), jonka tavoitteena oli tutkia ja kehittää tietomallien pelillistämistä edelleen. Hankkeen aikana toteutettiin myös Virrake-sovellusalusta, joka on yleinen tietomallien pelillistämisalusta monipelitukineen ja kommunikointivälineineen. Virrake-sovellusalusta on suunniteltu toimimaan työpöytä- ja VR-sovelluksena. Neljäs hanke oli nimeltään Digiosaajaksi työelämään ja siinä meidän roolimme oli toteuttaa työelämäpeli, jonka avulla lähinnä aikuiset työelämään koulutettavat voisivat kehittää työelämävalmiuksiaan sekä IT-taitojen, että työelämä tietouden osalta.

Rakennusalan hankkeiden merkittävimmät yhteistyökumppanimme on esitelty aiemmin (luku 1.2, s. 4). Digiosaajaksi työelämään -hankkeen yhteistyökumppaneidemme esittely löytyy myös väitöskirjan alkupuolelta (luku 1.3, s. 6).

4.1 YLEISTÄ PILOTOINNEISTA

Ensimmäisenä pilotointina esitellään lähinnä väitöskirjan **julkaisuun I** liittyvä pilotointi, jossa pilotoimme ja analysoimme kehittämäämme yleistä menetelmää Open BIM -standardin mukaisen tietomallin pelillistämiseksi. Lisäksi testasimme tässä pilotoinnissa rakennuksen esteettömyyden simulointia ja analysointia pelitekniikoiden avulla hyödyntäen myös toiminnallisen suunnittelun menetelmää esteettömyyden vaatimien tilantarpeiden mitoituksessa.

Toisena pilotointina esitellään väitöskirjan **julkaisuihin II, III ja IV** liittyvä pilotointi, jossa toteutimme yhteistyökumppanimme rakentaman kauppakeskuksen pelillistetyn tietomallin avulla hätäpoistumisen simulointi- ja suunnittelu ympäristön hyödyntäen myös mm. data-analytiikkaa simuloinneissa kerätyn tiedon analysoinnissa ja mallien luomisessa. Ympäristön avulla pystyimme suunnittelemaan ja testaamaan kauppakeskuksen erilaisia hätäpoistumisvaihtoehtoja luomalla erilaisia hätäskenaarioita. Toteuttamamme ympäristö toimii myös tarvittaessa esimerkiksi pelastushenkilöstön ja henkilökunnan harjoitusympäristönä monipelitukensa ansiosta.

Kolmantena pilotointina esitellään väitöskirjan **julkaisuun VIII** liittyvä Mikkelin kaupungin keskustan avoimen kaupunkimallin (tietomallin) pelillistäminen ja pelillistetyn kaupunkimallin päälle toteuttamamme sovellukset. Toteutimme esimerkiksi osana aikuisten työelämä taitojen kehittämiseen tähtäävää TKI-hankettamme pelillistetyn kaupunkimallin avulla työelämäpelin. Pelin avulla palaajat voivat testata ja kehittää työelämä taitojaan pelillisin keinoin tutussa kaupunkiympäristössä. Käytimme pelin ensimmäisessä versiossa pelialueena Mikkelin kaupungin keskustan avointa kaupunkimallia, mutta peli on laadittu siten, että peliympäristö voidaan tarvittaessa vaihtaa. Loimme samalla myös

monipelitekniikoita hyödyntäen pelillistetyistä kaupunkimallista yhteisön, joka mahdollistaa erilaisen yhteisöllisen toiminnan ja esimerkiksi joukkoistetun kaupunkisuunnittelun. Pilotoinimme myös samalla epälineaarisen tarinankerronnan työkalujen hyödyntämistä erilaisissa virtuaaliympäristöissä tapahtuvan toiminnan kulun määrittämiseen ja ohjaamiseen. Tutkimme ja testasimme Twinea sekä Fungusta, jotka ovat pelimoottori-integraation sisältäviä epälineaarisen tarinankerronnan työkaluja. Toteutimme Twinellä työelämäpelin tehtävät ja tehtäviin liittyvän toimintalogiikan. Lisäksi pilotoimme epälineaarisen tarinankerronnan työkalujen käyttökelpoisuutta yhdessä monipelitekniikoiden kanssa joukkoistetun kaupunkisuunnittelun hallintaan sekä tietojen keruuseen. Epälineaarisen tarinankerronnan työkaluihin ja niiden hyödyntämiseen yhdessä pelitekniikoiden kanssa liittyvät väitöskirjan **julkaisut V, VI, VII, VIII ja IX**.

Viimeisenä eli neljäntenä pilotointina esitellään lähinnä väitöskirjan **julkaisuun X** liittyvät pilotointimme. Pilotoinnit liittyvät kehittämiimme ideoihin rakennussuunnittelun joukkoistamisesta ja virtuaalisista työmaakokouksista. Näissä pilotoinneissa on paljon samoja elementtejä edellä esitetyn pilotoinnin kanssa, ja ne hyödyntävät myös edellä esitettyjä epälineaarisen tarinankerronnan työkaluja tapahtumien kulun ohjaukseen, hallintaan ja raportointiin. Tätä kautta ne liittyvät myös väitöskirjan **julkaisuihin V, VI, VII, VIII ja IX**. Neljännessä osiossa esitellään aluksi hankkeessamme kehitetyn Virrake-sovellusalan avulla toteuttamamme pilotointi koulukeskuksen joukkoistetusta kalustesuunnittelusta. Lisäksi esitellään toteuttamamme pilotointi, jossa pilotoimme Virrake-sovellusalan ja sen tarjoamien työkalujen ja kommunikointivälineiden soveltuvuutta joukkoistettuun suunnitteluun.

4.2 PILOTOINTI 1: RAKENNUKSEN TIETOMALLIN PELILLISTÄMINEN JA ESTEETTÖMYYDEN SIMULOINTI SEKÄ SUUNNITTELU

Ensimmäisenä esitellään pilotointi, jossa pilotoimme Open BIM -yhteensopivan tietomallin pelillistämistä. Pilotoinimme myös ideaamme pelillistetyn tietomallin mahdollisuudesta tarjota ympäristö rakennuksen esteettömyyden testaukseen ja suunnitteluun. Samalla pilotoimme myös keksimääni toiminnallisen suunnittelun menetelmää eli FDM:ää (Functional Design Method) ja sen soveltuvuutta rakennuksen esteellisen käyttäjän tilantarpeiden mitoitukseen (luku 3.2, s. 56). Tämä aihe tuli rakennusalan TKI-hankkeemme yhteistyökumppaneiden käytännön tarpeista.

Aluksi esitellään hieman pilotoinnin lähtökohtia ja taustaa. Seuraavaksi käydään läpi pilotoinnin toteutus ja lopuksi tehdään vielä yhteenveto ja johtopäätöksiä pilotoinnista saamistamme tuloksista. Tämä pilotointi ja sen keskeisimmät tulokset esitetään väitöskirjan **julkaisussa I**.

Pilotoinnin taustaa

Saimme yhteydenoton kahdelta alueen rakennusalan yritykseltä. Nämä olivat Rakennusliike U. Lipsanen Oy ja alkuvaiheessa mukana ollut Proxion Oy. Heillä oli tarve ja halu kehittää tietomallinnukseen perustuvaa rakennussuunnittelua omassa toiminnassaan. Samalla he ilmaisivat myös tarpeensa kehittää tietomallipohjaisen rakennussuunnittelun tueksi menetelmiä ja välineitä, jotka toisivat suunniteltavassa rakennuksessa tapahtuvan toiminnallisuuden nykyistä paremmin rakennussuunnitteluun mukaan jo suunnittelun alkuvaiheessa. Kaikilla toimijoilla oli myös yhteinen visio pelillistämisen ja nykyaikaisten pelitekniikoiden tarjoamista mahdollisuuksista tietomallipohjaisen rakennussuunnittelun apuna. Tietomallin pelillistäminen tarjoaisi heidän näkemyksensä mukaan uusia työkaluja ainakin suunnittelun ja markkinoinnin näkökulmista.

Edellä kuvatuista lähtökohdista käynnistimme ensimmäisen yhteisen TKI-hankkeemme jalostamaan näitä visioita ja kehittämään niitä eteenpäin. Samoihin aikoihin yhteistyömme innoittamana tein myös työsuhdekeksinnön toiminnallisen suunnittelun menetelmästä (FDM) ja halusimme testata menetelmän soveltuvuutta käytännön rakennussuunnittelussa yhdessä tietomallin pelillistämisen kanssa. TKI-hankkeemme keskeisin rakennusalan yhteistyökumppanimme Rakennusliike U. Lipsanen oli myös siirtymässä omassa toiminnassaan käyttämään tietomallinnusta ja Open BIM -standardeja.

Kehitimme hankkeessa yleisen menetelmän Open BIM -standardien mukaisen tietomallin pelillistämiseksi pelimoottoreiden avulla siten, että tietomallin metatiedot saadaan tuotua pelimoottoriin mallin mukana (luku 2.3, s. 31). Päätimme toteuttaa hankkeeseemme liittyen pilotoinnin, jossa yhdistyisivät kaikki edellä kuvatut elementit. Pilotointiin sisällytetty esteettömyyden simulointi määräytyi aiheeksi siitä syystä, että hankkeessa mukana olleet rakennusalan yhteistyökumppanimme suunnittelevat ja rakentavat mm. palvelutaloja, joissa esteettömyys ja esteettömyyden vaatimat tilantarpeet korostuvat erityisesti. He myös kaipasivat lisää menetelmiä ja työkaluja näiden haasteiden ratkaisemiseksi. Aiemmin oli heidän mukaansa mm. pyörätuolin vaatimia tilantarpeita mitoitettu kasaamalla tyhjiin teollisuushalliin erilaisia tiloja kuvaavia alueita tyhjiistä pahvilaatikoista ja testaamalla oikealla pyörätuolilla avustajien kanssa toimintojen vaatimia tilantarpeita.

Pilotoinnin kohderyhmä ja toteutusympäristö

Pilotoinnin kohderyhmänä olivat RedHal-hankkeemme työntekijät, sekä hankkeen yhteistyöyritysten edustajat. Pilotoinnissa rakennetun käytännön artefaktin toteutukseen osallistui itseni lisäksi kaksi hankkeen työntekijää ja yksi yhteistyöyrityksemme työntekijä. Artefakti toteutettiin yksinpeliympäristönä keksimääni toiminnallisen suunnittelun

menetelmää ja kehittämäämme Open BIM -standardin mukaisen tietomallin pelillistämisen menetelmää hyödyntäen ja samalla niitä myös testaten. Kaikki artefaktin toteuttajat suorittivat koko pilotoinnin ajan osallistuvaa havainnointia.

Pilotoinnin viimeisenä vaiheena suoritettiin toteutetun artefaktin katselmus, johon osallistuivat käytännössä kaikki RedHal-hankkeen työntekijät, sekä yhteistyöyritysten edustajat. Katselmuksessa esiteltiin artefaktin toiminnallisuus, sekä sen taustalla olevat ideat ja innovaatiot. Tämän jälkeen suoritettiin katselmointiin osallistuneisiin henkilöihin kohdistettu avoin haastattelu. Käytännössä avoimeen haastattelututkimukseen osallistuneiden henkilöiden otos oli koko hankkeen aktiivisten toimijoiden ryhmä. Yhteensä avoimeen haastatteluun osallistui 11 henkilöä eri rooleissa. Otosta voidaan mielestäni pitää myös melko edustavana koko rakennusalan toimijoiden ryhmässä, sillä yhteistyöyrityksemme edustavat melko laajasti koko rakennusalan kenttää. Tulosta ehkä hieman vääristää se, että hankkeiden yhteistyöyrityksiksemme on valikoitunut hyvin myötämielisesti uusiin tekniikoihin ja kehitykseen suhtautuvia yrityksiä.

Pilotoinnin toteutus

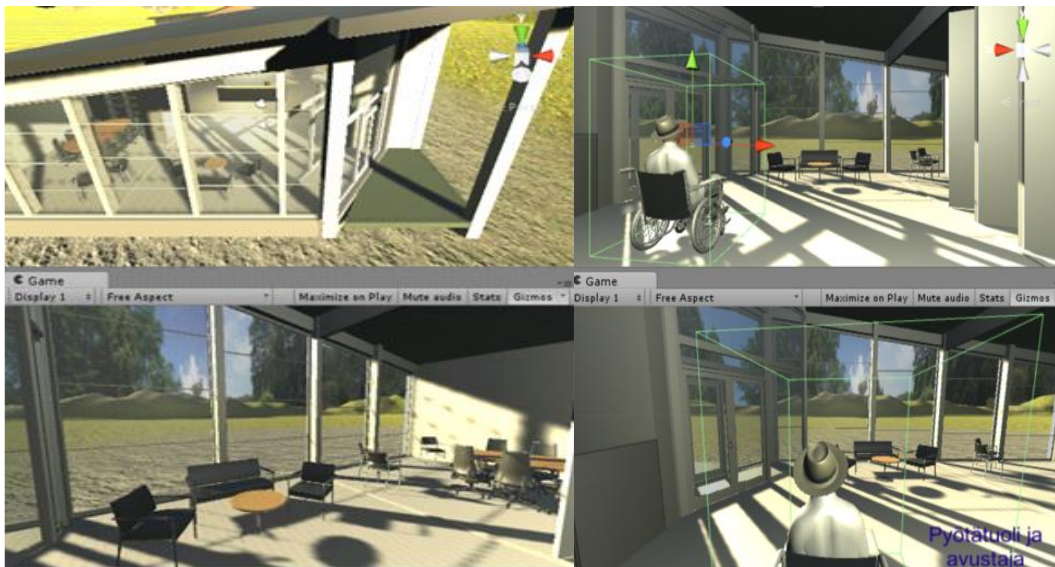
Pelillistimme pilotoinnissa yhteistyökumppanimme Pieksämän Naarajärvelle rakentaman uuden pääkonttorin. Siitä oli riittävän tasoinen, Open BIM -standardeja tukeva tietomalli saatavilla. Toteutimme pelillistämisen tässä tapauksessa Unity-pelimoottorin avulla (Unity Inc, 2019). Käänsimme IFC-standardin mukaisen pääkonttorin tietomallin aiemmin esiteltyllä IfcOpenShell-ohjelmakirjaston IfcConvert-ohjelmalla pelimoottoreiden yleisesti tukemaan OBJ-muotoon. Lisäksi käänsimme samaa ohjelmaa hyödyntäen IFC-tiedoston sisältämät metatiedot XML-muotoon. Toimme molemmat tiedostot käyttämäämme Unity-pelimoottoriin, jossa liitimme mallin osat ja metatiedot jälleen yhteen mallin osien yksilöivien tunnusten avulla.

Toteutimme pelillistettyyn tietomalliin myös pienimuotoisen esteettömyyden simulointi- ja analysointiympäristön, jossa pelaaja liikkuu pyörätuolin avulla. Kuvassimme yhdessä terveystalon ammattilaisten kanssa videolle heidän määrittelemiään pyörätuolin normaaleja käyttötilanteita. Mitoitimme keksimääni toiminnallisen suunnittelun menetelmää ja VaddTool-ohjelmistotyökalun prototyyppiä hyödyntäen pyörätuolin käyttötilanteista kuvattujen videoiden avulla eri käyttötilanteiden vaatimat suurimmat tilantarpeet. Saimme mitoituksen tuloksena luotua pyörätuolin eri käyttötilanteiden vaatimia suurimpia tilantarpeita kuvaavat IFC 3D -tilaobjektit. Käänsimme IFC 3D -tilaobjektit IfcOpenShell-ohjelmakirjaston avulla metatietoineen pelimoottorin ymmärtämään muotoon ja mitoitimme pelimoottorissa niiden avulla pyörätuolia käyttävälle pelihahmolle vaihdettavat törmäystunnisteet.

Törmäystunnisteet kuvaavat kunkin toiminnan vaatimaa suurinta tilantarvetta.

Rakennuksen esteettömyyttä pyörätuolin käyttäjän näkökulmasta voidaan nyt testata liikkumalla pelillistetyssä tietomallissa eri tiloihin ja vaihtelemalla törmäystunnisteita tilanteen mukaan. Tällöin nähdään hyvin konkreettisesti, kuinka hyvin vaadittu toiminnallisuus mahtuu kyseiseen tilaan. Pilotoinne samalla myös hieman ideaamme ajaa pelillistetyssä tietomallissa pelimoottorin tekoälypohjaisen navigoinnin avulla rakennus erilaisilla törmäystunnisteilla automaattisesti läpi ja tallentaa lokiin tieto mahdollisista ongelmakohtista. Näin kerättyä dataa voitaisiin analysoida esimerkiksi data-analytiikan keinoin ja etsiä näin rakennuksesta esteettömyyden mahdollisia ongelmakohtia. Tätä menetelmää hyödynsimme hätäpoistumiseen liittyvässä pilotoinnissamme, joka esitellään luvussa 4.2.

Kuvio 25 havainnollistaa tietomallista pelillistettyä yhteistyökumppanimme pääkonttoria. Kuvassa näkyy myös tilanne, jossa pyörätuolin avulla liikkuva pelaaja pystyy liikkumaan vapaasti pääkonttorin pelillistetyssä tietomallissa. Pelaajalla on ympärillään toiminnallisen suunnittelun menetelmän avulla mitoitettavat vaihdettavat törmäystunnisteet, jotka kuvaavat erilaisten toimintojen vaatimaa suurinta tilantarvetta. Lisäksi kuvassa on nähtävissä, kuinka IFC 3D -tilaobjektien avulla määriteltäisiin törmäystunnisteisiin on saatu tuotua metatietoja pelimoottoriin mukaan (törmäystunnisteen kuvaus).



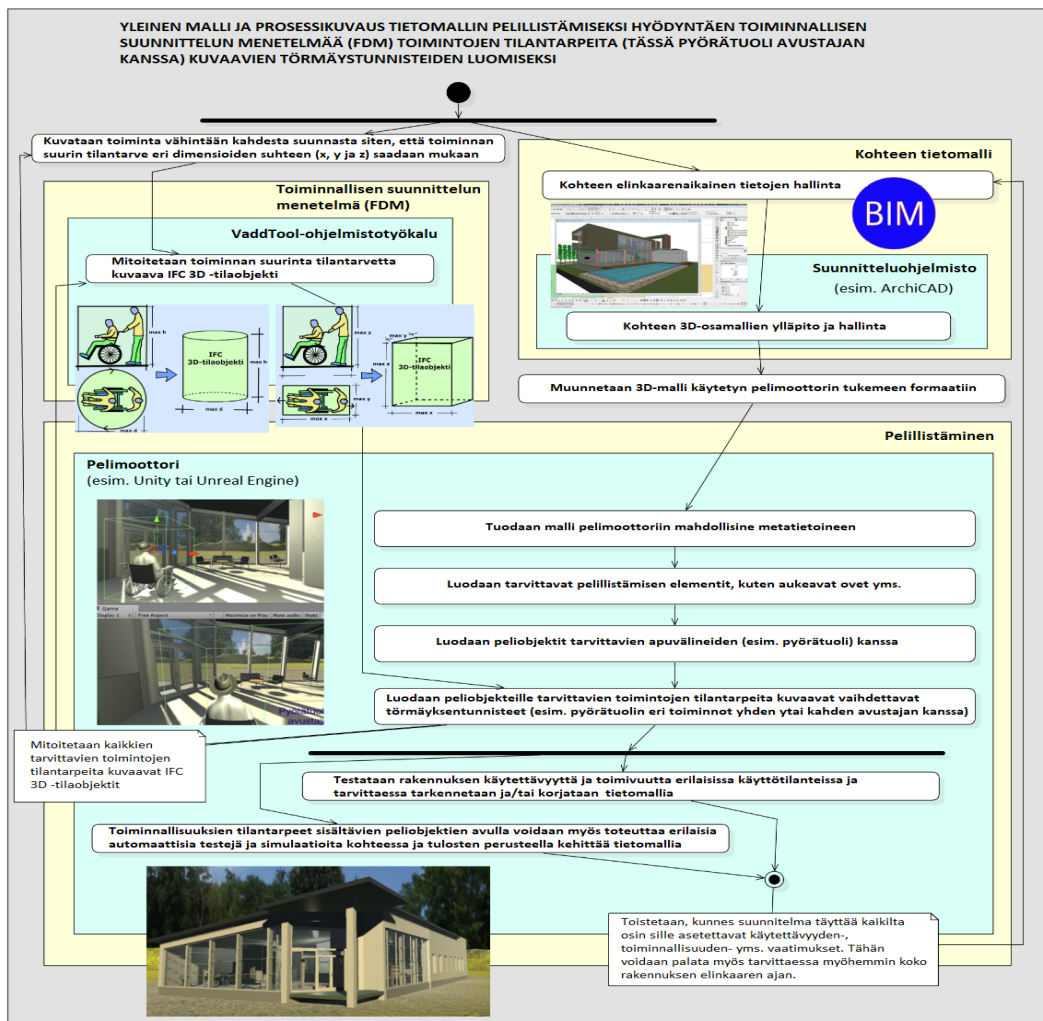
Kuvio 25. Pilotointia varten tietomallista pelillistämämme yhteistyökumppanimme pääkonttori, sekä pyörätuolia käyttävä pelaaja, jolle on mitoitettu toiminnallisen suunnittelun menetelmää hyödyntäen vaihdettavat törmäystunnisteet (Julkaisu I).

Pilottisovellus (artefakti) on toteutettu siten, että kulloinkin valittuna olevan törmäystunnisteen kuvaus näytetään pelaajalle näytöllä. Myös valittuna olevan törmäystunnisteen ääriviivat näkyvät sovelluksen suorituksen aikana.

Pilotoinnin yhteenveto ja tulokset

Kuvio 26 havainnollistaa tässä pilotoinnissa käyttämiämme menetelmiä ja tekniikoita rakennuksen tietomallin pelillistämiseksi ja esteettömyyden simuloimiseksi toiminnallisen suunnittelun menetelmää hyödyntäen. Kuvan esittämää menetelmää ja menetelmän mukaista prosessia voidaan pitää tämän pilotoinnin ja siihen liittyvien tutkimusten keskeisimpänä tuloksena. Tässä pilotoitua menetelmää sekä prosessia tullaan hyödyntämään tapauskohteisesti soveltaen myös tulevissa hankkeissamme ja niihin liittyvissä pilotoinneissa.

Kuvassa näkyy, kuinka eri menetelmät ja tekniikat liittyvät toisiinsa ja muodostavat pilotoinnissa käyttämämme kokonaisuuden. Samoja tekniikoita ja menetelmiä hyödynnetään myös myöhemmin esitettävissä pilotoinneissamme. Niitä on kehitetty edelleen hankkeidemme edetessä. Tästä syystä menetelmä saattaa näyttäytyä eri pilotoinneissa hieman eri tavalla. Myös menetelmien ja tekniikoiden käyttötavat kehittyvät jatkuvasti hankkeidemme edetessä. Lisäksi mahdollisia käyttökohteita tulee koko ajan lisää.



Kuvio 26. Pilotoinnin prosessin prosessikuvaus, jossa näkyvät kaikki pilotoinnissa käyttämiämme menetelmät ja tekniikat (Julkaisu I).

Pilotoinnista saadut tulokset olivat kokonaisuudessaan siinä määrin mielenkiintoisia ja lupaavia, että päätimme yhdessä rakennusalan yhteistyökumppaneidemme kanssa jatkaa kehitystyötä edelleen yhteisissä hankkeissamme, sekä myös itsenäisinä toimijoina. Havaitimme, että Open BIM -standardien mukaisen tietomallin pelillistäminen nykyaikaisia pelimoottoreita hyödyntäen onnistuu kohtuullisen hyvin.

Pyörätuolia käyttävän pelihahmon antava käyttäjäkokemus oli melko luonnollinen ja se antoi mielestämme yllättävän hyvän ja todenmukaisen tuntuman siitä, kuinka pyörätuolia käyttävä henkilö rakennuksen ja sen esteettömyyden kokee. VR-lasien käyttö lisää vielä tarvittaessa pelaajan kokemaa immersiota. Kaikki pilottisovelluksen käyttäjät olivat sitä mieltä, että sovellus lisäsi heidän ymmärrystään siitä, kuinka hyvin suunniteltava rakennus vastaa esteellisen käyttäjän tarpeita. Heidän mielipiteensä oli, että pilotoidut menetelmät ja tekniikat auttavat heitä suunnittelemaan esteettömyyden kannalta entistä parempia ja toimivampia rakennuksia.

Pelillistämistä ja tässä kuvattuja menetelmiä sekä tekniikoita hyödyntäen voidaan myöskin suunnitella ja simuloida erilaista rakennusautomaatiota, kuten esimerkiksi ovien automaatiota tai mukautuvaa valaistusta. Tällä tavoin nähdään hyvin havainnollisesti, kuinka hyvin ne palvelevat rakennuksen erilaisia käyttäjiä erilaisissa käyttötilanteissa.

Toiminnallisen suunnittelun menetelmä (FDM) todettiin pilotoinnissa hyvin havainnolliseksi ja käyttökelpoiseksi tavaksi varmistaa, että tilat mitoitetaan todellisten käyttötarpeiden mukaan ja niitä vastaaviksi. Yhteistyökumppanimme pitivät myös todellisesta toiminnasta kuvatuista videoista toiminnallisen suunnittelun menetelmän avulla mitoitettuja ja vaihdettavia törmäystunnisteita erittäin hyvänä ja käytännönläheisenä ideana, joka taipuu monenlaisiin analyyseihin, mitoituksiin ja simuloituihin.

Pilotoimme myös rakennuksen esteettömyyden automaattista analysointia hyödyntäen pelimoottoreiden tekoälypohjaista navigointia ja pelimoottoriin tuotuja IFC 3D -tilaobjekteja. Toteutimme pilotoinnin ajamalla erilaisia tilantarpeita kuvaavilla 3D-tilaobjekteilla kohdetta läpi siten, että objektien törmäykset ja mahdolliset uudelleenreititykset dokumentoitiin lokiin. Tällä tavoin saimme selville rakennuksen esteettömyyden ongelmakohdat pyörätuolin käyttäjän näkökulmasta. Myös esimerkiksi liian jyrkät rampit voidaan löytää vastaavalla tavalla, mikäli objektien fysiikat on määritelty todellisuutta vastaaviksi. Totesimme pilotoimamme ideat ehdottomasti jatkotutkimusten arvoisiksi.

Suoritimme pilotoinnin aikana osallistuvaa havainnointia. Lisäksi selvitimme hankkeen toimijoihin ja yhteistyökumppaneihimme kohdistettujen avointen haastattelujen avulla heidän näkemyksiään ja arvioitaan idean toimivuudesta ja potentiaalista. Haastattelujen avulla

pyrittiin selvittämään heidän näkemyksiään, mielipiteitään ja mahdollisia jatkokehitysideoitaan liittyen keksimääni toiminnallisen suunnittelun menetelmään ja menetelmän hyödyntämiseen rakennuksen toiminnallisessa suunnittelussa sellaisenaan tai yhdessä rakennuksen pelillistetyn tietomallin kanssa. Saatujen tulosten perusteella voidaan todeta, että idea rakennuksen tietomallin pelillistämistä ja pelillistetyn tietomallin hyödyntämisestä eri tavoin tuo koko rakennussuunnitteluun aivan uusia ja tarpeellisia ulottuvuuksia. Havaitimme myös, että tietomallinnus ja tietomallin hyödyntäminen esimerkiksi pelillistämisen keinoin vaatii kaikilta rakennusalan toimijoilta uudenlaista ajattelua ja usein myös koko rakennusprosessin uudistamista. Vaatimuslistalla ovat esimerkiksi yhteistyöhön ja yhteisiin standardeihin sitoutuminen. Tämä ei aina ole kovin helppoa varsinkaan, kun puhutaan melko konservatiivisesta toimialasta. Yhteistyökumppaneidemme mielestä pilotoinnin tulokset ovat sellaisia, että tutkimus- ja kehitystyötä kannattaa ehdottomasti jatkaa juuri tähän suuntaan myös tulevaisuudessa. Kaikkien pilotointiin osallistuneiden toimijoiden mielestä tämänkaltaiset menetelmät ja tekniikat auttavat suunnittelijoita ja muita rakennushankkeen toimijoita paremmin ymmärtämään suunniteltavaa rakennusta ja rakennuksen tulevaa käyttöä. Tämä taas auttaa suunnittelemaan ja rakentamaan parempia ja käyttötarkoituksiinsa hyvin soveltuvia rakennuksia.

Pilotointi herätti myös jatkokehitysideoita liittyen esimerkiksi suunnittelun joukkoistamiseen ja virtuaalisiin työmaakokouksiin pelillistettyä tietomallia ja pelimoottoreiden tarjoamia monipelitekniikoita hyödyntäen. Nämä ideat on huomioitu jatkokehityksessä ja seuraavissa pilotoinneissamme.

4.3 PILOTOINTI 2: HÄTÄPOISTUMISEN SUUNNITTELU JA SIMULOINTI

Seuraavaksi esitellään pilotointi, jossa pilotoimme hätäpoistumista ja hätäpoistumisen simulointia pelillistetyn tietomallin, toiminnallisen suunnittelun menetelmän, monipelitekniikoiden, tekoälyn ja data-analytiikan avulla. Pilotoinnin kohteena oli yhteistyökumppanimme Pieksämäelle toteuttama kauppakeskus. Kauppakeskuksen suunnittelu oli jo lähtökohtaisesti tehty tietomallinnuksen ja Open BIM -standardien mukaisesti, joten se oli erinomainen kohde pelillistämälle ja pilotoinneille.

Aluksi esitellään hieman pilotoinnin lähtökohtia ja taustaa. Seuraavaksi käydään läpi pilotoinnin toteutus ja lopuksi tehdään vielä yhteenveto ja esitetään johtopäätöksiä pilotoinnista saamistamme tuloksista. Tämä pilotointi ja sen keskeisimmät tulokset esitetään tämän luvun lisäksi väitöskirjan **julkaisuissa II, III ja IV**.

Pilotoinnin taustaa

Rakennusalan hankkeiden yhteistyökumppaneitamme kiinnostaa erilaisen rakennuksessa tapahtuvan toiminnallisuuden saaminen rakennussuunnitteluun nykyistä paremmin mukaan. Tämä koskee rakennuksen käyttötarkoituksensa mukaista peruskäyttöä, mutta myöskin esimerkiksi esteettömyyttä tai turvallisuutta. Rakennusten tietomallinnus ja tietomallien pelillistäminen nykyaikaisten pelimoottoreiden avulla avaa tähän uudenlaisia mahdollisuuksia. Päätimme pilotoida osana TKI-hankettamme pelillistetyt tietomallin ja pelitekniikoiden soveltuvuutta yhteistyökumppanimme toteuttaman kauppakeskuksen hätäpoistumisen suunnitteluun ja simulointiin, sekä pelastushenkilöstön ja henkilökunnan turvallisuuskoulutukseen. Hätäpoistumisen simuloinnista löytyy myös aiempaa tutkimustietoa ja pilotointeja (Wang, Van Schyndel, Wainer, Rajus & Woodbury, 2012; Wang et al., 2015). Meidän pilotointimme kaltaista rakennuksen pelillistetyssä tietomallissa tapahtuvaa simulointia ja tulosten analysointia data-analytiikan keinoin ei mielestämme juuri tässä muodossa ole kuitenkaan vielä aiemmin toteutettu.

Kauppakeskuksessa on paljon erilaisia tiloja ja käyttäjiä. Tästä johtuen esimerkiksi hätäpoistumisen suunnittelu ja mitoitus siten, että se palvelee kaikkia mahdollisia hätäskenaarioita riittävän hyvin, on kohtalaisen haastavaa. Lisäksi erilaisten suunnitelmien testaaminen ja keskinäinen vertailu on vaikeaa. Tätä taustaa vasten kehitimme idean hätäpoistumisen suunnittelu- ja simulointiympäristöstä peliohjelmoinnin keinoin kohteen pelillistettyä tietomallia hyödyntäen. Väitöskirjan **julkaisut II** ja **IV** kuvaavat pilotoinnin ensimmäistä vaihetta, jossa testasimme hätäpoistumisen toimivuutta suunniteltujen hätäpoistumisteiden kautta tilanteissa, joissa kauppakeskuksessa on erilaisia asiakasmääriä ja sinne syttyä erilaisia tulipaloja.

Pilotointi herätti siinä määrin kiinnostusta eri toimijoissa, että päätimme toteuttaa sille vielä jatkopilotoinnin. Jatkopilotoinnissa kehitimme edellisen pilotointimme sovellusta siten, että kaikkiin profiloituihin pelihahmoihin lisättiin ohjelmakoodi, joka kirjoittaa kyseisen pelihahmon kaikki simuloinnin aikaiset törmäykset lokiin. Näin saatua data-aineistoa analysoitiin data-analytiikan menetelmillä ja pyrittiin tällä tavoin löytämään kauppakeskuksesta erilaiset hätäpoistumisen pullonkaulat. Lisäksi pyrimme vertaamaan eri hätäpoistumisvaihtoehtoja keskenään, sekä mitoittamaan niiden määrää. Väitöskirjan **julkaisu III** esittelee tämän jatkokehityksen ja siihen liittyvän pilotoinnin, sekä pilotoinnin tulokset.

Toteuttamamme simulointiympäristö tarjoaa myös monipelitukensa ansiosta mahdollisuuden kouluttaa pelastushenkilöstöä ja henkilökuntaa toimimaan yhteistyössä hätätilanteiden sattuessa. Pelaajat näkevät toistensa pelihahmot samassa pelimaailmassa ja he voivat myös kommunikoida keskenään. Samalla he näkevät ja kokevat

kauppakeskuksesta paniikissa poistuvat asiakkaat. Tätä kautta he voivat harjoitella esimerkiksi keskinäistä kommunikointia ja käyttäytymistä ryhmänä hätätilanteen sattuessa. Pilottisovelluksessamme monipelaajien antamat käskyt eivät vielä aiheuta reagoitua pakenevissa asiakkaissa, mutta tämäkin olisi varmasti mahdollista toteuttaa tekoälyn menetelmiä ja tekniikoita hyödyntäen.

Pilotoinnin kohderyhmä ja toteutusympäristö

Pilotoinnin kohderyhmänä olivat Virrake-hankkeemme työntekijät, sekä hankkeen yhteistyöyritysten edustajat. Pilotoinnissa rakennetun kahden erillisen käytännön artefaktin toteutukseen osallistui itseni lisäksi yksi hankkeen työntekijä ja yksi yhteistyöyrityksemme työntekijä. Ensimmäinen artefakti toteutettiin moninpeliympäristönä keksimääni toiminnallisen suunnittelun menetelmää ja kehittämäämme Open BIM -standardin mukaisen tietomallin pelillistämisen menetelmää hyödyntäen ja samalla niitä myös testaten. Tämän artefaktin pohjalta kehitettiin samojen toteuttajien toimesta myös toinen artefakti, johon otettiin tekoäly ja koneoppiminen mukaan ohjaamaan ja analysoimaan simulaatioita ja etsimään hätäpoistumisen ongelmakohtia. Artefaktien toteuttajat suorittivat koko pilotoinnin ajan myös osallistuvaa havainnointia.

Ensimmäisen artefaktin valmistumisen jälkeen pidettiin ensimmäinen katselmus, johon osallistuivat kaikki toteutukseen osallistuneet henkilöt. Lisäksi katselmukseen osallistui kolme yhteistyöyritystemme edustajaa kahdesta eri yrityksestä. Katselmuksen ja sen yhteydessä pidetyn avoimen haastattelun perusteella päätettiin toteuttaa jatkokehityksenä edellisen artefaktin pohjalta myös toinen artefakti, johon liitettäisiin mukaan tekoäly ja koneoppiminen auttamaan hätäpoistumisen simulaatioissa kerätyn datan analysointia ja hätäpoistumisen suunnittelua. Myös tämän toisen vaiheen jälkeen pidettiin katselmus, johon osallistuivat artefaktin toteuttajat, sekä neljä yhteistyöyritystemme edustajaa edelleenkin kahdesta eri yrityksestä. Katselmuksessa esiteltiin artefaktin avulla suorittamiemme simulointeja, sekä niihin liittyviä analyysejä.

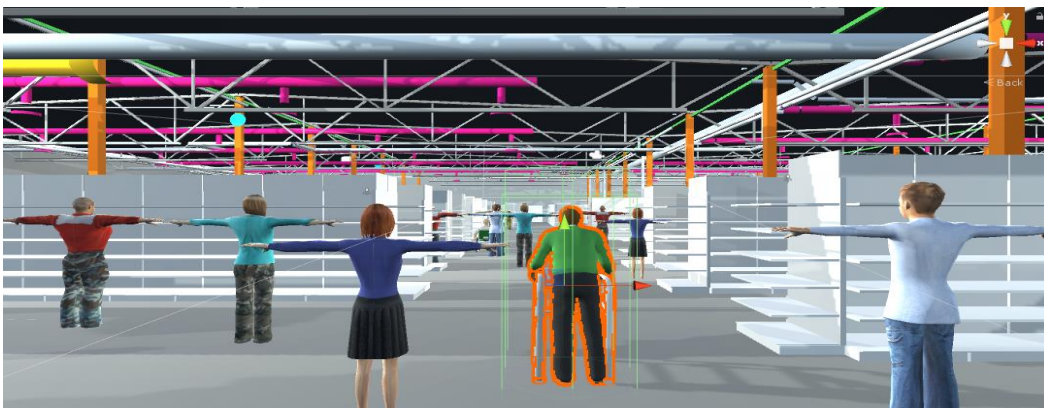
Tämän jälkeen suoritettiin katselmointiin osallistuneisiin henkilöihin kohdistettu avoin haastattelu. Haastattelun avulla pyrittiin selvittämään heidän näkemyksiään, mielipiteitään ja mahdollisia jatkokehitysideoitaan. Käytännössä avoimeen haastatteluun osallistuneiden henkilöiden otos oli koko hankkeen niiden toimijoiden ryhmä, joita tämä tutkimusaihe kosketti. Yhteensä avoimeen haastatteluun osallistui seitsemän henkilöä eri rooleissa. Tässäkin tutkimuksessa rakennusala on mielestäni melko hyvin edustettuna, joten tulokset ovat ainakin jossain määrin yleistettävissä. Tulosta yleistettävyyden näkökulmasta ehkä vääristää hieman se, että hankkeiden yhteistyöyrityksiksemme on valikoitunut hyvin myönteisesti uusiin tekniikoihin ja kehitykseen suhtautuvia yrityksiä.

Pilotoinnin toteutus

Loimme pilotointia varten yhteistyökumppaneidemme kanssa joukon erilaisia kauppakeskuksen asiakasprofiileja. Määrittelimme kullekin asiakasprofiilille profiilin mukaiset poistumisen parametrit. Parametrejä olivat mm. hädän tajuaminen, nopeus, kyky ylittää esteitä ja hätäpoistumisen aktiivisuus. Lisäksi määrittelimme jokaiselle asiakasprofiilille oman tilantarpeen toiminnallisen suunnittelun menetelmää hyödyntäen. Loimme asiakasprofiilien mukaiset pelihahmojen prototyypit siten, että hahmojen ympärille luotiin heidän tyypillistä tilantarvettaan vastaavat törmäystunnisteet. Lisäsimme profiilien mukaisten pelihahmojen prototyyppeihin vielä pelimoottoreiden tarjoaman tekoälyyn perustuvan navigoinnin, jonka avulla pelihahmot saadaan hakeutumaan annetuilla parametreilla ennalta määriteltyyn kohteeseen. Tässä tapauksessa hakeutumisen kohteena ovat ennalta määritellyt hätäuloskäynnit. Aihetta käsitellään **julkaisussa III**.

Saimme yhteistyökumppaneiltamme tiedot asiakasmääristä eri asiakasprofiilien osalta. Sijoitimme näiden tietojen pohjalta profiloituja asiakkaita ympäri kauppakeskusta. Lisäksi määrittelimme erilaisia hätäpoistumisvaihtoehtoja ja määrittelimme kauppakeskukseen sijoitetut profiloituneet hahmot hakeutumaan kohti lähintä hätäuloskäyntiä. Pilotointiin osallistuneet toimijat olivat sitä mieltä, että asiakkaat voidaan simulaatiossa laittaa hakeutumaan kohti lähintä hätäuloskäyntiä, sillä yleensä suurimmalla osalla asiakkaista on käytännössä kohtalainen näkemys siitä, missä lähin poistumistie sijaitsee. Toki hakeutumiseen on mahdollista lisätä tarvittaessa myös satunnaisuutta.

Kuvio 27 havainnollistaa erästä simuloitua hätäpoistumisskenaariota, jossa joukko profiloituja pelihahmoja on sijoitettuna satunnaisesti tietomallista pelillistettyyn kauppakeskukseen. Kuvassa näkyy myös rollaattoria käyttävä, hitaasti etenevä hahmo. Hahmon ympärillä näkyy toiminnallisen suunnittelun menetelmällä mitoitettu kyseisen profiilin tilantarvetta kuvaava sylinterin muotoinen törmäystunniste. Edempänä näkyy myös mm. pyörätuolia käyttävä profiloitu pelihahmo.



Kuvio 27. Erään simuloitun hätäpoistumisskenaarion alkutilanne, jossa profiilien mukaisia pelihahmoja on sijoitettuna pelillistettyyn kauppakeskukseen (**Julkaisut II ja IV**).

Toteutimme pilottisovelluksen siten, että tapahtumia voidaan seurata joko oman monipelihahmon, tai minkä tahansa asiakkaan hahmon näkökulmasta Third Person Controller -tyylisellä kameranäkymällä. Sovelluksessa on myös mahdollista seurata tapahtumia yleisesti tai useampaa kameranäkymää samanaikaisesti.

Simulaatio on varsin mielenkiintoista seurattavaa. Siinä näkyy hyvin mm. se, kuinka paniikitilanteessa hitaasti etenevät esteelliset asiakkaat meinaavat jäädä nopeasti etenevien asiakkaiden jalkoihin. Simulaatiossa näkyvät myös hyvin kauppakeskuksen hätäpoistumisen pullonkaulat, eli ahtaat hyllyväliä ja kassarivistöt.

Nähdään myös, että esimerkiksi tulipalon sattuessa pitäisi kaikki kassalinjat saada avattua nopeasti, jotta kaikki poistujat eivät pakkautuisi muutamaan auki olevaan linjaan. Normaalissa käyttötilanteessahan vain osa kassalinjoista on auki ja käytössä.

Kuviossa 28 näkyy tilanteita, jossa simulointi on käynnissä ja pelihahmot hakeutuvat profiileidensa mukaisesti kohti määriteltyjä hätäuloskäyntejä. Kuvan tilanteet on kuvattu rollaattoria käyttävän pelihahmon näkökulmasta katsottuna.



Kuvio 28. Kuvissa erään hätäskenaarion simulointi on käynnissä ja hätäpoistumista kuvataan rollaattoria käyttävän profiloituneen hahmon näkökulmasta (Julkaisut II ja IV).

Julkaisuissa II ja IV esitellään tämän pilotointimme ensimmäinen vaihe ja siitä saamiamme tuloksia. **Julkaisussa III** esitellään pilotoinnin toinen vaihe tuloksineen. Toisessa vaiheessa pyritään data-analytiikan keinoin löytämään simulointien avulla kerätystä data-aineistosta kauppakeskuksen hätäpoistumisen pullonkaulat sekä optimaalinen hätäpoistumisteiden sijoittelu.

Toteutimme jatkopilotointia varten aiempaan simulointisovellukseemme laajennuksen, jossa kaikki pelihahmot kirjoittavat simuloinninaikaiset törmäyksensä lokiin. Jaoin kauppakeskuksen lattiatason muutaman neliömetrin kokoisiin laskennallisiin ruutuihin. Jokaisesta törmäyksestä kirjoitetaan lokitiedostoon törmääjä, törmäyksen kohde, törmäyksen ajankohta sekä se ruutu, jossa törmäys on tapahtunut. Lähtöolettamuksemme on, että mikäli jollain alueella tapahtuu lyhyen ajan sisällä paljon törmäyksiä joko rakenteisiin tai toisiin pelihahmoihin, niin tällainen alue on hätäpoistumisen näkökulmasta katsottuna ongelmallinen.

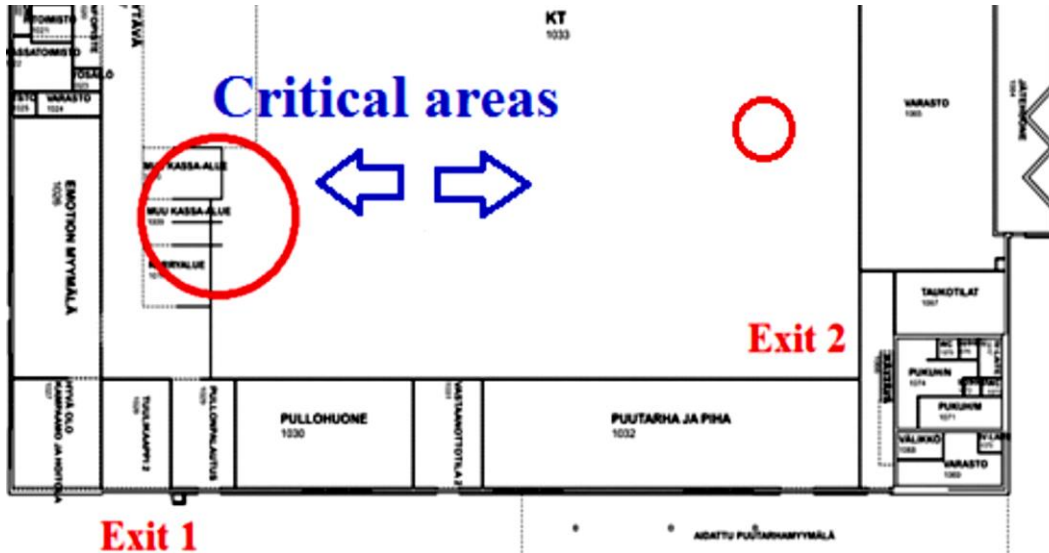
Tutkimme simulaatioista saamamme data-aineiston avulla, voisiko data-analytiikkaa hyödyntäen löytää kauppakeskuksen hätäpoistumisen ongelma-alueita. Käytimme tutkimuksessa hyväksemme Microsoft Machine Learning -työkalua, joka on osa Microsoftin Azure-pilvipalvelua (The Azure Machine Learning service, 2019). Toki muidenkin data-analytiikka ja koneoppimisen työkalujen käyttö olisi ollut mahdollista.

Toteutimme aluksi analyysin, jossa haimme data-aineistosta eri ruutuihin kohdistuneet törmäysten lukumäärät. **Kuviossa 29** näkyy eräs simuloinnissa keräämämme data-aineisto ennalta määrittelemämme ruutuihin sijoiteltuna taulukkomaisesti esitettynä siten, että kussakin taulukon ruudussa näkyy kyseisellä alueella tapahtuneiden törmäysten lukumäärä.

0	0	4	35	0	14	0	0
0	0	18	28	0	0	0	0
0	0	6	15	0	0	0	0
2	0	46	37	0	0	0	0
0	0	84	0	0	0	0	0
0	58	18	0	3	1	0	0
0	27	39	20	38	1	322	0
0	457	254	174	8	37	39	0
0	342	5	74	28	0	0	0
0	383	0	0	152	73	0	2
0	242	0	0	0	0	0	0
0	94	0	0	0	0	0	0

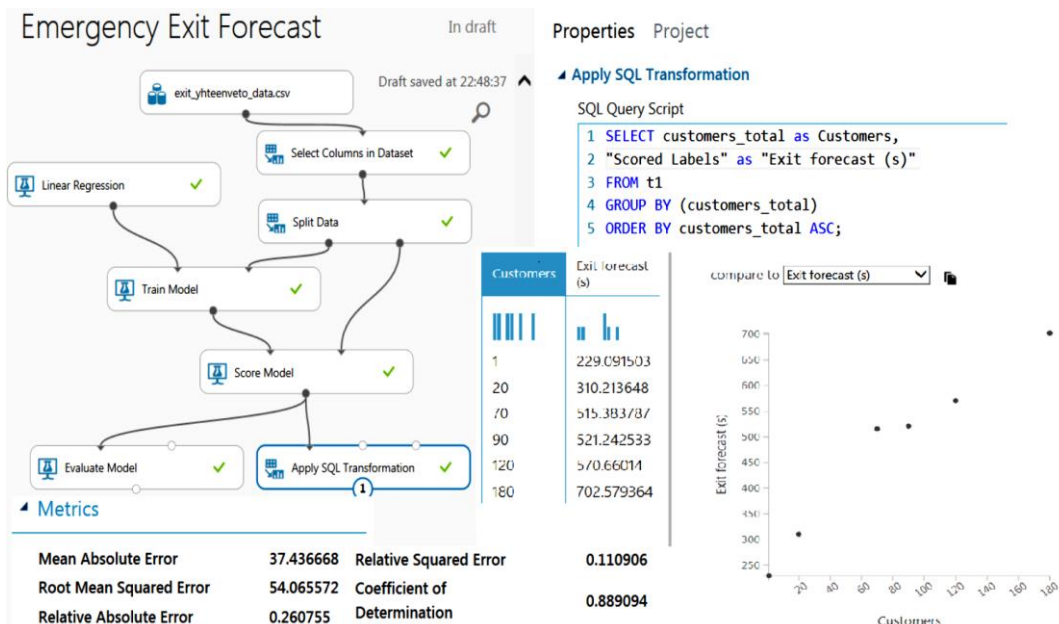
Kuvio 29. Eräässä simuloinnissa tapahtuneiden törmäysten määrät sijoitettuna taulukkomaisesti kauppakeskuksen lattiaan määritellyjä alueita kuvaaviin ruutuihin (Julkaisu III).

Edellisen kuvan taulukkoesityksen perusteella voidaan nähdä selkeästi simuloinnissa esille tulleet hätäpoistumisen ongelma-alueet. **Kuviossa 30** simuloinnissa löydetyt hätäpoistumisen ongelma-alueet on sijoitettu kauppakeskuksen pohjapiirrokseen. Kuvassa näkyvät myös kyseisessä simulaatioissa käytetyt hätäuloskäyntien sijoittelut (Exit 1 ja Exit 2).



Kuvio 30. Data-analytiikan avulla löydetyt hätäpoistumisen ongelma-alueet esitettynä kauppakeskuksen pohjapiirroksessa (Julkaisu III).

Kokosimme simuloinneissa keräämämme data-aineiston yhteen ja toteutimme sen avulla mallin (**Kuvio 31**), joka pyrkii ennustamaan kauppakeskuksen tyhjenemiseen (evakuointiin) kuluvaan aikaan erilaisilla asiakasmäärillä.



Kuvio 31. Data-analytiikan ja koneoppimisen menetelmin tuotettu malli hätäpoistumisen evakuointiaikojen ennustamiseksi erilaisilla asiakasmäärillä (Julkaisu III).

Mallista voidaan nähdä, että esimerkiksi n. 200 asiakkaan evakuointi kauppakeskuksesta kestää n. 700s eli reilut kymmenen minuuttia. Tämä

on kauppakeskuksen paloturvallisuuden näkökulmasta melko hyvä tulos, sillä tutkimukset ovat osoittaneet, että tulipaloissa ongelman muodostavat yleensä palokaasut n. 20 minuutin kuluttua palon alkamisesta. Tekemiemme simulointien perusteella kauppakeskus saataisiin tulipalon sattuessa evakuoitua riittävän nopeasti, jopa virhemarginaalitkin huomioiden. (Magnusson, Frantzich & Harada, 1995; Paloposki, Myllymäki & Weckman, 2002; Weckman, 1997; **Julkaisu III.**)

Käytimme tässä esimerkissä 70% keräämästämme datasta mallin opettamiseen ja 30% mallin testaamiseen. Malli on luonteeltaan itseään parantava, eli data-aineiston lisääntyessä mallin luotettavuus myös kasvaa (Barnes, 2015).

Pilotointia varten toteuttamamme simulointisovellus sisältää myös monipelituen. Tämä mahdollistaa sovelluksen käytön esimerkiksi pelastushenkilöstön tai henkilökunnan yhteistoiminnan koulutusalueena. Jokaisella monipelin pelaajalla voi olla oma roolinsa ja roolin mukainen pelihahmo. Näin he voivat harjoitella kommunikointia ja yhteistoimintaa mahdollisissa hätätilanteissa. **Kuvio 32** havainnollistaa pilotoimaamme tilannetta, jossa tulipalon sattuessa tietyn roolin omaava monipelihahmo on saapunut tapahtumapaikalle ja kohtaa kauppakeskuksen paniikissa pakenevat asiakkaat yrittäen opastaa heitä oman roolinsa mukaisesti. (**Julkaisut II, III ja IV.**)



Kuvio 32. Kauppakeskuksen hätäpoistumisskenaariossa monipelihahmo näkee kauppakeskuksen pakenevat asiakkaat ja yrittää ohjeistaa heitä (**Julkaisut II, III ja IV.**)

Monipeliominaisuuksien hyödyntäminen tämänkaltaiseen toimintaan on mielestämme kehityskelpoinen idea vaikkakin sen rooli jäi tässä pilotoinnissa melko vähäiseksi. Samoja tekniikoita hyödynnettiin myös myöhemmissä pilotoinneissamme.

Pilotoinnin yhteenveto ja tulokset

Pilotoinnin ja siihen liittyvän tutkimuksen pääasiallisena tavoitteena oli testata ideaamme pelillistetyn tietomallin ja pelitekniikoiden

soveltumisesta tämänkaltaiseen simulointiin (**Julkaisut II ja IV**). Samalla halusimme pilotoida myös data-analytiikan ja koneoppimisen tarjoamia mahdollisuuksia tämänkaltaisessa toiminnassa (**Julkaisu III**). Tutkimuksen kohteena oli etsiä ongelmakohtia kauppakeskuksen hätäpoistumisesta ja samalla testata erilaisten hätäpoistumisvaihtoehtojen keskinäistä paremmuutta. Simulaatioissa profiloituja pelihahmoja ohjasi Unity-pelimoottorin tekoäly, joka on suunniteltu matkimaan oikeiden ihmisten käyttäytymistä ennalta määriteltyjen parametrien mukaisesti.

Käyttämämme pelimoottorin tekoälypohjaisen navigoinnin algoritmi perustuu tunnettuun A* -polunjäljitysalgoritmiin (A-tähti), joka olettaa lähtökohtaisesti navigoijan olevan selvillä alueen kartasta ja määränpäänsä sijainnista (Unity Inc, 2019). Tämä ei varmasti aivan täysin vastaa todellisuutta, mutta olemme kuitenkin sitä mieltä, että vastaavuus on riittävä. Yleensä hätäuloskäynnit on merkitty nykyaikaisissa rakennuksissa hyvin ja voimme mielestämme olettaa, että A* -algoritmi vastaa kohtalaisen hyvin poistumiskylttejä (Exit) seuraavan henkilön käyttäytymistä. Myös hätäuloskäynnit sijaitsevat usein rakennuksen pääsisäänkäyntien läheisyydessä ja voidaan mielestämme myös olettaa, että suuri osa rakennuksen käyttäjistä on melko hyvin perillä sijainnistaan suhteessa rakennuksen pääsisäänkäynteihin. Tätä aihetta käsitellään tarkemmin **julkaisussa III**.

Mitä enemmän suorittaisimme simulaatioita, sitä suuremman data-aineiston saisimme kerättyä. Tätä kautta myös tekemämme malli tarkentuisi ja tehtyjen analyysien luotettavuus paranisi. Simuloimalla saadun data-aineiston rinnalla voitaisiin tietysti käyttää myös muista samantyyillisistä kohteista tai todellisista tilanteista saatua vertailutietoa. Mahdollisuuksia on paljon.

Suoritimme pilotointien aikana osallistuvaa havainnointia ideoidemme käyttökelpoisuuden testaamiseksi. Lisäksi selvitimme hankkeen toimijoihin ja yritysyhteistyökumppaneihimme kohdistettujen avointen haastattelujen avulla heidän näkemyksiään, mielipiteitään ja mahdollisia jatkokehitysideoitaan liittyen tietomallin pelillistämiseen ja keksimäni toiminnallisen suunnittelun menetelmän hyödyntämiseen rakennuksen turvallisuuteen liittyvässä suunnittelussa ja simuloinnissa. Lisäksi pyrittiin selvittämään heidän ajatuksiaan tekoälyn ja koneoppimisen menetelmien hyödyntämisestä simulointiin ja tulosten analysointiin. Pilotoinnin tulokset vahvistavat näkemystämme siitä, että pelillistetty tietomalli on käyttökelpoinen tämänkaltaisten simulaatioiden toteutusympäristönä. Lisäksi pilotointi vahvistaa näkemystämme data-analytiikan ja koneoppimisen käyttökelpoisuudesta simulointidatan analysoinnissa ja erilaisten oppivien mallien luomisessa.

Käytimme data-analytiikan ja koneoppimisen työkaluja tässä pilotoinnissa niiden oman käyttöliittymän kautta. Palvelujen päälle olisi myös

mahdollista toteuttaa omia rajapintoja, joiden kautta sovellukset pystyisivät kommunikoimaan suoraan palveluiden kanssa.

Simulointisovelluksen monipelituen hyödyntäminen pelastushenkilöstön ja henkilökunnan koulutukseen on meidän ja yhteistyökumppaneidemme mielestä erittäin kiinnostava ja kehityskelpoinen idea. Tässä pilotoinnissa sen rooli ei kuitenkaan muodostunut kovin suureksi, vaikka sitä testasimmekin. Seuraavissa pilotoinneissamme hyödynsimme samoja tekniikoita mm. pilotoidessamme rakennussuunnittelun joukkoistamista ja ideaamme virtuaalisista työmaakokouksista.

Pienenä sivujuonteena pilotoimme samassa yhteydessä myös ajatustamme rakennusten korjaustarpeen ennakoinnista rakennuksen pelillistetyn tietomallin ja data-analytiikan avulla. Ideassamme pelillistetty tietomalli voisi muodostaa rakennuksen elinkaaren aikaisen digitaalisen kaksosen (Digital Twin) ja tätä kautta kaksisuuntaisen käyttöliittymän esimerkiksi rakennuksen automatiikkaan, raportteihin ja erilaisiin analyysihin. Data-analytiikkaa ja koneoppimista hyödyntäen voitaisiin luoda oppiva malli, joka ennakoisi vertailudataan perustuen esimerkiksi rakennuksen katon korjaustarvetta. Malli voisi käyttää vertailudatana samalla alueella olevien, vastaavanlaisten kattojen materiaali ja kestävyystietoja, sekä alkaa huomauttamaan rakennuksen käyttöliittymän kautta katon mahdollisesta korjaustarpeesta jo hyvissä ajoin ennen kuin katon kestoikä tulee vertailudatan perusteella täyteen. **Kuvio 33** havainnollistaa tätä ideaamme tilanteessa, jossa omakotitalon pelillistetystä tietomallista on tehty talon elinkaaren aikainen digitaalinen kaksonen, jonka kautta omistaja voi kommunikoida talonsa kanssa kaksisuuntaisesti. Tämän pilotoinnin kohderakennus on tietomallista pelillistetty Mikkelin asuntomessuille rakennettu omakotitalo.



Kuvio 33. Rakennuksen pelillistetyn tietomallin päälle tehty rakennuksen digitaalinen kaksonen joka ilmoittaa, että vertailudatan perusteella katto alkaa olemaan korjauksen tarpeessa.

Vaikka tämän pilotoinnin rooli jäi tässä vaiheessa melko vähäiseksi, niin mielestämme data-analytiikan ja vertailudatan hyödyntäminen rakennusten korjaustarpeiden ennakoinnissa on todella kehityskelpoinen ajatus.

4.4 PILOTOINTI 3: TYÖELÄMÄPELI KAUPUNKIMALLIN JA EPÄLINEAARISEN TARINANKERRONNAN MENETELMIEN AVULLA

Kolmantena pilotointina esitellään niin ikään TKI-hankkeeseemme liittyvä kehityshanke, jossa toteutimme Mikkelin kaupungin keskustan avoimen mallin (tietomallin) pelillistämisen avulla monipeliympäristön. Toteutimme pelillistetyn kaupunkikeskustan päälle yhdessä hankkeemme yhteistyökumppaneiden kanssa työelämän oppimispelin, jonka tavoitteena on parantaa aikuisten ihmisten työelämävalmiuksia sekä tietoteknisiä taitoja.

Kehityshanke oli kokonaisuudessaan lähes miljoonan euron suuruinen valtakunnallinen hanke ja hankkeeseen osallistui työnantaja- ja työntekijäjärjestöjä, Työväen Sivistysliitto (TSL), sekä Itä-Suomen yliopisto ja Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. Hanke sisälsi mm. Työväen Sivistysliiton eri paikkakunnilla järjestämää aikuiskoulutusta, sekä työelämätaitoja kehittävän pelin suunnittelun ja toteutuksen.

Meidän tehtävämme oli työelämäpelin suunnittelu ja toteutus. Pelin tuli olla sellainen, että sen pelaaminen kehittää aikuisten, työelämän ulkopuolella olevien henkilöiden työelämä- sekä tietoteknisiä valmiuksia. Erityisenä kohderyhmänä oli henkilöt, jotka ovat jääneet nuorisotakuun ulkopuolelle ja joiden työllistymisen haasteina ovat työelämävalmiuksien ja riittävien tietoteknisten taitojen puuttuminen. Eräänä haasteena työelämäpelin kehitykselle oli myös, että koulutuksessa olevat henkilöt tuli saada osana koulutustaan mukaan pelin kehittämiseen ja testaamiseen.

Aluksi esitellään hieman pilotoinnin lähtökohtia ja taustaa. Seuraavaksi käydään läpi pilotoinnin toteutus ja lopuksi tehdään vielä yhteenveto ja johtopäätöksiä pilotoinnista saamistamme tuloksista. Tämä pilotointi ja sen keskeisimmät tulokset esitetään **julkaisussa VIII**.

Toteuttamamme työelämäpelin logiikka ja tehtävien hallinta toteutettiin epälineaarisen tarinankerronnan työkalulla Twinellä, sen pelimoottori-integraatiota hyödyntäen (Klimas, 2019). Tutkimukset ovat osoittaneet, että tämänkaltaiset välineet sitouttavat, motivoivat ja rohkaisevat oppijoita (Çıralı & Usluel, 2015; Viitanen, Harju, Niemi & Multisilta, 2014). Vielä toistaiseksi pelien sisältämien tarinoiden epälineaarisuuteen keskittyvää tutkimusta on olemassa melko vähän. Tietokonepelien logiikkaa kehitetään harvemmin vielä todellisuudessa epälineaarisen tarinankerronnan menetelmiä hyödyntäen. Menetelmiä käytetään yleensä

vielä toistaiseksi enemmän ohjelmoinnin opettamiseen, kun itse tuotantoon. (esimerkiksi Leutenegger & Edgington, 2007; Topalli & Cagiltay, 2018; Kalelioğlu, 2015.)

Twine ja epälineaarisen tarinankerronnan menetelmät ovat myös keskeisessä roolissa myöhemmissä rakennussuunnittelun joukkoistamista ja virtuaalisia työmaakokouksia käsittelevissä pilotoinneissamme. Epälineaarisen tarinankerronnan menetelmiä ja välineitä, sekä niiden integrointia esimerkiksi pelimoottoreiden tai sosiaalisen median kanssa käsitellään erilaisista näkökulmista väitöskirjan **julkaisuissa V, VI, VII, VIII ja IX.**

Pilotoinnin taustaa

Tehtävänäimme oli siis toteuttaa osana isompaa valtakunnallista hanketta työelämäpeli, jonka suunnitteluun ja toteutukseen hankkeen puitteissa koulutettavat aikuisopiskelijat osallistuisivat. Pelin toteutusprosessinkin tuli siis olla oppimistilanne, johon hankkeen puitteissa koulutettavat aikuiset osallistuisivat. Lisäksi itse pelin tuli olla sellainen, että se innostaa pelaajia ja kehittää heidän työelämätaitojaan, sekä tietoteknisiä valmiuksiaan. Pelin suunnitteluun ja toteutukseen saimme muilta osin melko vapaat kädet. Ainoastaan pelissä kysyttävät, työelämään liittyvät kysymyspatterit saimme yhteistyökumppaneiltamme valmiina.

Hankkeeseen liittyvistä aikuisopiskelijoista osa oli Mikkelistä ja käytössämme oli Mikkelin kaupungin keskustan avoin 3D-malli (tavallaan tietomalli), joten päädyimme pelillistämään Mikkelin keskustan 3D-mallin ja luomaan työelämäpelin sen pohjalta. Mikkelin keskusta oli myös tuttu paikka suurelle osalle hankkeen aikuiskoulutukseen osallistuvista henkilöistä, joten tämä ideamme sai myös heiltä innostuneen vastaanoton. Toki päätimme toteuttaa pelillistämisen siten, että peliympäristö on vaihdettavissa esimerkiksi jonkun toisen kaupungin keskustan tai muun vastaavan kohteen 3D-malliin. Päätimme lisäksi toteuttaa työelämäpelistä monipeliversioiden, jolloin kommunikointi muiden pelaajien ja esimerkiksi ohjaajien kanssa olisi pelimaailmassa mahdollista. Lisäksi monipelituki mahdollistaa mm. oikeat työpaikkahaastattelut ja vastaavat tapahtumat pelimaailmassa.

Eräs haaste oli hankkeessa olevien aikuisopiskelijoiden saaminen pelin suunnitteluun ja kehitysprojektiin aidosti mukaan. Halusimme luoda kehitysympäristön, jossa aikuisopiskelijat voisivat osallistua peliprojektiin ilman erityistä pelinkehitystekniikoiden tuntemusta tai ohjelmointitaitoa. Päädyimme ajatukseen, että voisiko työelämäpelin tehtävien laadinnan ulkoistaa itse pelistä siten, että pelin kulku ja tehtävät voitaisiin määrittellä pelimoottoreiden ulkopuolella. Pelilogiikkaa ja tehtävät voitaisiin sitten tuoda valmiina käytettävään pelimoottoriin.

Halusimme pelin ja sen kehitysprosessin olevan modulaarinen, jossa on episodinen rakenne. Eli pelin eri osat liittyvät löyhästi toisiinsa, mutta muodostavat silti kokonaisuuden. (Baranowski, Buday, Thompson & Baranowski, 2008.) Halusimme myös toteuttaa peliympäristöstä vapaan ja avoimen, jotta se muistuttaisi mahdollisimman hyvin todellista maailmaa. Tällöin pelaajilla on hyvin vapaat kädet tutkia maailmaa ja edetä siellä haluamallaan tavalla (Juul, 2002). Erilliset tehtävät ovat ikään kuin minipelejä työelämäpelin sisällä ja niissä keskitytään aina tiettyyn opiskeltavaan aiheeseen. (De Jans, Geit, Cauberghe, Hudders & De Veirman, 2017.)

Päädymme tätä kautta hyödyntämään epälineaarisen tarinankerronnan menetelmiä ja työkaluja. Vertailtuamme eri vaihtoehtoja päädyimme käyttämään hankkeessamme Twineä (Klimas, 2019). Twineä voidaan käyttää suoraan selaimella ja Twinestä löytyy myös tarvitsemamme pelimoottori-integraatio. Twineä käyttämällä hankkeeseen osallistuneet aikuisopiskelijat pystyivät laatimaan pelilogiikkaa ja tehtäväsarjoja suoraan Twinen selainkäyttöisen käyttöliittymän avulla. Valmis logiikka ja tehtävät voitiin viedä suoraan esimerkiksi tässä käyttämäämme Unity-pelimoottoriin Unityn tarjoaman valmiin Twine-tuen ansiosta (**Julkaisut VI ja IX**).

Halusimme toteuttaa pelimaailmaan myös monipelituen, jotta pelaajat voisivat kohdata toisiaan pelimaailmassa ja harjoitella esimerkiksi erilaisia työelämässä tarvittavia kommunikointitaitoja. Tätä kautta pelimaailmassa voitaisiin myös järjestää esimerkiksi työhaastatteluja tai kielten opiskelua siten, että keskustelukumppaneina olisi aitoja ihmisiä.

Pilotoinnin kohderyhmä ja toteutusympäristö

Pilotoinnin kohderyhmänä olivat ”Työelämän digiosaaja”-hankkeemme työntekijät, sekä hankkeen yhteistyökumppaneidemme edustajat. Lisäksi kohderyhmänä olivat ”Työelämän digiosaaja”-hankkeen työelämäkoulutettavien aikuisten ryhmä, joka oli kooltaan 14 opiskelijaa. Tarkempi kuvaus hankkeen osallistujista ja yhteistyökumppaneista löytyy tämän luvun alusta. Pilotoinnissa toteuttamamme käytännön artefaktin toteutukseen osallistui itseni lisäksi kaksi hankkeen muuta työntekijää ja viisi hankkeen yhteistyökumppaneiden työntekijää eri rooleissa. Lisäksi toteutukseen osallistui koko toteutuksen ajan kaikki ”Työelämän digiosaaja”-hankkeen työelämäkoulutettavat aikuiset, sekä heidän opettajansa.

Artefakti toteutettiin monipeliympäristönä kehittämäämme Open BIM -standardin mukaisen tietomallin pelillistämisen menetelmää soveltaen Mikkelin kaupungin keskustan 3D-mallista. Lisäksi artefaktiin toteutettiin epälineaarisen tarinankerronnan menetelmiä ja työkaluja hyödyntäen työelämätaitoja kehittäviä tehtäviä sekä minipelejä. Hankkeen aikuiskoulutettavat osallistuivat työelämäpelin ideointiin ja kehittämiseen.

He kehittivät myös työelämäpeliin tehtäviä ja toimintalogiikkaa epälineaarisen tarinankerronnan työkalujen ja menetelmien avulla. Kaikki toimijat suorittivat myös koko pilotoinnin ajan osallistuvaa havainnointia.

Pilotoinnin viimeisenä vaiheena suoritettiin toteutetun artefaktin katselmus. Katselmukseen osallistuivat käytännössä kaikki ”Työelämän digiosaaja”-hankkeen työntekijät, sekä hankkeen yhteistyökumppaneiden edustajat. Lisäksi katselmukseen osallistui koko ”Työelämän digiosaaja”-hankkeen työelämäkoulutettavien aikuisten ryhmä. Yhteensä osallistujia oli n. 25 henkilöä.

Katselmuksessa käytiin läpi artefaktin toiminnallisuus ja sen taustalla olevat ideat ja innovaatiot. Lisäksi katselmuksessa pelattiin työelämäpeliä sekä yksinpelinä, että myös monipelinä. Tämän jälkeen suoritettiin kaikkiin katselmointiin osallistuneisiin henkilöihin kohdistettu avoin keskustelutyypinen haastattelu, jonka avulla pyrittiin selvittämään heidän näkemyksiään, mielipiteitään ja mahdollisia jatkokehitysideoitaan. Lisäksi hankkeen aikuiskoulutettavien ryhmään kohdistettiin teemahaastattelu, jonka avulla pyrittiin vielä saamaan heiltä lisää näkemyksiä ja mielipiteitä, sekä jatkokehitysideoita hankkeesta. Käytännössä näihin haastatteluihin osallistuneiden henkilöiden otos oli koko hankkeen aktiivisten toimijoiden ja opiskelijoiden ryhmä. Yhteensä avoimeen haastatteluun osallistui n. 25 henkilöä eri rooleissa ja teemahaastatteluun osallistui 13 henkilöä. Otosta voidaan mielestäni pitää melko edustavana myös tulosten yleistettävyyden näkökulmasta.

Pilotoinnin toteutus

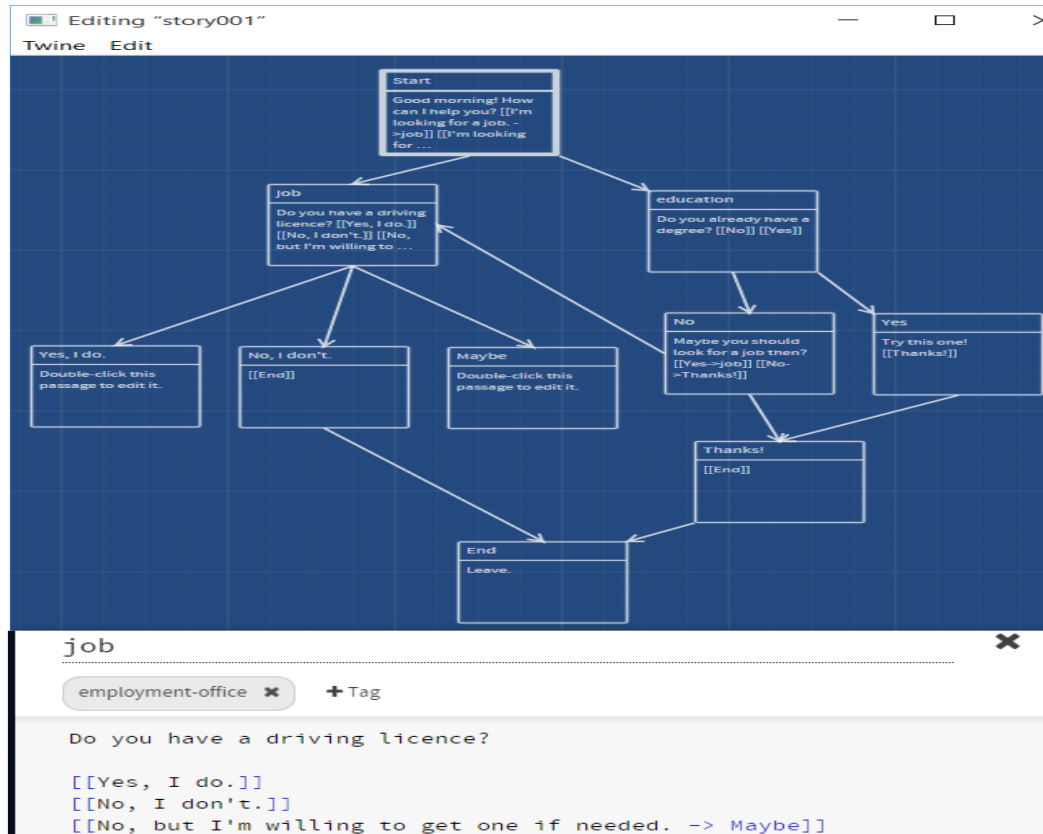
Pelillistimme Mikkelin kaupungin keskustan avoimen 3D-mallin Unity-pelimoottorin avulla ja toteutimme siihen suunnitellun monipelituen käyttämämme pelimoottorin tarjoamia valmiita monipelikomponentteja hyödyntäen. **Kuvio 34** havainnollistaa Pelillistettyä kaupunkimallia tilanteessa, jossa Third Person Controller -tyyppinen pelihahmo on Mikkelin torilla katselemassa kaupungintalon suuntaan (**Julkaisu VIII**).



Kuvio 34. Pelillistetetyssä Mikkelin keskustan kaupunkimallissa pelihahmo seisoo Mikkelin torilla ja katselee kaupungintalon suuntaan (**Julkaisu VIII**).

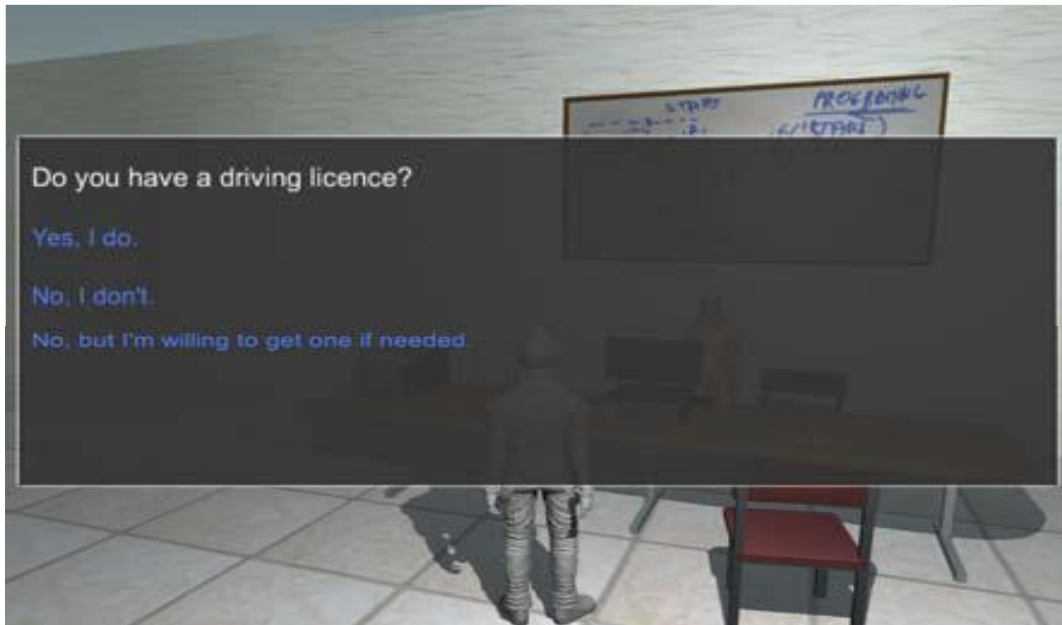
Toteutimme pelillistetyn kaupunkimallin avulla työelämäpelin siten, että Mikkelin kaupungin keskusta toimii pelin käyttöliittymänä. Toteutimme työelämäpelin tehtävät Twinen avulla siten, että tehtävien ja tehtäviin liittyvän logiikan laatiminen tapahtui Twinen verkkopohjaisilla työkaluilla erillään itse pelistä. Tällä tavoin pystyimme ottamaan hankkeen aikuisopiskelijat työelämäpelin suunnitteluun ja toteutukseen mukaan ilman, että heidän täytyi perehtyä peliohjelmointiin ja peliohjelmoinnin välineisiin. Tämä on erittäin tärkeää, jotta kaikki osallistujat saatiin sitoutettua aidosti projektiin mukaan ja he kokivat olevansa tärkeä osa projektitiimiä. (All, Van Looy & Castellar, 2013; Bossavit & Parsons, 2016; Cosma et al, 2015).

Twinen käyttöliittymä on hyvin intuitiivinen ja helposti opittava. Sitä on jopa käytetty erilaisissa lapsille suunnatuissa kirjoituspajoissa. (Davis, 2013.) Seuraava kuva (**Kuvio 35**) havainnollistaa tilannetta, jossa Twinen omalla käyttöliittymällä ja Twinen omalla graafisella määrittelykielellä on määritelty tehtävä ja tehtävään liittyvä logiikka vastausvaihtoehtoineen. Kuvan alareunassa näkyy myös osa Twinen kehitystyökalujen määrittelemästä ohjelmakoodista, joka on luotu automaattisesti kuvan yläosassa näkyvän graafisen ohjelmointikielen avulla. Tarvittaessa ohjelmalogiikka on myös mahdollista kirjoittaa suoraan Twinen tarjoamalla ohjelmointikielillä, mikäli se tuntuu graafista ohjelmointikieltä houkuttelevammalta vaihtoehdolta (**Julkaisut V, VI, VII, VIII ja IX**).



Kuvio 35. Epälineaarisen tarinankerronnan työkalulla Twinellä laadittu tehtävä, sekä tehtävään liittyvä logiikka vastausten käsittelemiseksi (**Julkaisu VIII**).

Twinellä laadittu tehtävä ja siihen liittyvä toimintalogiikka voidaan tuoda Twinen pelimoottorituen ansiosta suoraan Unity-pelimoottoriin haluttuun kontekstiin ja toteuttaa sille Unityssä tarkoituksenmukainen käyttöliittymä. **Kuvio 36** havainnollistaa tilannetta, jossa edellinen tehtävä on tuotu Uniy-pelimoottoriin tilanteessa, jossa harjoituksen aiheen on esimerkiksi työpaikkahaastattelu.



Kuvio 36. Aikaisemmin Twinellä laadittu tehtävä ja tehtävään liittyvä pelilogiikka tuotuina Unity-pelimoottoriin (**Julkaisut VIII**).

Monipelituen ansiosta työelämäpelin avulla voidaan myös harjoitella esimerkiksi erilaisia työelämän vuorovaikutustilanteita suoraan toisten pelaajien kanssa. Pelin avulla voitaisiin toteuttaa esimerkiksi todellisia työhaastatteluja tai harjoitella niitä siten, että kumpikin haastattelun osapuoli olisi aitoja ihmisiä.

Pilotoinnin yhteenveto ja tulokset

Pelejä ja pelillisyyttä voidaan hyödyntää monenlaisessa oppimistehtävissä, sekä hyvin erityyppisissä koulutuksissa. Pelit tarjoavat aktiviteettien myötä hyvin vuorovaikutteisen ja motivoivan oppimisympäristön. Yleensä tämäntyyppiset pelit on luotu perinteisillä ohjelmistojen kehitysmenetelmillä ja tekniikoilla. Tässä hankkeessa tavoitteena oli luoda työelämäpeli joidenkin työelämän perustietojen ja taitojen opiskeliseksi aikuisopiskelijoille. Aihe on melko epätavallinen ja saimme myös hyvin vapaat kädet pelin ideointiin ja kehittämiseen.

Ehkä merkittävin ennalta määritelty asia oli vaatimus hankkeeseen liittyvien, tieto- ja taitotasoiltaan hyvin erilaisten aikuisopiskelijoiden saaminen työelämäpelin suunnitteluun ja toteutukseen aidosti mukaan. Lisäksi halusimme ottaa pelikehitykseen mukaan ohjelmointitaitoisia korkeakouluopiskelijoita. Näistä lähtökohdista lähdimme kehittämään työelämäpeliä siten, että peliohjelmointitaitoja omaamattomat

aikuisopiskelijat suunnittelivat Twinellä tehtäviä ja niihin liittyvää toimintalogiikkaa Twinen omilla työkaluilla. Tällä tavoin kuka tahansa henkilö pystyi ilman erityistaitoja lyhyen perehtymisen jälkeen kehittämään aidosti peliin tehtäviä ja vuorovaikutusta. Tehtävät ja niihin liittyvät logiikat lisättiin myöhemmin itse peliin. Ideoimme myös pelistä sellaisen, että osaan tehtäviä voi sisältyä erillisiä, itse pääpeliin integroituja minipelejä. Minipelit voivat myös olla työelämäpelin palkintoja. Kehitimme työelämäpelin rakenteesta sellaisen, että minipelejä voidaan toteuttaa erillään ja lisätä jälkikäteen työelämäpeliin. Minipelien, samoin kuin työelämäpelin suunnitteluun osallistuivat kaikki projektiin kuuluvat toimijat, mutta niiden toteutus jäi lähinnä hankkeessa mukana olleiden korkeakouluopiskelijoiden ja työelämäpelin peliohjelmoijien vastuulle. **Kuviossa 37** näkyy joukko projektiin osallistuneita aikuisopiskelijoita, sekä muita projektin toimijoita kokoontuneena hankkeen opetustiloihin testaamaan ja ideoimaan työelämäpeliä.



Kuvio 37. Hankkeen toimijoita testaamassa ja ideoimassa työelämäpeliä (Julkaisu VIII).

Saimme paljon erilaisia toimijoita integroitua projektiin mukaan. Tällä tavoin saimme hyvin erilaisia näkökulmia kehitystyöhön mukaan ja tätä kautta rikasta pelisisältöä. Myös itse pelinkehitysprosessi toimi mielestämme erittäin hyvänä oppimisympäristönä erilaisille oppijoille. Samalla kaikki opiskelijat oppivat myös tietokoneen käytön perustaidot, mikäli niissä oli aiemmin puutteita. Voidaankin mielestämme todetta, että joukkoistamalla pelinkehitys tällä tavalla, saadaan luotua hyvin rikasta ja monipuolista pelisisältöä, sekä saadaan muidenkin kuin ohjelmoijien arvokkaat näkemykset kehitysprojektiin aidosti mukaan.

Huomasimme projektin aikana, kuinka mukana olleiden aikuisopiskelijoiden itseluottamus ja innostus kasvoivat tietoteknisten valmiuksien kehittymisen myötä. Projektin edetessä myös osallistujien innostus projektia kohtaan kasvoi merkittävästi. Projektiin osallistuneet

henkilöt olivat hyvin ylpeitä saavutetusta lopputuloksesta riippumatta siitä, mikä heidän roolinsa projektissa oli ollut. Tämä olikin yksi koko hankkeen keskeisimmistä tavoitteista. Osallistuvan havainnoinnin lisäksi teimme avoimen keskustelutyypin haastattelun, joka kohdistettiin projektiin osallistuneisiin aikuisopiskelijoihin ja muihin projektin toimijoihin. Haastattelun avulla pyrimme selvittämään hankkeeseen osallistuneiden näkemyksiä ja mielipiteitä itse hankkeesta, sekä hankkeessa kehitetystä työelämäpelistä. Lisäksi selvitimme heidän näkemyksiään ja mielipiteitään liittyen työelämäpelin kehitysprosessiin ja kaupunkimallin pelillistämiseen, sekä epälineaarisen tarinankerronnan menetelmien ja välineiden hyödyntämisestä pelien suunnittelussa yhdessä monipelitekniikoiden kanssa.

Toteutimme myös projektiin osallistuneisiin aikuisopiskelijoihin kohdistetun teemahaastattelun, jossa keskeisinä teemoina olivat heidän omat kokemuksensa projektista ja kokemuksensa tämänkaltaisesta työskentelystä. Lisäksi haastatteluteemana oli heidän oma näkemyksensä omasta oppimisestaan ja IT-valmiuksiensa parantumisesta projektin aikana. Haastattelut vahvistivat edellä esitettyjä näkemyksiämme projektin onnistumisesta ja epälineaarisen tarinankerronnan menetelmien ja työkalujen soveltuvuudesta tarinan kulun ohjaamiseen pelimootorissa. Menetelmät mahdollistavat myös sellaisten henkilöiden mukaan saamisen pelien toiminnan suunnitteluun, joiden valmiudet eivät itse peliohjelmoinnin näkökulmasta ole riittävät peliprojektiin osallistumiselle.

Havaitsimme myös projektin aikana, että Twine ja vastaavat epälineaarisen tarinankerronnan työkalut sopivat erinomaisesti kaikenlaiseen joukkoistettuun suunnitteluun. Samalla ajatuksemme niiden hyödyntämisestä esimerkiksi rakennussuunnittelun joukkoistamisessa tai virtuaalisten työmaakokousten kulun määrittämisessä vahvistui. Esimerkiksi virtuaalisen työmaakokouksen järjestäjä voisi etukäteen laatia Twinellä kokouksen esityslistan, jonka kaikki kokoukseen osallistujat näkisivät ja joka ohjaisi kokouksen kulkua. Kokouksen pöytäkirja voitaisiin myös kirjoittaa automaattisesti tehtyjen päätösten perusteella Twinellä määritellyn logiikan avulla. Samoin voitaisiin hallita mitä tahansa monipelitapahtumaa virtuaaliympäristössä.

4.5 PILOTOINTI 4: SUUNNITTELUN JOUKKOISTAMINEN JA VIRTUAALISET TYÖMAAKOKOUKSET

Viimeisenä pilotointina esitellään VIRRake-hankkeessa (VIRRake, 2019) (Virtuaalinen Rakentaminen) toteuttamamme tietomallien pelillistämistä helpottava VIRRake-sovellusalusta (VIRRake, 2020), sekä sen kanssa tekemämme pilotoinnit. VIRRake-sovellusalusta on toteutettu Unreal Engine -pelimootorin avulla (Unreal Engine Website, 2019). VIRRake-sovellusalusta on yleinen VR-tuella varustettu monipelialusta, joka on

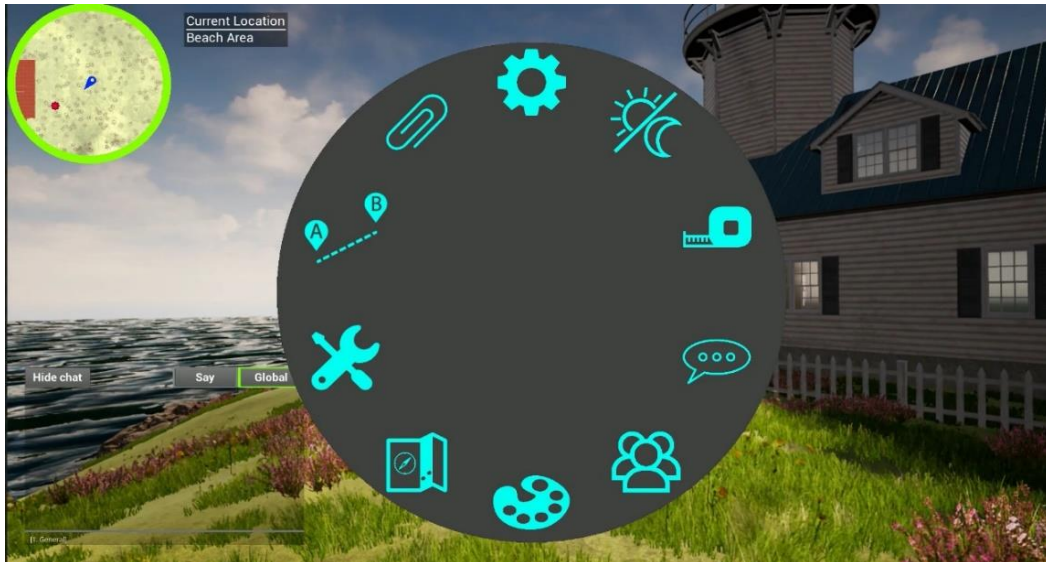
tarkoitettu nopeuttamaan erilaisten tietomallien pelillistämistä. Pilotoimme Virrake-alustan avulla esimerkiksi rakennussuunnittelun joukkoistamista, sekä virtuaalisia työmaakokouksia. Samalla esitellään myös muita suunnittelun joukkoistamiseen ja virtuaalisiin työmaakokouksiin liittyviä ideoitamme ja pilotointejamme. Hieman vastaavanlaisia tietomallien pelillistämiseen tarkoitettuja ideoita ja sovellusalustoja on esitelty muitakin, kuten esimerkiksi Nandavar, Petzold, Nassif, Schubert, Gerhard & Ag (2018) julkaisussaan esittelemä idea hieman vastaavanlaisen alustan prototyypistä. Tarpeemme olivat tässä tapauksessa kuitenkin sellaisia, että valmista ratkaisua ei löytynyt, joten päädyimme toteuttamaan oman sovellusalustan.

Aluksi luvussa esitellään pilotointien ja kehittämämme Virrake-sovellusalustan lähtökohtia ja taustaa. Seuraavaksi käydään läpi tekemiemme pilotointien toteutus ja lopuksi tehdään vielä yhteenveto ja johtopäätöksiä pilotoinneista ja niistä saamistamme tuloksista. Virrake-sovellusalustaa ja sen käyttöä eri tilanteissa käsitellään **julkaisussa X**.

Pilotoinnin taustaa

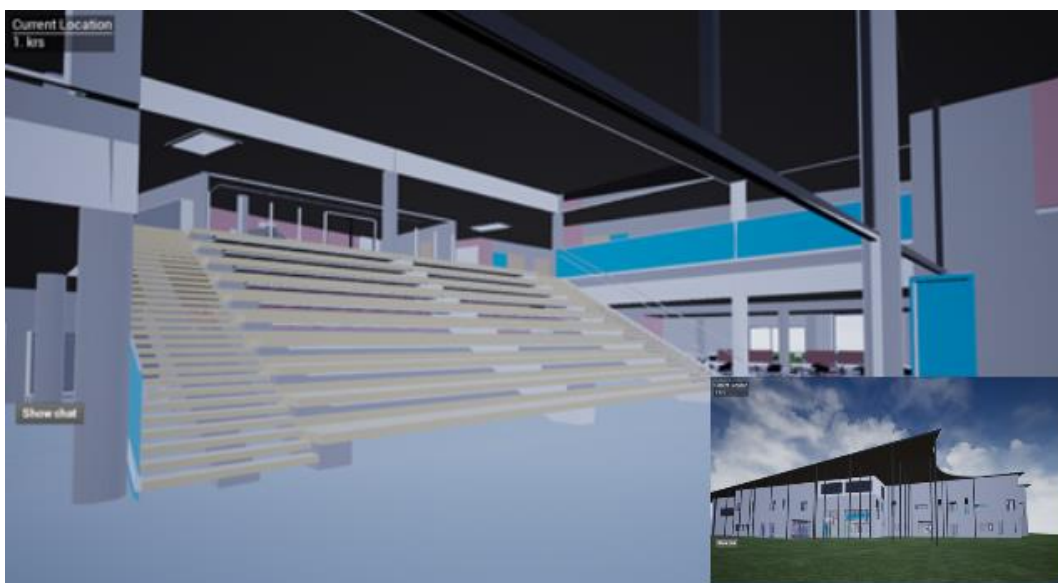
Olimme jo aiemmissa pilotoinneissamme hyödyntäneet pelimoottoreiden tarjoamia monipelitekniikoita eri tavoin. Olimme hankkeisiimme liittyvien pilotointien myötä vakuuttuneet yhdessä yhteistyökumppaneidemme kanssa tietomallin pelillistämisen tarjoamista hyödyistä ja mahdollisuuksista. Tämän innoittamana päätimme kehittää Virrake-hankkeemme puitteissa valmiin sovellusalustan, joka helpottaisi tietomallien pelillistämistä tarjoten valmiina pelillistämisen perustoiminnallisuuden. Lisäksi päätimme toteuttaa Virrake-sovellusalustaan joukon pidemmälle vietyjä ominaisuuksia, kuten esimerkiksi suunnittelun joukkoistamisen mahdollistavan monipelituen. Virrake-alusta päätettiin kehittää sellaiseksi, että sen käyttö onnistuu joko näytön tai VR-lasien kautta.

Lisäksi alustaan päätettiin toteuttaa tuet sekä tekstimuotoiselle, että suoraan puhumalla tapahtuvalle käyttäjien väliselle kommunikoinnille. Alustaan päätettiin toteuttaa myös joukko erilaisia suunnittelua ja kommunikointia helpottavia työkaluja, kuten esimerkiksi suunnittelun joukkoistamista helpottava äänestystyökalu, sekä erilaisia navigointia ja mittaamista helpottavia työkaluja. Tällä tavoin päästiin tilanteeseen, jossa tietomallien pelillistäminen on nopeaa, eikä vaadi välttämättä kovin syvällistä peliohjelmoinnin osaamista, kun ei "samaa pyörää" tarvitse keksiä joka kerta uudestaan. **Kuvio 38** havainnollistaa sovellusalustan käyttöliittymää tilanteessa, jossa käyttäjän eteen on aukaistu kehittämämme ympyrän muotoinen, hierarkkinen valikkosysteemi (**Julkaisu X**).



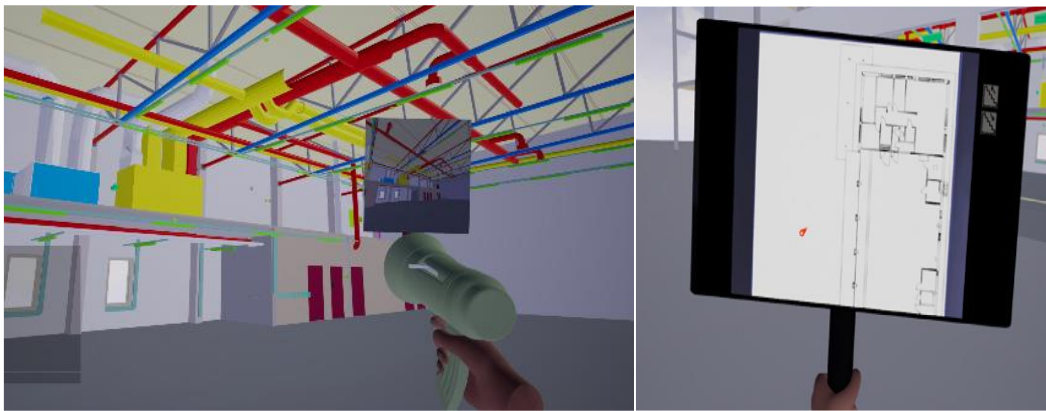
Kuvio 38. Virrake-sovellusalustaan kehitetty valikkosysteemi on avattuna Virrake-alustan avulla pelillistetyssä tietomallissa (Julkaisu X).

Olimme kehittäneet jo aiemmin idean rakennussuunnittelun joukkoistamisesta pelillistetyn tietomallin ja monipelitekniikoiden avulla. Pilotoimme tätä ideaa Virrake-alustan prototyypin avulla joukkoistamalla yhteistyökumppanimme Pieksämäelle toteuttaman Hiekanpään koulukeskuksen ruokalan kalustesuunnittelu siten, että koulun oppilaat pääsivät äänestämään erilaisten ruokalan kalustevaihtoehtojen välillä. Pilotoinnissa hyödynnettiin Virrake-sovellusalustaan sisäänrakennettua äänestystyökalua. Samassa yhteydessä koulun oppilaat ja henkilökunta pääsivät myös tutustumaan tulevaan kouluunsa ja ottamaan kantaa yleisemminkin rakennuksen suunnitelmaan. Käytössä olivat myös VR-lasit. **Kuviossa 39** näkyy Hiekanpään koulukeskuksen Virrake-sovellusalustan avulla pelillistetty tietomalli (Construction Company U. Lipsanen Oy, 2019; **Julkaisu X**).



Kuvio 39. Hiekanpään koulukeskuksen tietomalli pelillistettynä Virrake-sovellusalustan avulla (Construction Company U. Lipsanen Oy, 2019; **Julkaisu X**).

Toinen Virrake-sovellusalustan kanssa pilotoimamme asia oli ideamme virtuaalisista työmaakokouksista kohteen pelillistetyssä tietomallissa. Toteutimme hankkeen toimijoiden kesken pilotoinnin, jossa useat hankkeen toimijat tapasivat toisensa Virrake-sovellusalustan avulla pelillistetyssä tietomallissa ja testasivat yhteistä kokoontumista ja Virrake-sovellusalustan tarjoamia työkaluja. Tällä kertaa kohteena oli hankkeen yhteistyökumppanimme suunnittelema paloasema, jonka pelillistimme suoraan kohteen tietomallista Virrake-alusta avulla. Osallistujien välinen kommunikointi hoidettiin alustan tarjoamalla tekstipohjaisella chatillä ja ääniviesteillä, joita alusta myös tukee. Osalla osallistujista oli myös VR-lasit käytössään. **Kuviossa 40** näkyy pilotoinnissa käyttämämme paloaseman Virrake-sovellusalustan avulla pelillistetty tietomalli (**Julkaisu X**).



Kuvio 40. Pilotoinnissa käyttämämme paloaseman pelillistetty tietomalli ja Virrake-sovellusalustan tarjoamia työkaluja (**Julkaisu X**).

Kuvassa näkyy myös kaksi Virrake-alustan tarjoamaa valmista työkalua, jotka ovat virtuaalinen kamera ja navigointia helpottava 2D-kartta (**Julkaisu X**).

Pilotoinnin kohderyhmä ja toteutusympäristö

Tähän pilotointiin liittyen toteutimme kaksi erillistä artefaktia. Ensimmäisenä artefaktina pelillistimme yhteistyöyrityksemme Pieksämäelle rakentaman Hiekanpään koulukeskuksen tietomallin ja tutkimme sen avulla suunnittelun joukkoistamista tarjoamalla koulun yhden luokan oppilaille ja heidän opettajilleen mahdollisuuden äänestää koulukeskuksen ruokalan kalustuksesta kolmen ennalta laaditun vaihtoehdon välillä. Toisena artefaktina pelillistimme yhteistyöyrityksemme suunnitteleman paloaseman tietomallin ja tutkimme sen avulla ideamme suunnittelun joukkoistamisesta ja esimerkiksi virtuaalisesta työmaakokouksesta pelillistettyn tietomallin ja monipelitekniikoiden avulla. Samalla pääsimme myös testaamaan molempien artefaktien avulla kehittämämme Virrake-sovellusalustan tarjoamia työkaluja ja soveltuvuutta tämänkaltaiseen toimintaan.

Koulukeskukseen liittyvän pilotoinnin kohderyhmänä olivat Virrake-hankkeemme työntekijät, sekä hankkeen yhteistyöyritysten edustajat. Lisäksi kohderyhmänä olivat pilotoinnin kohteena olleen hiekanpään koulun yksi luokka opettajineen. Yhteensä n. 30 oppilasta ja muutama henkilökunnan jäsen. Pilotoinnissa rakennetun käytännön artefaktin ideointiin ja toteutukseen osallistui itseni lisäksi kaksi hankkeen muuta työntekijää ja kolme hankkeen yhteistyöyritysten työntekijää eri rooleissa. Kaikki suorittivat pilotoinnin aikana osallistuvaa havainnointia.

Suoritimme aluksi koulukeskuksen artefaktin katselmuksen. Katselmukseen osallistuivat käytännössä kaikki Virrake-hankkeen työntekijät, sekä hankkeen yhteistyöyritysten edustajat. Katselmuksessa käytiin läpi artefaktin toiminnallisuus ja sen taustalla olevat ideat ja innovaatiot. Tämän jälkeen suoritettiin kaikkiin katselmointiin osallistuneisiin henkilöihin kohdistettu avoin keskustelutyypinen haastattelu, jonka avulla pyrittiin selvittämään heidän näkemyksiään, mielipiteitään, sekä mahdollisia jatkokehitysideoitaan.

Testasimme lisäksi artefaktin avulla ideaamme joukkoistetusta suunnittelusta antamalla Hiekanpään koulun oppilaille mahdollisuuden olla monipelimoodissa omilla avatar-hahmoillaan tulevan koulunsa pelillistetyssä tietomallissa, sekä äänestää tulevan koulunsa ruokalan kalustus kolmesta valmiista vaihtoehdosta hyödyntäen Virrake-sovellusalustan äänestystyökalua. Tämän jälkeen suoritimme äänestykseen osallistuneisiin oppilaisiin ja koulun henkilökunnan edustajiin kohdistetun teemahaastattelun, jonka avulla selvitimme heidän näkemyksiään ja mielipiteitään pilotoinnista. Selvitimme myös heidän näkemyksiään mahdollisesta jatkokehityksestä.

Koulukeskuksen artefaktiin liittyen hankkeen työntekijöihin ja yhteistyöyritysten edustajiin kohdistetun avoimen haastattelun otos oli yhdeksän henkilöä. Käytännössä otos oli koko hankkeen aktiivisten toimijoiden ryhmä. Hiekanpään koulun oppilaisiin ja henkilökuntaan kohdistetun teemahaastatteluun osallistujien lukumäärä oli kokonaisuudessaan n. 35 henkilöä. Otosta voidaan mielestäni pitää melko edustavana tulosten yleistettävyyden näkökulmasta.

Paloasemaan liittyvän pilotoinnin kohderyhmänä olivat Virrake-hankkeemme työntekijät, sekä hankkeen yhteistyöyritysten edustajat. Pilotoinnissa rakennetun käytännön artefaktin ideointiin ja toteutukseen osallistui itseni lisäksi kaksi hankkeen muuta työntekijää ja viisi hankkeen yhteistyöyritysten työntekijää eri rooleissa.

Suoritimme paloaseman artefaktin katselmuksen ja samalla testasimme artefaktin avulla Virrake-sovellusalustan tarjoamia työkaluja, sekä alustan soveltuvuutta rakennussuunnittelun joukkoistamiseen. Katselmointiin ja joukkoistamisen testaukseen osallistuivat käytännössä lähes kaikki

Virrake-hankkeen työntekijät, sekä hankkeen yhteistyöyritysten edustajat. Katselmoinnin ja testauksen jälkeen suoritettiin kaikkiin katselmointiin ja testaukseen osallistuneisiin henkilöihin kohdistettu avoin keskustelutyypinen haastattelu. Haastattelun avulla pyrittiin selvittämään heidän näkemyksiään, mielipiteitään ja mahdollisia jatkokehitysideoitaan liittyen Virrake-sovellusalustaan ja sen käyttöön.

Paloaseman artefaktiin liittyen hankkeen työntekijöihin ja yhteistyöyritysten edustajiin kohdistetun avoimen haastattelun otos oli 14 henkilöä. Käytännössä otos oli koko hankkeen aktiivisten toimijoiden ryhmä. Hankkeen yhteistyöyritykset edustavat melko laajasti koko rakennusalaan, joten otosta ja tuloksia voidaan mielestäni pitää melko edustavina tulosten yleistettävyydenkin näkökulmasta.

Pilotoinnin toteutus

Rakensimme koulukeskuksen pelillistettyyn tietomalliin pilotointia varten valmiiksi kolme erilaista skenaariota, joiden välillä oppilaat pääsivät äänestämään tulevan koulunsa ruokalan kalustuksesta. Äänestys toteutettiin Virrake-sovellusalustan tarjoamalla äänestystyökalulla, josta löytyy myös työkalut äänestystuulosten hallintaan ja analysointiin. Jo nykyisin on hyvin tavallista, että kalustevalmistajilta löytyy valmiit 3D-mallit heidän tarjoamistaan kalusteista. Parhaassa tapauksessa kalustemallit ovat jo valmiiksi Open BIM -yhteensopivassa formaatissa. Tässäkin tapauksessa saimme skenaarioissa käyttämämme kalusteiden 3D-mallit hankkeen kalustetoimittajalta. Toki jouduimme niitä jonkin verran muokkaamaan toteuttaessamme vaihtoehtoisia skenaarioita.

Pilotoinnissamme kalustetoimittaja oli jo valittu etukäteen. Optimaalisessa tilanteessahan skenaariot sisältäisivät eri kalustevalmistajien kalusteita, jolloin valintatilanne olisi myös kalustetoimittajan osalta aito. Tällaisessa tapauksessa pilotointi olisi pitänyt toteuttaa aikataulullisesti huomattavasti aikaisemmin, jolloin kalustetoimittajaa ei olla vielä päätetty. Toki tässäkin tilanteessa valintatilanne oli aito ennalta valitun kalustetoimittajan tarjoamien kalustevaihtoehtojen osalta. Saimme apuja rakennushankkeen toimijoilta ja kalustetoimittajalta vaihtoehtoisten skenaarioiden toteutuksessa. Tätä kautta saimme kaikista vaihtoehtoista todellisia ja toteuttamiskelpoisia.

Kuviossa 41 näkyy toteuttamamme äänestys ja eräs äänestyksen kohteena olleista koulukeskuksen ruokalan kalustusvaihtoehtoista. Koulun oppilaat pystyivät helposti vaihtamaan ruokalan kalustusvaihtoehtoa ja näin tekemään vertailuja niiden välillä. Kalustevalmistajat pystyvät jo nyt melko yleisesti tarjoamaan kalusteidensa valmiit 3D-mallit suunnittelijoiden käyttöön. Tulevaisuudessa tämä tulee varmasti olemaan myös kalustetoimittajille kilpailuetu.



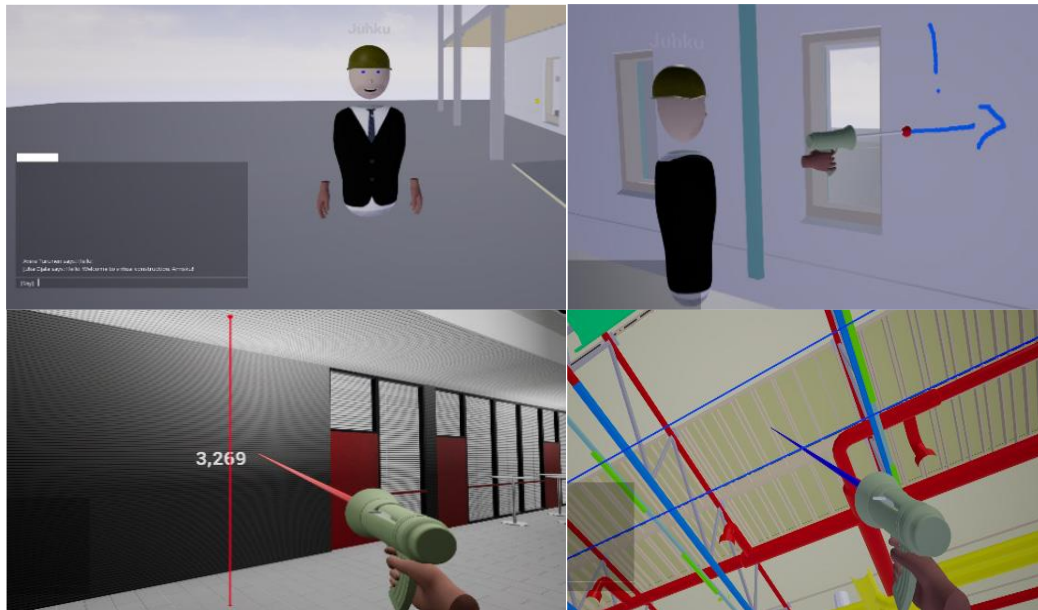
Kuvio 41. Kuvassa Hiekanpään koulukeskuksen ruokalan kalustus on äänestyksen kohteena äänestystyökalun avulla suoritettavassa äänestyksessä (Julkaisu X).

Virrake-sovellusalusta on suunniteltu helppokäyttöiseksi, eli pilotointiin osallistuneet koulun oppilaat ja henkilökunta pystyivät pienen perehdyttämisen jälkeen toimimaan pelillistetyssä tietomallissa. Tämä johtunee osaltaan myös oppilaiden ja henkilökunnan motivaatiosta ja melko hyvistä tietoteknisistä valmiuksista.

Toisessa pilotoinnissa pilotoimme Virrake-alustan tarjoamia mahdollisuuksia suunnittelun joukkoistamiseen yleisesti ja myöskin ideoimamme virtuaalisten työmaakokousten toteuttamiseen. Tässä pilotoinnissa käytimme myös kohteena hankkeen yhteistyökumppanimme suunnittelemaa paloasemaa ja sen pelillistettyä tietomallia. Samassa yhteydessä testasimme myös Virrake-sovellusalustan tarjoamia valmiita, suunnittelua helpottavia työkaluja ja niiden toimivuutta monipelikäytössä. Pilotointia varten joukko yhteistyökumppaneidemme edustajia ja muita hankkeen toimijoita kokoontui omilla avatar-hahmoillaan samanaikaisesti paloaseman pelillistettyyn tietomalliin.

Pilotoinnissa testattiin rakennussuunnittelun joukkoistamisen ja virtuaalisten työmaakokousten ideaa ja toimivuutta, sekä niiden vaatimia tekniikoita käytännössä Virrake-sovellusalustan näkökulmasta. Seuraavassa on Virrake-sovellusalustan sisältämien työkalujen esittely, sekä alustan avulla toteutettujen pilotointien esittely joka perustuu pääosin väitöskirjan **julkaisuun X**.

Osallistujien keskinäisen kommunikoinnin välineinä toimivat tekstimuotinen chat, sekä äänipohjainen voice chat. **Kuvio 42** havainnollistaa Virrake-alustan tarjoamia kommunikoinnin sekä suunnittelun työkaluja.



Kuvio 42. Kuvassa Virrake-sovellusalan tarjoamia kommunikoinnin ja suunnittelun työkaluja (Julkaisu X).

Ylhäällä vasemmalla näkyy monipelaajan tekstimuotinen chat-ruutu, jonka avulla hän voi kommunikoida muiden käyttäjien kanssa. Sekä tekstimuotinen-, että puhe chat sisältävät erilaisia chat-moodeja. Kaksi monipelaajaa voivat keskustella esimerkiksi siten, että viestit välittyvät vain näiden pelaajien kesken. Tämä on useamman käyttäjän monipeliympäristössä tärkeää, jotta keskustelusta ei tulisi kaotista.

Ylhäällä oikealla näkyy vapaamuotoinen 3D-piirtotyökalu, jonka avulla käyttäjät voivat piirtää vapaasti 3D-avaruuteen siten, että piirrokset tallentuvat Virrake-alustan serverille ja ne näkyvät myös muille alustan käyttäjille. Työkalun avulla voidaan esimerkiksi joukkoistetussa suunnittelussa tehdä merkintöjä, jotka näkyvät muille käyttäjille. Työkalun avulla voidaan ilmaan piirtää viivojen lisäksi esimerkiksi tekstiä ja lukuja tai vaikkapa laskentakaavoja. Kukin käyttäjä voi hallita pääkäyttäjän lisäksi omia piirroksiaan.

Vasemmassa alakulmassa näkyy alustan tarjoama mittatyökalu, jonka avulla voidaan vapaasti mitata erilaisia kohteita ja etäisyyksiä siten, että mittaviivat ja mitat tallentuvat sovellusalan serverille ja jäävät halutuksi ajaksi myös muiden käyttäjien nähtäviksi. Tämä on hyvä apuväline yhteissuunnittelussa. Mittaustyökalussa on erilaisia mittausta ja sen kohdistamista helpottavia ominaisuuksia. Pääkäyttäjä ja mittausten tekijä voivat tässäkin tapauksessa hallita tekemiään mittauksia.

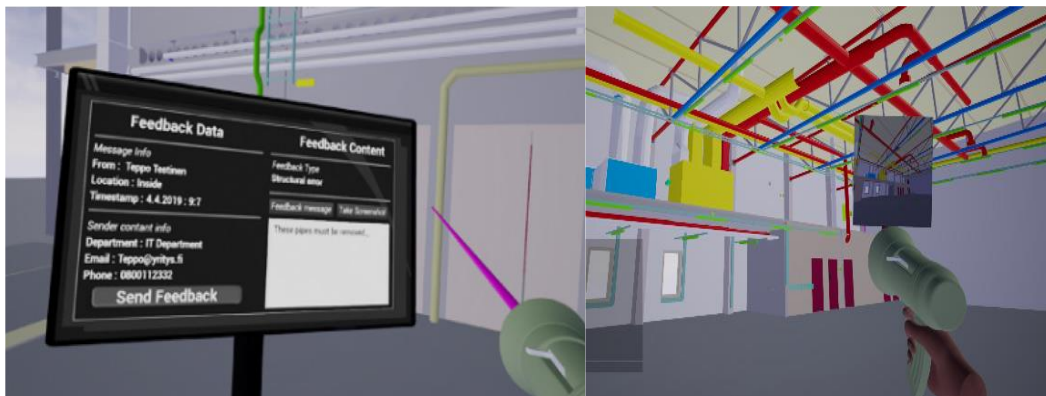
Oikeassa alakulmassa ollaan käyttämässä työkalua, jonka avulla voidaan haluttuja objekteja tai rakenteita piilottaa tai tuoda näkyviin. Tämä on hyvä apuväline, kun tarkastellaan esimerkiksi seinään tai muun vastaavan rakenteen sisällä olevia objekteja. Tämäkin työkalu toimii

monipeliympäristössä siten, muuta käyttäjät näkevät, mitä joku käyttäjä piilottaa tai tuo näkyviin.

Havaitsimme pilotoinnin yhteydessä, että kumpikin alustan tarjoama chat vaihtoehto on tarpeellinen. Yleiseen rupatteluun ääni on ilman muuta paras vaihtoehto, mutta jos jotain haluaa myös saada dokumentoiduksi myöhempää tarkastelua varten, niin silloin tekstimuotoinen chat ja seuraavana esiteltävät havaintojen tekoon ja palautteen antoon tarkoitetut työkalut ovat parempia. Myös mahdollisuus rajoittaa keskustelua esimerkiksi kahdenväliseksi tai valitun ryhmän kesken tapahtuvaksi koettiin erittäin hyödylliseksi ja tarpeelliseksi ominaisuudeksi. Pilotoinnissa havaittiin, että puhepohjaisen chatin käyttö vaatii melko laadukkaan ja pätkimättömän verkkoyhteyden työasemien ja serverin välille. Lähiverkon sisällä ei yleensä ongelmia ollut, mutta jos palvelin oli sijoitettuna julkiseen nettiin, niin ääni tahtoi ajoittain pätkiä. Tämä saattoi osittain johtua myös käyttämämme palvelinkoneen nettiyhteydestä.

Testasimme pilotoinnissa myös Virrake-sovellusalustan tarjoamia havaintojen tekoon ja esimerkiksi palautteiden antoon tarkoitettuja työkaluja. Nämä työkalut mahdollistavat alustan käyttäjien jättää sekä tekstimuotoisia, että kuvallisia viestejä. Viestit tallennetaan Virrake-alustan serverille ja niitä voidaan tarkastella ja hallita jälkikäteen.

Kuva 43 havainnollistaa Virrake-sovellusalustan tarjoamia palautteiden antoon ja havaintojen tekoon tarkoitettuja työkaluja. Palautteet ja havainnot tallentuvat myös Virrake-sovellusalustan serverille.



Kuvio 43. Kuvassa Virrake-sovellusalustan tarjoamia palautteiden antoon ja havaintojen tekoon tarkoitettuja työkaluja (Julkaisu X).

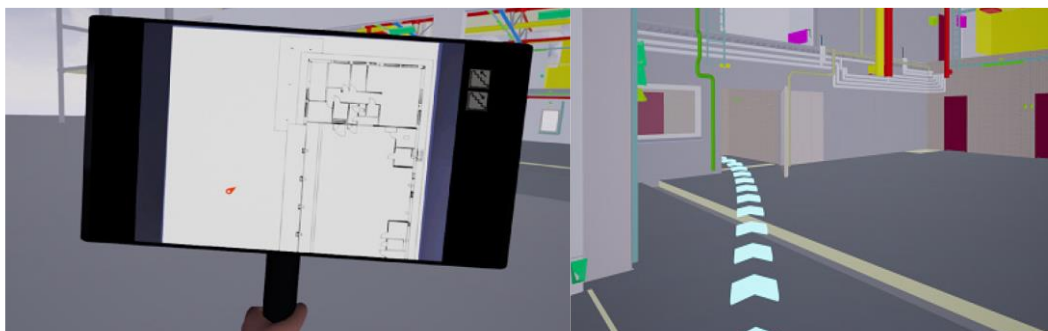
Palautteen antoon ja havainnointiin tarkoitettujen työkalujen avulla esimerkiksi rakennuksen tulevat käyttäjät tai muut projektiin osallistujat voivat jättää toiveitaan tai muutosehdotuksiaan suunnittelijoille. Halutessaan he voivat selventää havaintoaan tai ehdotustaan liittämällä viestiinsä työkalun avulla ottamansa kuvan kohteesta. Palautteeseen tai havaintoon voidaan myös liittää esimerkiksi tekijän tunnistetiedot tai rooli, kuten esimerkiksi paloaseman tapauksessa palopäällikkö tai palomies. Havaitsimme pilotoinneissamme, että tällainen työkalu on erinomainen

väline kerätä esimerkiksi kohteen turvallisuuteen tai toiminnallisuuteen liittyvää palautetta.

Tämä työkalu havaittiin pilotoinneissamme käyttökelpoiseksi ja erittäin hyödylliseksi. Työkalu lisää selvästi eri toimijoiden mahdollisuutta osallistua oikeasti suunnitteluun ja vaikuttaa lopputulokseen vaiheessa, jolloin suuriakin muutoksia on vielä ajallisesti ja taloudellisesti mahdollista ja järkevää tehdä. Työkalun todettiin lisäävän myös esimerkiksi turvallisuutta, kun kohdetta tarkastellaan useiden eri käyttäjien näkökulmasta. Tällöin joku rakennuksen tuleva käyttäjä saattaa havaita sellaista, jota jossain toisessa roolissa oleva käyttäjä ei havaitse. Tämä on mielestämme juuri suunnittelun joukkoistamisen idea.

Varsinkin isoissa ja käyttäjälle tuntemattomissa kohteessa voi olla haastavaa löytää paikasta toiseen. Lisäksi käyttäjä haluaa usein päästä suoraan johonkin kohteeseen. Todellisessa maailmassahan se ei ole mahdollista, mutta pelimaailmassa on. Näitä tarpeita varten Virrake-sovellusalustaan on toteutettu useita erilaisia sijainnin havainnointia ja navigointia helpottavia työkaluja, kuten 2D-karttanäkymä, suora siirtymä ja ohjattu navigointi.

Kuviossa 44 näkyy vasemmalla Virrake-sovellusalustan tarjoama 2D-karttanäkymä, jonka käyttäjä voi ottaa käyttöön aina tarvittaessa. Käyttäjä näkee kartalla myös oman sijaintinsa ja voi hypätä suoraan paikasta toiseen kartan avulla. Alustan navigointisysteemin avulla käyttäjä voi myös halutessaan saada reittiopastuksen valitsemaansa paikkaan. Tämä ominaisuus näkyy oikeanpuoleisessa kuvassa.



Kuvio 44. Kuvassa Virrake-sovellusalustan tarjoamia navigointia helpottavia työkaluja (Julkaisu X).

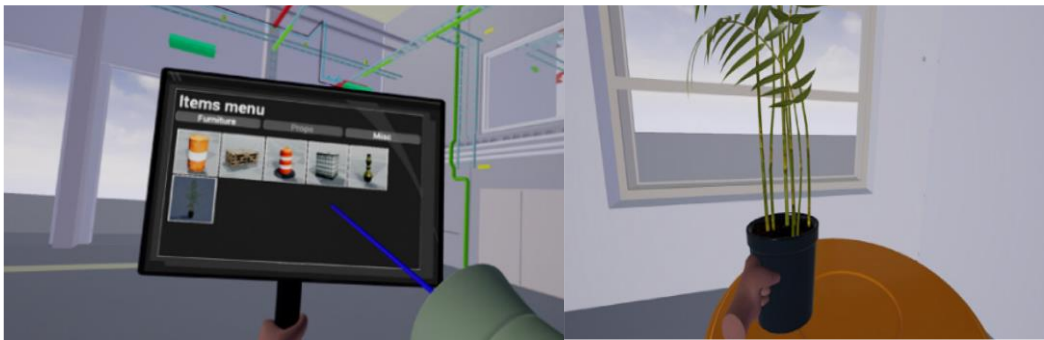
Pelaajan karttanäkymästä on myös mahdollista räätälöidä sellainen, että pelillistetyn tietomallin kaikki monipelikäyttäjät näkyvät kartalla. Työkalujen avulla voidaan myös ennakkoon laskea ja esittää reittejä eri kohteiden välille.

Virrake-sovellusalusta sisältää myös valmiin mekanismin luoda ulkopuolisista objekteista objektikirjastoja, joita käyttäjät voivat sijoitella pelillistettyyn tietomalliin mielensä mukaan. Tämä mahdollistaa esimerkiksi kalustevalmistajien kalustekirjastojen tuonnin ja käytön

suunnittelussa. Käyttäjät voivat suunnitella kalustuksen mieleisekseen ja tallentaa oman vaihtoehdonsa sovellusalustan serverille. Vaihtoehtoja voidaan tarkastella jälkikäteen ja niistä voidaan tarvittaessa toteuttaa äänestys Virrake-alustan tarjoaman äänestystyökalun avulla.

Tämän työkalun avulla voidaan myös keksimämme toiminnallisen suunnittelun menetelmä (FDM) tuoda Virrake-sovellusalustan käyttäjien ulottuville. Menetelmän avulla tuotetut, todellisen toiminnan tilantarvetta kuvaavat IFC 3D -tilaobjektit voidaan tuoda Virrake-sovellusalustan objektikirjastoon. Suunnittelijat voivat hakea tilaobjekteja objektikirjastosta ja testata niiden avulla erilaisten toimintojen mahtumista suunniteltaviin tiloihin.

Kuviossa 45 näkyy Virrake sovellusalustan objektikirjastoon tuotuja 3D-objekteja. Kuvassa käyttäjä sijoittaa myös valitsemaansa objektia.



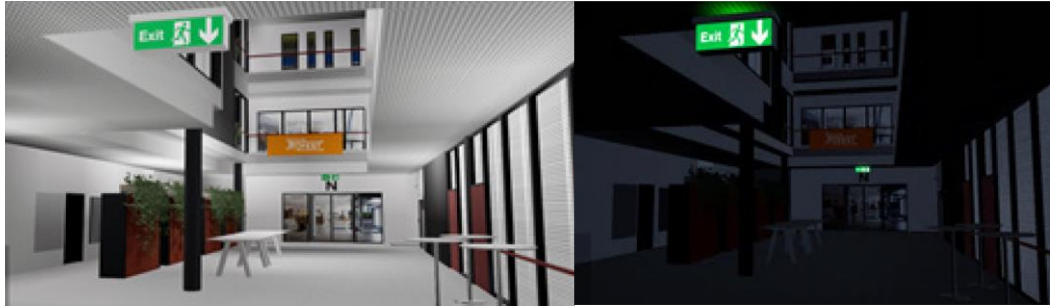
Kuvio 45. Kuvassa Virrake-sovellusalustan käyttäjä on valinnut objektikirjastosta 3D-objektin ja sijoittaa sitä haluamaansa paikkaan (**Julkaisu X**).

Pilotoimme suunnittelun joukkoistamisen ja yhteissuunnittelun pilotoinnissamme tätäkin työkalua ja työkalu todettiin monipuoliseksi ja käyttökelpoiseksi. Mahdollisuus tuoda esimerkiksi ulkopuolisia kalustekirjastoja mukaan suunnitelmiin laajentaa pilotointiin osallistuneiden toimijoiden mukaan Virrake-sovellusalustan käyttömahdollisuuksia ja lisää sen käyttökelpoisuutta huomattavasti.

Erityishuomio kannattaa kiinnittää vielä siihen, että objektikirjasto yhdessä keksimäni toiminnallisen suunnittelun menetelmän kanssa mahdollistaa rakennusten ja muiden kohteiden toiminnallisen suunnittelun suoraan Virrake-alustan avulla.

Ideoimme ja pilotoimme samalla myös Virrake-sovellusalustan mahdollisia käyttökohteita. Mielestämme eräs mielenkiintoinen käyttökohte on rakennuksen turvallisuuden suunnittelu. Alustan avulla voidaan esimerkiksi suunnitella ja vertailla opastekylttien sijoittelua.

Kuviossa 46 suunnitellaan rakennuksen Exit-kylttien sijoittelua sellaiseksi, että ne näkyisivät mahdollisimman hyvin eri tilanteissa ja skenaarioissa. Kuvassa kylttien sijoittelua ja näkyvyyttä testataan valossa ja pimeässä.



Kuvio 46. Kuvassa Virrake-sovellusalustan käyttöä Exit-kyttien sijoittelun suunnittelussa (Julkaisu X).

Eli pilotoimme ennalta laatimamme suunnitelman pohjalta kaikkia Virrake-sovellusalustan tarjoamia yhteissuunnittelun menetelmiä ja työkaluja. Nämä mahdollistavat esimerkiksi Virrake-sovellusalustan hyödyntämisen suunnittelun joukkoistamisessa ja vaikkapa virtuaalisten työmaakokousten järjestämisessä. Työkalujen avulla voidaan toteuttaa reaaliaikaista yhteissuunnittelua, mutta myöskin ajasta riippumatonta suunnittelua, jossa jokainen voi oman aikataulunsa mukaisesti ottaa osaa suunnitteluprosessiin ja esittää mielipiteitään, näkemyksiään ja ehdotuksiaan. Projektin toimijat voivat tarkastella viestejä erilaisten Virrake-sovellusalustan tarjoamien raportointi- ja kommunikointityökalujen avulla ja reagoida niihin tarvittaessa. Tällä tavoin suunnitteluprosessista saadaan aidosti vuorovaikutteinen ja iteratiivinen.

Pilotoinnin yhteenveto ja tulokset

Pilotoinnissa toteutettu koulukeskuksen ruokalan kalusteiden äänestys oli sikäläkin tarpeellinen, että suunnittelijoiden ennalta valitsema ruokalan kalustevaihtoehto ei voittanutkaan äänestystä. Äänestyksen pohjalta koulukeskuksen suunnitelmaa muutettiin vastaamaan koulun tulevien käyttäjien toiveita. Pilotoinnin perusteella olemme sitä mieltä, että tämänkaltaiseen toimintaan suunnittelun joukkoistaminen sopi erinomaisesti. Lisäksi Virrake-sovellusalusta valmiine työkaluineen helpotti ja nopeutti työtä huomattavasti.

Suoritimme hankkeen toimijoihin kohdistetun avoimen haastattelun, jossa pyrimme selvittämään heidän näkemyksiään ja mielipiteitään, sekä mahdollisia jatkokehitysideoitaan. Haastattelut liittyivät itse Virrake-sovellusalustaan, sekä sen käyttökelpoisuuteen tämänkaltaisessa joukkoistetussa rakennussuunnittelussa. Lisäksi suoritimme Hiekanpään koulun oppilaisiin ja muutama opettajaan kohdistetun teemahaastattelun, jossa keskeisenä teemana oli omat kokemukset osallistumisesta tämänkaltaiseen projektiin. Lisäksi heiltä tiedusteltiin, miten he kokivat henkilökohtaisesti sekä yhteisönä tämänkaltaisen suunnittelun ja haluaisivatko he tällaista toimintaa lisää myös jatkossa. Pilotointien toteutus onnistui teknisestikin melko hyvin. Mutta mikä parasta, niin osallistuvan havainnoinnin ja tekemiemme haastattelujen perusteella pilotointiin osallistuneet hankkeen toimijat olivat tyytyväisiä

sovellusalustan tarjoamiin mahdollisuuksiin. Kaikki osallistuneet tahot olivat myös sitä mieltä, että tämänkaltainen yhteissuunnittelu ja suunnittelun joukkoistaminen ovat pelillistämisen ohella rakennussuunnittelun tulevaisuutta. Tällaisen toiminnan tulevaisuus nähtiin hyvänä ja tavoittelemisen arvoisena kehityssuuntana. Pilottikoulun oppilaat ja henkilökunta kokivat hyvin mielekkäänä mahdollisuutensa osallistua oman ympäristönsä suunnitteluun varsinkin, kun suunnitelma esitetään heille ymmärrettävässä muodossa pelillistämisen kautta. He myös pyysivät, että jättäisimme heidän koulunsa pelillistetyn tietomallin heille opetus- ja suunnittelukäyttöön, jolloin se toimisi myös esimerkkinä siitä, mihin tulevaisuudessa ollaan menossa.

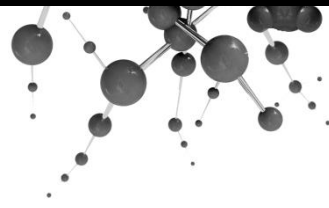
Suoritimme myös avoimen haastattelun yhteistyöyrityksemme suunnitteleman paloasemaan pilotointiin osallistuneille hankkeen toimijoille. Heiltä pyrittiin haastattelun avulla saamaan selville mm. mielipiteitä ja näkemyksiä virtuaalisista työmaakokouksista ja muusta suunnittelun joukkoistamisesta hyödyntäen VIRRake-sovellusalustan tarjoamia ominaisuuksia rakennuksen tietomallin pelillistämiseksi. Lisäksi selvitettiin heidän näkemyksiään liittyen VIRRake-sovellusalustan toimivuuteen ja jatkokehitykseen. Selvitimme myös heidän mielipiteitään keksimäni toiminnallisen suunnittelun menetelmän käyttökelpoisuudesta yhdessä VIRRake-sovellusalustan kanssa kohteen toiminnallisuuden mitoituksessa hyödyntäen esimerkiksi VIRRake-sovellusalustan tarjoamia valmiita primitiivejä kuvaamaan toimintojen vaatimia tilantarpeita.

Myös pilotoinneissa esille noussut mahdollisuus hyödyntää keksimääni toiminnallisen suunnittelun menetelmää (FDM) VIRRake-sovellusalustan objektkirjastojen kautta koettiin hyvin käyttökelpoiseksi ja jatkokehityksen arvoiseksi asiaksi. Tällä tavoin on mahdollista luoda prosessi, jossa kaikki kohteessa tapahtuva toiminnallisuus otetaan suunnitteluun mukaan jo heti suunnittelun alusta lähtien. Suunnittelijoilla on myös mahdollisuus kerryttää eri toimintojen tilantarpeita kuvaavien IFC 3D -tilaobjektien kirjastoja sitä mukaan, kun tilantarpeita määritellään uusille toiminnallisuuksille. Objektkirjastojen laajentuessa ei toiminnallinen suunnittelu osana muuta rakennussuunnittelua vaadi enää välttämättä kovinkaan paljoa lisätyötä. Jos esimerkiksi halutaan varmistua uuden rakennuksen esteettömyydestä, niin tehtävä nopeutuu ja helpottuu huomattavasti, jos meillä on tarvittavien toimintojen tilantarpeita kuvaavat objektkirjastot olemassa jo valmiina. Saimme pilotoinneista myös joukon VIRRake-sovellusalustan korjaus- ja kehitysehdotuksia, joihin aiomme paneutua jatkossa. Voimme käyttää VIRRake-sovellusalustan palautteen antoon ja kehitysehdotusten tekoon tarkoitettuja työkaluja myöskin sovellusalustaan itseensä kohdistuvan palautteen ja kehitysehdotusten vastaanottamiseen.

Pilotointien aikana nousi esille, että Virrake-sovellusalusta voisi olla koko rakennushankkeen ajan kaikkien hankkeen toimijoiden käytettävissä reaaliajassa tuoden läpinäkyvyyttä koko projektille. Tällöin eri toimijat voisivat ajasta ja paikasta riippumattomasti ottaa jatkuvasti osaa suunnitteluun omien rooliensa näkökulmasta. Tällöin suunnitteluprosessista saataisiin iteratiivinen, kun esimerkiksi rakennuksen tulevat käyttäjät voisivat jättää suunnitelmaa ja rakennuksen käyttöä koskevia kommenttejaan ja ehdotuksiaan, jotka sitten esimerkiksi arkkitehti voisi halutessaan huomioida tai jättää huomioimatta. Alustan avulla esimerkiksi arkkitehti voisi myös perustella omia näkemyksiään asioista muille toimijoille. Tällainen toiminta vaatisi vanhoista asenteista ja toimintatavoista luopumista. Tämä voi ainakin osalle alan toimijoista olla vielä hieman haastavaa.

Virrake-sovellusalusta on toteutettu Unreal Engine -pelimoottorin avulla ja siihen olisi myös mahdollista integroida tuki epälineaarisen tarinankerronnan työkaluilla tehtäville tarinoille ja logiikoille. Esimerkiksi aiemmin esitetyllä Twinellä tehtyjä tarinoita on mahdollista tuoda myös Unreal Engine -pelimoottoriin Unity-pelimoottorin tavoin. Tulevaisuudessa tulemme mahdollisesti toteuttamaan Virrake-sovellusalustaan esimerkiksi virtuaalisten työmaakokousten esityslistojen laatimisen, esityslistoihin perustuvan kokouksen kulun ohjaamisen ja pöytäkirjojen laatimisen automatisoinnin hyödyntäen epälineaarisen tarinankerronnan menetelmiä ja välineitä. Olemme tutkineet ja pilotoineet tätä jo melko paljon esimerkiksi aiemmin esitellyn työelämäpelin kehitystyön yhteydessä. Väitöskirjaan liittyy myös julkaisu aiheesta.

Tekemiemme haastattelujen perusteella kaikki toimijat olivat sitä mieltä, että Virrake-sovellusalustan käyttökelpoisuus paranee, kun tulvaisuudessa yhä useampi kalustevalmistaja ja esimerkiksi LVI-laitteistojen toimittaja pystyy tarjoamaan omista tuotteistaan valmiita 3D-objektikirjastoja. Yhteistyökumppaneidemme mielestä tulevaisuudessa saatetaan jopa edellyttää eri toimittajilta heidän tuotteidensa Open BIM -yhteensopivia 3D-kirjastoja, mikäli he haluavat päästä isompiin hankkeisiin mukaan. Kehittämämme Virrake-sovellusalusta on jo nyt kaupallistettu ja sen kehitystyötä jatketaan edelleen (Virrake, 2020). Rakennusalan yhteistyökumppanimme hyödyntävät alustaa omassa toiminnassaan, sekä tarjoavat sen avulla palveluja myös muille. Tämän kaltaiselle toiminnalle ja tämän kaltaisille palveluille näyttää olevan selkeää kysyntää, sillä rakennussuunnittelua halutaan pelillistämisen myötä viedä myös yhteisöllisempään ja läpinäkyvämpään suuntaan. Tämä on erityisesti tilaajien ja tulevien käyttäjien etu ja tahtotila. Se vaatii myös kaikilta rakennusalan toimijoilta jonkinlaista asennemuutosta, mutta esimerkiksi meidän hankkeissamme mukana olevien rakennusalan toimijoiden mielestä suunta on selvä ja rakennusalan on siihen vain sopeuduttava.



5 Tulokset

Luvun alussa esitellään saatuja tuloksia ja niiden merkitystä yleisesti. Tämän jälkeen vastataan tarkemmin väitöskirjassa esitettyihin tutkimuskysymyksiin siten, että kuhunkin ennalta asetettuun tutkimuskysymykseen vastataan erikseen. Lisäksi luvussa esitetään yhteenveto käytetyistä tutkimusmenetelmistä ja tutkimusten tuloksista. Luvussa arvioidaan myös käytettyjä tutkimusmenetelmiä ja tutkimusten luotettavuutta, sekä tulosten yleistettävyyttä. Luvun lopussa keskustellaan vielä yleisesti saaduista tuloksista ja pohditaan niiden merkitystä.

5.1 YLEISTÄ TULOKSISTA

Väitöskirja ja sen tulokset voidaan jakaa kolmeen osakokonaisuuteen. Ensimmäinen osakokonaisuus on tietomallinnus ja tietomallin pelillistäminen. Toisen osakokonaisuuden muodostaa toiminnallisen suunnittelun menetelmä (FDM). Kolmantena osakokonaisuutena on pelillistetyn tietomallin ja toiminnallisen suunnittelun menetelmän hyödyntäminen eri tavoin rakennussuunnittelussa ja tähän liittyvät tekemämme pilotoinnit.

Tietomallinnus ja tietomallin pelillistäminen

Tietomallinnuksen yleistyminen ja Open BIM -standardien käyttö ovat luoneet tilanteen, jossa kaikki rakennuksen suunnittelutieto on yleensä yhdessä paikassa ja helposti käytettävissä standardissa muodossa. Lisäksi tieto on yleensä melko reaaliaikaista. Näistä seikoista johtuen tietomallin jatkokäyttö eri tarkoituksiin on myöskin helpottunut. Eräs yleistymässä oleva tietomallin jatkokäytön muoto on väitöskirjassakin käsiteltävä tietomallin pelillistäminen. Tietomallin pelillistäminen ja pelillistetyn tietomallin tarjoamat mahdollisuudet on tiedostettu nykyisin myös

rakennusallalla. Esimerkiksi tässä väitöskirjassa esitettävien TKI-hankkeiden yhteistyökumppaneilla on kova halu siirtyä toiminnassaan kokonaan Open BIM -standardien mukaiseen tietomallinnukseen ja tätä kautta myös pelillistää tietomalleja ja hyödyntää pelillistettyjä tietomalleja ainakin suunnittelussa ja markkinoinnissa. Standardeja menetelmiä ja prosesseja tietomallien pelillistämiseksi ei vielä juurikaan ole olemassa ja lisäksi eri toimijoiden tarpeet ja vaatimukset poikkeavat yleensä myös jonkin verran toisistaan. Näistä lähtökohdista käsin päädyimme hankkeissamme kehittämään oman menetelmän ja menetelmää tukevan prosessin tietomallien pelillistämiseksi siten, että lähtökohtana on rakennusalan yhteistyökumppaneidemme tarpeet.

Kehitystyömme perusajatus on, että tietomallin pelillistäminen tehdään nykyaikaisia pelimoottoreita hyödyntäen, eikä esimerkiksi suunnitteluohjelmistojen omilla laajennuksilla. Perusteluna tälle on yhteistyökumppaneidemme halu viedä pelillistäminen pidemmälle, kun mihin suunnitteluohjelmistojen ominaisuudet vielä nykyisin taipuvat. Lisäksi haluttiin luoda yleisiä ja ohjelmistoriippumattomia ratkaisuja. Yhteistyökumppanimme halusivat, että menetelmän lähtökohtana on ensisijaisesti IFC-standardi (Open BIM) ja sen hyödyntäminen.

Kehitimme ohjelmistoriippumattoman menetelmän ja menetelmää tukevan prosessin minkä tahansa Open BIM -standardeihin perustuvan tietomallin pelillistämiseksi. Menetelmä ja prosessi eivät ota kantaa siihen, millä ohjelmistoilla tietomalli on tehty tai minkä pelimoottorin avulla pelillistäminen tehdään. Tämän mahdollistaa IFC-standardin käyttö.

Kehittämäämme Open BIM -standardien mukaisten tietomallien pelillistämisen menetelmää ja sitä tukevaa prosessia käsitellään ensisijaisesti **julkaisuissa I ja II**. Menetelmä ja prosessi mahdollistavat minkä tahansa BIM-yhteensopivan tietomallin pelillistämisen mille tahansa pelimoottorille siten, että tietomallin sisältämät metatiedot saadaan myös tuotua mallin mukana pelimoottoriin ja liitettyä siellä malliin tai sen osiin. Unreal Engine -pelimoottoriin tuli hankkeen aikana myös natiivi IFC-tuki, mutta kehittämämme menetelmä ja prosessi toimivat myös Unreal Engine -pelimoottorin kanssa.

Tietomallin pelillistämiseen liittyy paljon erilaisia epästandardeja menetelmiä ja välineitä, jotka on yleensä sidottu johonkin tiettyyn ohjelmistoon tai valmistajaan. Halusimme yhteistyökumppaneidemme tarpeista johtuen kehittää menetelmän ja prosessin, jotka toimisivat kaikkien Open BIM -standardin mukaisten suunnitteluohjelmistojen kanssa. Käytimme kehittämäämme menetelmää ja sitä tukevaa prosessia lähes kaikissa pilotoinneissamme. Lisäksi yhteistyökumppanimme käyttivät ja käyttävät menetelmää omissa rakennushankkeissaan. Menetelmä on osoittautunut käytännössä melko toimivaksi. Ainoan isomman käytännön haasteen on tuonut mallien optimointi varsinkin

mobiliympäristössä. Kun IFC-standardin mukainen tietomalli käännetään pelimoottoreiden ymmärtämään mesh-pohjaiseen formaattiin, mallien koko kasvaa yleensä useilla sadoilla prosenteilla ja malleja joudutaankin usein jälkikäteen optimoimaan. Myös Unreal Engine -pelimoottorin tarjoama natiivi IFC-tuki on osoittautunut käytännössä hyväksi. Sen avulla saadaan myös IFC-pohjaisen tietomallin metatiedot tuotua pelimoottoriin. Lisäksi Unreal Engine osaa optimoida malleja tekemänsä mesh-muunnoksen aikana.

Toiminnallisen suunnittelun menetelmä (FDM)

Toinen väitöskirjan osakokonaisuus on keksimäni ja patentoimamme toiminnallisen suunnittelun menetelmä (FDM = Functional Design Method). Menetelmän tarkoitus on auttaa suunnittelijoita suunnittelemaan rakennuksia ja muita kohteita siten, että kohteessa tapahtuva toiminta ja toiminnan vaatima todellinen tilantarve saataisiin nykyistä paremmin suunniteluun mukaan. Toiminnallisen suunnittelun menetelmä tarjoaa yleisen menetelmän ja menetelmää tukevan prosessin minkä tahansa toiminnan vaatiman suurimman tilantarpeen kaappaamiseksi ja tallentamiseksi IFC 3D -tilaobjektiksi. Näin luodun tilaobjektin avulla voidaan missä tahansa BIM-yhteensopivassa suunnitteluohjelmassa testata, kuinka hyvin joku toiminnallisuus mahtuu suunniteltaviin tiloihin. Itse toiminnalle tai mitoitettaville tiloille ei menetelmä aseta rajoituksia.

Toiminnallisen suunnittelun menetelmää voidaan käyttää sellaisenaan suoraan tietomallien kanssa ilman tietomallien pelillistämistä. Lisäksi menetelmää ja sillä tuotettuja IFC 3D -tilaobjekteja voidaan hyödyntää useilla eri tavoilla yhdessä pelillistetyn tietomallin kanssa. Esimerkkeinä toimivat pilotoimamme esteettömyyden ja hätäpoistumisen simuloinnit. Pilotoinnit osoittivat, että toiminnallisen suunnittelun menetelmä taipuu monenlaiseen käyttöön. Tarkoituksenamme onkin tulevissa hankkeissamme kehittää menetelmää edelleen ja löytää sille uusia sovellusalueita. Toiminnallisen suunnittelun menetelmää ja sen käyttöä pilotoinneissamme kuvataan ensisijaisesti **julkaisuissa I, II, III ja IV**.

Menetelmien hyödyntäminen rakennussuunnittelussa

Kolmas väitöskirjan osakokonaisuus on tekemämme pilotoinnit, joissa sovelletaan myös kahden edellisen osakokonaisuuden esittämiä asioita. Pilotointien ja niihin liittyvien tutkimusten tavoitteena on ollut testata pelillistetyn tietomallin erilaisia käyttökohteita hyödyntäen mahdollisuuksien mukaan myös toiminnallisen suunnittelun menetelmää. Pilotoinnit etenevät jatkumona siten, että aina seuraava pilotointi pyrkii käyttämään edellisestä pilotoinnista saatuja tuloksia hyväkseen.

Ensimmäisessä pilotoinnissa (**Julkaisu I**) pilotoimme ja testasimme kehittämäämme menetelmää ja prosessia tietomallin pelillistämiseksi. Lisäksi testasimme ideaamme luoda toiminnallisen suunnittelun

menetelmän avulla eri toimintojen vaatimia tilantarpeita törmäystunnisteiksi peliobjekteihin. Pelillistimme tietomallista yhteistyökumppanimme Pieksämäellä sijaitsevan pääkonttorin ja toteutimme lisäksi pyörätuolia käyttävän, esteellisen pelihahmon, jolle loimme toiminnallisen suunnittelun menetelmää hyödyntäen vaihdettavat törmäystunnisteet. Törmäystunnisteet kuvasivat pyörätuolin käyttäjän erilaisten toimintojen tilantarpeita. Lisäksi pilotoimme myös hieman automaattista rakennuksen esteettömyyden analysointia laittamalla pyörätuolilla liikkuva pelihahmo kulkemaan automaattisesti valittuja reittejä pitkin erilaisilla törmäystunnisteilla varustettuna. Menetelmä toimi odotetulla tavalla ja saimme yhteistyökumppanimme pääkonttorin Open BIM -pohjaisen tietomallin pelillistettyä kokeilemiimme pelimoottoreihin. Malli oli sen verran pieni, että edes merkittävää optimointia ei tarvittu. Ideamme esteettömyyden simuloinnista ja immersion luomisesta pyörätuolia käyttävän pelihahmon avulla osoittautui myöskin toimivaksi. Samoin myös ajatuksemme mitoittaa pelaajalle tarpeellisten toimintojen vaatimia tilantarpeita kuvaavat vaihdettavat törmäystunnisteet toiminnallisen suunnittelun menetelmää hyödyntäen osoittautui varsin toimivaksi. Pilotoinnin jälkeen olimme rakennusalan yhteistyökumppaneidemme kanssa yksimielisiä ideoiden ja menetelmien toimivuudesta ja päätimme kehittää niitä edelleen hankkeissamme.

Toisessa pilotoinnissa (**Julkaisut II, III ja IV**) pilotoimme hätäpoistumisen simulointia rakennuksen pelillistettyä tietomallia, toiminnallisen suunnittelun menetelmää ja tekoälyä hyödyntäen. Tässä pilotoinnissa käytimme lähtökohtana yhteistyökumppanimme toteuttaman kauppakeskuksen tietomallia. Pelillistimme tietomallin kehittämämme menetelmän ja sitä tukevan prosessin avulla Unity-pelimoottoriin. Määrittelimme kauppakeskuksen erityyppisiä asiakasprofiileja esimerkiksi iän ja esteettömyyden näkökulmasta tarkasteltuina. Loimme toiminnallisen suunnittelun menetelmää hyödyntäen eri asiakasprofiileille tilantarpeet ja määrittelimme eri profiileiden mukaisille pelihahmoille tilantarpeita vastaavat törmäystunnisteet. Määrittelimme pelillistettyyn tietomalliin suunnitelman mukaiset hätäpoistumistiet ja laitoimme profiloidut asiakashahmot hakeutumaan profiilinsa mukaisesti kohti hätäpoistumisteitä pelimoottorin tarjoaman tekoälypohjaisen navigoinnin avulla. Saimme yhteistyökumppaneiltamme tarvittavat tiedot kauppakeskuksen asiakasmääristä ja asiakasprofiileista.

Toteutimme simuloinneissa yhteistyökumppaneidemme määrittelemiä hätäskenaarioita erilaisilla asiakasmäärillä ja asiakkaiden lähtökohtaisella sijoittelulla. Simuloinnin aikana profiloidut asiakashahmot pyrkivät hakeutumaan hätäpoistumisteiden kautta ulos kauppakeskuksesta profiileidensa mukaisesti. Mittasimme kauppakeskuksen tyhjenemisaikoja ja tätä kautta pääsimme analysoimaan hätäpoistumisteiden sijoittelun hyvyttä ja määrän riittävyttä. Toteutimme sovelluksesta myös sellaisen,

että simulaatiota voidaan seurata kenen tahansa profiloidun pelihahmon näkökulmasta tai vain yleisesti. Myös useamman kameran seuranta samanaikaisesti oli mahdollista.

Vaikka asiakasprofiileiden määrittely oli vielä aika karkealla tasolla ja käyttämämme tekoälykään ei vastaa täysin todellisuutta, niin olimme yhteistyökumppaneidemme kanssa vakuuttuneita pelillistetyn tietomallin soveltuvuudesta alustaksi tämänkaltaiselle toiminnalle. Erilaisia vaihtoehtoja voidaan verrata nopeasti ja on mahdollista myös testata sellaisia skenaarioita, joita ei oikeassa elämässä millään pääse testaamaan. Tarkemmalla profiloinnilla ja tekoälyn määrittelyllä tällainen simulaatio voidaan mielestämme saada hyvinkin tarkasti vastaamaan todellisuutta.

Yhteistyökumppanimme pitivät myös erittäin mielenkiintoisena mahdollisuutta toteuttaa monipelitekniikoita hyödyntäen simulointiympäristöjä, joissa voi olla simuloinnin aikana oikeita pelaajia omilla rooleissaan. Rooli voisi olla esimerkiksi pelastustyöntekijä, henkilökunnan jäsen tai asiakas. Tällä tavoin voidaan mm. järjestää erilaisia toimintaharjoituksia eri skenaarioiden varalle. Näin voitaisiin myös toteuttaa esimerkiksi harjoitusympäristöjä, joissa eri toimijat voisivat harjoitella asioita itsenäisesti haluamanaan aikana ja haluamansa määrän.

Pilotointi tuotti myös ajatuksia data-analytiikan ja koneoppimisen hyödyntämisestä simuloinneissa kerätyn datan analysoimiseksi ja mallien luomiseksi. **Julkaisussa III** esitellään tekemämme jatkotutkimus, jossa edellä luotuun simulaatioon yhdistetään data-analytiikkaa ja koneoppimista. Lisäsimme simulaation profiloituihin pelihahmoihin kyvyn tallentaa kaikki törmäyksensä reaaliajassa määrämuotoiseen lokitiedostoon. Ajoimme useita kymmeniä simulaatioita yhteistyökumppaneiltamme saamillamme asiakasmäärillä ja asiakkaiden sijoitteluilla. Jaoimme data-analytiikan avulla kauppakeskuksen lattian matemaattisesti muutaman neliömetrin kokoisiin ruttuihin ja laskimme kussakin ruudussa tapahtuneiden törmäysten lukumäärät. Törmäys on voinut tapahtua toiseen pelihahmoon tai vaihtoehtoisesti kauppakeskuksen rakenteisiin tai kalusteisiin. Tällä tavoin saimme **julkaisussa III** esittämämme törmäyskartan, jossa näkyy kullakin alueella tapahtuneiden törmäysten lukumäärät. Mielestämme voidaan melko yksiselitteisesti päätellä, että mitä enemmän jollain alueella on tapahtunut törmäyksiä, sitä ongelmallisempi alue on hätäpoistumisen kannalta.

Kun siirsimme havaitsemamme hätäpoistumisen ongelma-alueet kauppakeskuksen pohjapiirroksen niin näimme, että pääovea lähellä olevien kassapöytien välit ja eräät hyllyvälit ovat hätäpoistumisen ongelmallisimmat kohdat. Niihin tulisi kiinnittää erityistä huomiota, mikäli hätäpoistumista haluttaisiin kauppakeskuksen suunnitelmassa tehostaa. Toisaalta simuloinneissa kerätyn datan analysointi data-analytiikan keinoin osoitti, että kaikissa yhteistyökumppanimme

määrittämässä skenaarioissa kauppakeskus tyhjentyi reilussa kymmenessä minuutissa. Tämä on sinällään täysin riittävä aika hätäpoistumisen kannalta. Tutkimukset ovat osoittaneet, että esimerkiksi tulipalon sattuessa palokaasut ovat ihmisen kannalta kriittisin tekijä ja niiden muodostuminen vaaralliselle tasolle kestää keskimäärin hieman yli 20 minuuttia, joten sen ajan puitteissa rakennus olisi syytä saada palotilanteessa tyhjäksi. (Magnusson, Frantzich & Harada, 1995; Paloposki, Myllymäki & Weckman, 2002; Weckman, 1997.)

Loimme myös keräämämme datan ja koneoppimisen menetelmiä hyödyntäen mallin, jonka avulla voidaan ennustaa kauppakeskuksen tyhjenemisaikoja erilaisilla asiakasmäärillä. Käytimme 70% kerätystä datasta mallin luomiseen ja 30% mallin testaamiseen. Mielestämme näin saatu malli vastaa melko hyvin todellisuutta.

Kaikki pilotointiin osallistuneet toimijat olivat yhtä mieltä siitä, että pilotointi onnistui hyvin ja data-analytiikan ja koneoppimisen hyödyntäminen simulaatioissa kerättyjen tulosten analysoimiseksi ja erilaisten mallien luomiseksi toimii käytännössä hyvin jo nykyisilläkin menetelmillä ja ohjelmistoilla. Uskomme, että tulevaisuudessa tietomalli sinällään tai pelillistettynä voisi tarjota rakennuksen elinkaaren aikaisen datan hallinnan ja käyttöliittymän tähän dataan. Tällöin data-analytiikka voisi tarjota oppivan ja itseään parantavan analyysiympäristön kaikkeen kerättyyn dataan. Käyttökohteina voisivat olla esimerkiksi tässä väitöskirjassa esitelty simulointidatan analyysi tai rakennuksen korjaustarpeiden ennakointi. Kohde voi olla oikeastaan mikä vain, kunhan siitä on vain riittävästi ja oikeanlaista dataa saatavilla. Kerättyä dataa voidaan myös verrata muista vastaavista kohteista kerättyyn dataan. Datan lisääntyessä analyysien tulokset paranevat. Tulemme ehdottomasti jatkamaan data-analytiikan ja koneoppimisen hyödyntämistä tulevilla hankkeissamme ja tutkimuksissamme.

Kolmannessa pilotoinnissamme pilotoimme suunnittelun joukkoistamista Virrake-sovellusalustan avulla pelillistettyä koulukeskuksen tietomallia hyödyntäen. Pilotoinnin kohteena oli koulukeskuksen ruokalan kalusteet. Koulun oppilaat pääsivät äänestämään ruokalan kalustuksen kolmesta ennalta määritellystä vaihtoehdosta. Äänestyksen käytimme Virrake-sovellusalustan sisältämää äänestystyökalua. Äänestys onnistui mielestämme erittäin hyvin ja koulun oppilaat ja henkilökunta olivat hyvin innokkaina mukana. Lisäksi äänestys tuotti todellisen tuloksen, sillä suunnittelijoiden ykköseksi asettama vaihtoehto ei ollutkaan oppilaiden mielestä paras. Myös tilaaja haluaa kunnioittaa oppilaiden näkemystä ja koulukeskuksen ruokalan kalustus toteutetaan äänestystuloksen mukaan. Rakennusalan yhteistyökumppanimme ovat ehdottomasti sitä mieltä, että suunnittelu tulee kehittymään suuntaan, jossa esimerkiksi rakennuksen tulevat käyttäjät pyritään saamaan jo

alkuvaiheessa sitoutettua suunnitteluun mukaan. Tällaisen yhteisöllisen ja joukkoistetun suunnittelun avulla saadaan varmasti laadukkaampia ja käyttötarkoituksiinsa paremmin soveltuvia rakennuksia. Jos esimerkiksi esteelliset käyttäjät saadaan mukaan suunnittelemaan rakennuksen esteettömyyden ratkaisuja, saadaan varmasti esteettömyyden näkökulmasta parempaa rakentamista.

Pilotoimme yhteistyökumppanimme suunnitteleman paloaseman pelillistetyn tietomallin avulla myös ideaamme virtuaalisesta yhteissuunnittelusta ja esimerkiksi virtuaalisista työmaakokouksista. Toteutimme tätä pilotointia varten ympäristön, jossa pilotointiin osallistuvia hankkeen toimijoita oli kokoontunut fyysisesti eri paikkoihin siten, että jokaisella toimijalla oli omalla koneellaan paloaseman pelillistetty tietomalli, joka oli yhteydessä kaikille yhteiseen Virrake-serveriin. Serveri mahdollisti monipelitoiminnot ja pelaajien välisen kommunikoinnin tekstillä tai puhumalla.

Pilotoimme samalla Virrake-sovellusalustan tarjoamia työkaluja monipeliympäristössä. Pilotointi onnistui hyvin ja olemme vakuuttuneita tällaisen yhteissuunnittelun toimivuudesta ja hyödyllisyydestä. Mikäli kyseessä on jokin strukturoitu tapahtuma, kuten esimerkiksi virtuaalinen työmaakokous, voitaisiin hyödyntää epälineaarisen tarinankerronnan menetelmiä ja työkaluja esimerkiksi kokouksen esityslistan laatimiseen, kokouksen kulun ohjaukseen ja kokouspöytäkirjan laatimiseen. Tulemme jatkamaan pilotointejamme liittyen suunnittelun joukkoistamiseen ja esimerkiksi virtuaalisiin työmaakokouksiin. Kehittämämme Virrake-sovellusalusta tukee lisäksi näitä toimintoja hyvin monipelitukensa ja monipuolisten kommunikointimahdollisuuksiensa ansiosta. Virrake-sovellusalustaa ja sen sisältämiä suunnittelutyökaluja esitellään erityisesti **julkaisussa X**.

Toteutimme pilotointien ohella myös hankkeeseemme liittyvän työelämäpelin pelillistettyä Mikkelin kaupungin keskustan mallia (tietomallia) hyödyntäen. Työelämäpelin kehitykseen toi ylimääräisen haasteensa tarve saada hankkeeseen liittyvät aikuisopiskelijat työelämäpelin suunnitteluun ja toteutukseen aidosti mukaan. Heillä ei ollut aiempaa kokemusta ohjelmoinnista ja lähtökohtaisesti heidän tietokoneen käyttötaidoissaankin oli puutteita. Saimme otettua heidät pelin ideointiin ja kehittämiseen mukaan hyödyntämällä epälineaarisen tarinankerronnan menetelmiä ja työkaluja. Twinen avulla he pystyivät pienellä perehdyttämällä luomaan työelämäpeliin tehtäviä ja erilaista toimintalogiikkaa käytetyn pelimoottorin ulkopuolella suoraan Twinen omassa käyttöliittymässä. Twinen pelimoottori-integraation avulla näin tehdyt tarinat voitiin tuoda käyttämäämme Unity-pelimoottoriin ja liittää helposti osaksi työelämäpelin toiminnallisuutta. Samalla havaitsimme, että epälineaarisen tarinankerronnan menetelmät ja välineet soveltuvat

hyvin myös esimerkiksi erilaisen yhteissuunnittelun vaatimien toimintojen määrittelyyn ja ohjaukseen. Työelämäpeli julkaistiin hankkeen jälkeen avoimena lähdekoodina, joten se on kaikkien halukkaiden käytössä ja jatkokehitettävissä.

Twinen oppimiskynnys oli meidän lähtökohtaamme ajatelleen sopivan matala. Samalla hankkeeseen osallistuneiden opiskelijoiden tietokoneen käyttötaidot kehittyivät. Havaitimme myös selvän itseluottamuksen nousun, kun opiskelijat havaitsivat pystyvänsä tuottamaan toimivia pelisisältöjä. Hankkeen toimijoiden mielestä hanke täytti sille asetetut tavoitteet sekä työelämäpelin, että myös hankkeeseen osallistuneiden aikuisopiskelijoiden työelämävalmiuksien kehittymisen osalta. Aikuisopiskelijoilta saatu palaute tuki myös vahvasti tätä näkemystä.

Havaintojemme perusteella tutkimme epälineaarisen tarinnankerronnan menetelmiä ja välineitä, sekä niiden pelimoottori-integraatiota enemmänkin ja pilotoimme niiden soveltuvuutta mm. joukkoistetun rakennussuunnittelun tai virtuaalisten työmaakokousten suunnitteluun ja ohjaukseen. Esittelemme työelämäpelin kehityshanketta ja epälineaarisen tarinnankerronnan menetelmien ja välineiden hyödyntämistä hankkeessa **julkaisussa VIII**. Lisäksi käsittelemme epälineaarisen tarinnankerronnan menetelmiä ja välineitä, sekä niiden integrointia esimerkiksi pelimoottoreiden tai sosiaalisen median kanssa **julkaisuisissa V, VI, VII ja IX**.

5.2 VASTAUKSIA VÄITÖSKIRJAN TUTKIMUSKYSYMYKSIIN

Seuravaksi vastataan väitöskirjan alussa esitettyihin tutkimuskysymyksiin tehtyjen pilotointien ja tutkimusten, sekä väitöskirjaan liittyvien julkaisujen avulla. Väitöskirjan ensimmäisenä tutkimuskysymyksenä on "Kuinka rakennuksen tietomalliin perustuvassa rakennussuunnittelussa voitaisiin nykyistä paremmin huomioida rakennuksessa tapahtuva toiminnallisuus ja sen vaatima tila?".

Tähän tutkimuskysymykseen vastataan esittelemällä keksimäni ja patentoimamme toiminnallisen suunnittelun menetelmä, joka tarjoaa menetelmän ja menetelmää tukevan prosessin minkä tahansa toiminnallisuuden vaatiman tilantarpeen tuomiseksi BIM-yhteensopiviin suunnitteluohjelmistoihin tai hyödyntämiseksi muulla tavalla.

Toiminnallisen suunnittelun menetelmä perustuu ajatukseen kuvata mitä tahansa todellista toimintaa siten, että kuvatusta toiminnasta saadaan rajattua toiminnan vaatima suurin tilantarve kolmiulotteisen avaruuden eri dimensioiden suhteen (x , y ja z). Näin saatujen tilatietojen perusteella luodaan 3D-tilaobjekti, joka sisältää toiminnan vaatiman suurimman tilan. Tilaobjekti voi olla minkä muotoinen tahansa, mutta olemme

pilotoinneissamme ja niihin liittyvissä tutkimuksissamme huomanneet, että sylinteri on usein optimaalisin muoto, koska toimintojen tilantarpeet ovat yleensä pyörähdyskappaleita. Mittakaava saadaan yleensä määriteltä riittävällä tarkkuudella kuvaamalla toiminnasta otettaviin otoksiin myös jotain tunnetun kokoista objektia hetken aikaa (esim. A4-paperiarkki) suunnilleen samalta etäisyydeltä kuvattavan toiminnan kanssa.

Mikäli 3D-tilaobjektit tallennetaan esimerkiksi IFC-standardin mukaiseen tallennusformaattiin, voidaan tilaobjektit tuoda mihin tahansa Open BIM -yhteensopivaan suunnitteluohjelmistoon ja näin päästään helposti ja konkreettisesti testaamaan, kuinka hyvin vaaditut toiminnallisuudet mahtuvat suunniteltaviin tiloihin. Tätä kautta saadaan suunniteltua käyttötarkoituksiinsa paremmin soveltuvia rakennuksia.

3D-tilaobjekteja voidaan hyödyntää pelillistetyissä tietomalleissa sellaisenaan tai niiden avulla voidaan toteuttaa esimerkiksi törmäystunnisteita, joiden avulla voidaan testata ja simuloida vaadittujen toimintojen mahtumista eri tiloihin. Menetelmää voidaan käyttää myös käänteisesti, eli sen avulla voidaan mitoitaa ja testata erilaisen toiminnan ulottumista haluttuihin kohteisiin. Menetelmää voidaan käyttää esimerkiksi rakennustyömaalla kiinteän nosturin sijoittamisessa siten, että se ulottuu riittävällä nostovoimalla haluttuihin kohteisiin. Menetelmälle on paljon erilaisia käyttökohteita rakennussuunnittelussa. Tässä väitöskirjassa esitellään vain muutamia. Tekemäni työsuhdekeksintö, johon toiminnallisen suunnittelun menetelmä perustuu, on patentoitu Suomessa sekä USA:ssa (Selin, 2016; Selin, 2019).

Olemme tehneet TKI-hankkeisiimme liittyen useita pilotointeja ja niihin liittyvää tutkimusta, joiden avulla pyrimme testaamaan ja kehittämään toiminnallisen suunnittelun menetelmää, sekä löytämään sille erilaisia käyttökohteita. Itse toiminnallisen suunnittelun menetelmää (FDM) ja menetelmän hyödyntämiseen liittyviä pilotointeja ja tutkimuksia käsitellään ensisijaisesti **julkaisuissa I, II, III ja IV**.

Lisäksi väitöskirja pyrkii vastaamaan tutkimuskysymykseen **”Kuinka Open BIM -standardien mukainen tietomalli saadaan pelillistettyä eri pelimoottoreille ja kuinka toiminnallisen suunnittelun menetelmää voidaan hyödyntää rakennussuunnittelussa yhdessä rakennuksen pelillistetyn tietomallin kanssa?”**.

Tähän tutkimuskysymykseen vastataan esittelemällä kehittämiämme menetelmän ja menetelmää tukevan prosessin Open BIM -standardien mukaisen tietomallin pelillistämiseksi pelimoottoreille siten, että myös tietomallin sisältävät metatiedot saadaan tuotua mallin mukana pelimoottoriin. Lisäksi tutkimuskysymykseen vastataan esittelemällä TKI-hankkeissamme tekemiämme pilotointeja, joissa testaamme

kehittämäämme tietomallin pelillistämismenetelmää, sekä menetelmää tukevaa prosessia käytännössä.

Pelillistimme pilotointien yhteydessä menetelmän avulla tietomalleista mm. yhteistyökumppanimme pääkonttorin, yhteistyökumppanimme toteuttaman kauppakeskuksen, yhteistyökumppanimme toteuttaman koulukeskuksen, sekä hankekumppanimme suunnitteleman paloaseman.

Kaikki edellä mainitut pelillistämämme tietomallit olivat lähtökohtaisesti Open BIM -standardien mukaisessa IFC-formaatissa ja pelillistimme niitä pilotoinneissamme suoraan pelimoottoreihin, sekä hankkeessamme kehitettyyn Virrake-sovellusalustaan. Lisäksi pelillistimme Mikkelin keskustan 3D-mallin, joka ei ollut Open BIM -standardien mukaisessa formaatissa, mutta menetelmää ja prosessia voitiin käyttää soveltaen myös tässä tapauksessa (**julkaisu VIII**). Menetelmä ja sitä tukeva prosessi toimivat mielestämme hyvin ja saimme pelillistettyä menetelmän avulla kaikki haluamamme tietomallit. Menetelmässä ja prosessissa on myös huomioitu mahdollinen mesh-mallien optimointitarve, sillä mallien koko kasvaa yleensä reilusti käännettäessä niitä IFC-formaatista johonkin pelimoottoreiden tukemaan mesh-pohjaiseen formaattiin. Lisäksi testasimme tietomallin sisältämien metatietojen tuomista menetelmän ja prosessin mukaisesti XML-muunnoksen kautta pelimoottoriin, jossa mallin osat ja metatiedot voidaan jälleen yhdistää yhteisen tunnisteiden avulla. HavaitSIMME tämänkin menetelmän ja kuvaamamme prosessin toimivan odotustemme mukaisesti.

Pilotoimme myös samalla toiminnallisen suunnittelun menetelmän (FDM) hyödyntämistä erilaisissa käyttökohteissa yhdessä pelillistettyjen tietomallien kanssa. Hyödynsimme toiminnallisen suunnittelun menetelmää mm. esteettömyyden suunnittelussa ja simuloinnissa mitoittamalla menetelmän avulla esteellisen rakennuksen käyttäjän eri toimintojen vaatimia tilantarpeita. Loimme menetelmän avulla mitoitetuista tilantarpeista vaihdettavat törmäystunnisteet pelihahmon ympärille (**julkaisu I**).

Lisäksi hyödynsimme toiminnallisen suunnittelun menetelmää kauppakeskuksen hätäpoistumiseen liittyvissä pilotoinneissamme mitoittamalla menetelmän avulla profiloiduille kauppakeskuksen asiakkaille profiiliensa mukaiset törmäystunnisteet (**julkaisut II, III ja IV**).

Hyödynsimme menetelmää pilotoinneissamme myös lastausalueen kuormausalueen mitoituksessa siten, että esimerkiksi rekat mahtuvat operoimaan alueella riittävän hyvin. Mitoitimme menetelmän avulla lisäksi tuotantotilojen tuotantolaitteiden tilantarpeita siten, että tuotantolaitteet mahtuvat toimimaan ja niiden väleissä on myös riittävän väljää ja turvallista liikkua.

Hyödynsimme menetelmää myös varastohyllyjen mitoituksessa ja sijoittelussa siten, että esimerkiksi trukki mahtuu operoimaan turvallisesti hyllyjen välissä ja ulottuu riittävällä nostovoimalla tarvittaviin kohteisiin (**Julkaisu IV**).

Havaitsimme, että toiminnallisen suunnittelun menetelmällä on paljon erilaisia käyttökohteita ja sitä voidaan hyödyntää yhdessä pelillistetyn tietomallin kanssa mitä erilaisimpiin käyttötarkoituksiin. Kun on tarve mitoittaa jonkun toiminnan tai objektin mahtumista tilaan tai vastaavasti ulottuvuutta tilassa, niin toiminnallisen suunnittelun menetelmästä on hyötyä. Tässä esitetyt käyttökohteet olivat vain esimerkkejä menetelmän käyttökohteista. Mielestäni kehittämämme menetelmä ja menetelmää tukeva prosessi tietomallin pelillistämiseksi, sekä pilotoimamme esimerkit toiminnallisen suunnittelun menetelmän hyödyntämisestä yhdessä pelillistetyn tietomallin kanssa vastaavat alussa esitettyyn tutkimuskysymykseen.

Kolmantena väitöskirjan tutkimuskysymyksenä on **”Millaisen tavan epälineaarisen tarinankerronnan menetelmät ja työkalut voisivat tarjota organisoida ja hallita joukkoistettua suunnittelua pelillistetyssä tietomallissa?”**.

Tähän tutkimuskysymykseen vastataan esittelemällä aiheesta tekemiämme käytännön pilotointeja ja pilotointeihin liittyviä tutkimuksia.

Pilotoimme aluksi rakennussuunnittelun joukkoistamista pelillistämällä yhteistyökumppanimme Pieksämäelle toteuttaman Hiekanpään koulukeskuksen tietomallin kehittämämme Virrake-sovellusalustan avulla (Construction Company U.Lipsanen Oy, 2019). Toteutimme koulukeskuksen ruokalan kalustamisesta kolme erilaista skenaariota ja annoimme oppilaiden tutustua vaihtoehtoihin pelillistetyn tietomallin avulla. Oppilaat pääsivät äänestämään skenaarioiden välillä Virrake-alustan tarjoaman äänestystyökalun avulla. Pilotointi oli siinä mielessä todellinen, että ennalta arvioitu vaihtoehto ei voittanutkaan äänestystä, vaan koulun oppilaat halusivat toisen vaihtoehdon. Äänestystulosta tietenkin kunnioitetaan ja oppilaat saavat ruokalaan haluamansa kalustuksen. Samalla oppilaat pääsivät kokeilemaan muutenkin yhteisöllisyyttä ja joukkoistettua suunnittelua pelillistetyssä tietomallissa Virrake-alustan tarjoaman monipelituen ansiosta.

Oppilaat ja koulun henkilökunta olivat erittäin innostuneita mahdollisuudesta osallistua tulevan koulunsa suunnitteluun. Kaikki toimijat olivat sitä mieltä, että rakennussuunnittelun joukkoistaminen ja yhteisöllinen suunnittelu ovat tulevaisuutta ja että rakennusten tulevien käyttäjien ottaminen suunnitteluun mukaan on toivottavaa.

Pilotoimme myös ideaamme virtuaalisista työmaakokouksista ja muista vastaavista monipelitapaamisista pelillistetyssä tietomallissa. Toteutimme pilotoinnin Virrake-sovellusalustan avulla pelillistämässämme yhteistyökumppanimme suunnittelemassa paloasemassa. Testasimme samalla Virreke-sovellusalustan tarjoamia mahdollisuuksia pelaajien väliseen kommunikointiin, sekä alustan tarjoamia yhteissuunnittelua helpottavia työkaluja. Pilotointi onnistui hyvin ja kaikki hankkeen toimijat ovat vakuuttuneita suunnittelun joukkoistamisen tarjoamista mahdollisuuksista ja hyödyistä. Virrake-sovellusalustasta, sekä siihen liittyvistä pilotoinneista löytyy lisää tietoa **julkaisusta X**.

Kehitimme myös ajatuksen epälineaarisen tarinankerronnan menetelmien ja työkalujen käytöstä joukkoistetun suunnittelun tapahtumien suunnitteluun, ohjaukseen ja raportointiin. Tällaista tarvitaan mielestämme ehdottomasti esimerkiksi virtuaalisten työmaakokousten suunnitteluun ja hallintaan. Tutkimme ja testasimme esimerkiksi Twineä, joka on suosittu epälineaarisen tarinankerronnan työkalu. Twinen erillisen käyttöliittymän avulla esimerkiksi virtuaalisen työmaakokouksen koollekutsuja voisi laatia kokouksen esityslistan ilman peliohjelmoinnin osaamista. Esityslista voitaisiin tuoda toimintalogiikaksi pelillistettyyn tietomalliin pelimoottoreiden tarjoaman Twine tuen ansiosta. Kokouksen osallistujat näkisivät esityslistan ja sen, mitä kohtaa kulloinkin ollaan käsittelemässä. Twinellä luodusta logiikasta (tarinasta) olisi myös mahdollista tehdä sellainen, että tehdyistä päätöksistä luotaisiin kokouksen jälkeen automaattisesti kokouspöytäkirja ja muut mahdolliset dokumentit.

Hyödynsimme Twineä myös toteuttaessamme työelämäpelin tehtävät ja niiden käsittelylogiikat siten, että hankkeessa mukana olevat aikuisopiskelijat pystyivät osallistumaan tehtävien laadintaan ilman peliohjelmoinnin osaamista. Aivan samasta asiastahan on kysymys myös esimerkiksi virtuaalisen työmaakokouksen kulun suunnittelussa ja ohjauksessa. Twinen kannalta ei myöskään ole väliä, onko kyseessä yksinpeli vai kokouksen kaltainen moninpelitapahtuma.

Tekemiemme tutkimusten ja pilotointien perusteella voidaan mielestämme todeta, että epälineaarisen tarinankerronnan menetelmät ja työkalut soveltuvat hyvin pelillistetyn tietomallin avulla tapahtuvaan joukkoistettuun rakennussuunnitteluun. Niiden avulla voidaan suunnitella tapahtumia, ohjata niiden kulkua, sekä tuottaa tapahtumista tarvittavat raportit ja pöytäkirjat. Epälineaarisen tarinankerronnan menetelmiä ja työkaluja, sekä niiden hyödyntämistä yhdessä pelimoottoreiden kanssa käsitellään **julkaisuissa V, VI, VII, VIII ja IX**.

5.3 YHTEENVETO TUTKIMUSMENETELMISTÄ JA TUTKIMUKSEN TULOKSISTA

Tässä luvussa esitellään taulukkomuotoon tiivistettynä yhteenveto väitöskirjan keskeisimmistä tuloksista, käytetyistä tutkimusmenetelmistä sekä siitä, mihin väitöskirjan tutkimuskysymyksiin tulokset liittyvät. **Taulukoissa 3 ja 4** esitetään toiminnallisen suunnittelun menetelmän (FDM) (luku 3, s. 51), sekä väitöskirjassa esitettävien pilotointien (luku 4, s. 69) välinen yhteys. Taulukoissa esitetään myös tutkimusten tutkimusote ja käyttämämme tutkimusmenetelmät, sekä väitöskirjan julkaisujen ja tutkimuskysymysten välinen yhteys.

Yksityiskohtaisemmat kuvaukset tekemistämme pilotoinneista ja pilotointeihin liittyvistä tuloksista löytyy väitöskirjan **luvusta neljä (s. 69)**. **Luvusta neljä** löytyvät myös tarkemmat kuvaukset pilotointien yhteydessä tekemiemme avointen haastattelujen ja teemahaastattelujen teemoista ja toteutuksista.

Kaikkiin kolmeen tutkimuskysymykseen vastataan konstruktiivisella tutkimusotteella suunnittelututkimuksen keinoin. Toteutimme ideoidemme pohjalta käytännön artefakteja, joiden avulla testasimme ideoiden toimivuutta käytännössä. Toimivuus todettiin osallistuvan havainnoinnin, sekä hankkeen toimijoihin ja eri sidosryhmiin kohdistettujen haastattelututkimusten avulla.

Taulukossa 3 on esitettyinä väitöskirjan kolme tutkimuskysymystä. Lisäksi taulukossa esitetään jokaisen tutkimuskysymyksen osalta tutkimusote ja käytetyt tutkimusmenetelmät. Taulukossa näkyy myös tutkimuskysymysten ja toiminnallisen suunnittelun menetelmän (FDM), sekä pilotointien ja julkaisujen välinen yhteys.

Jokainen väitöskirjan esittämistä pilotoinneista ja niihin liittyvistä julkaisuista liittyy vähintäänkin yhteen väitöskirjan esittämään tutkimuskysymykseen. Osa pilotoinneista ja julkaisuista liittyy useampaankin tutkimuskysymykseen.

Taulukon ”**Tutkimusote ja käytetyt tutkimusmenetelmät**”-sarakkeessa esitellään kunkin tutkimuskysymyksen osalta tutkimusote, sekä käyttämämme tutkimusmenetelmät. **FDM**-sarakkeessa esitetään, liittyykö keksimäni toiminnallisen suunnittelun menetelmä kyseiseen tutkimuskysymykseen ja kysymykseen liittyviin pilotointeihin sekä julkaisuihin.

Taulukon **Pilointi**-sarakkeessa on lueteltu kunkin tutkimuskysymyksen osalta ne pilotoinnit, joiden avulla on saatu vastauksia kyseiseen tutkimuskysymykseen. Lisäksi taulukon **Julkaisut**-sarakkeessa esitetään kyseiseen tutkimuskysymykseen ja siihen liittyviin pilotointeihin liittyvät julkaisut.

Nro	Tutkimuskysymys	Tutkimusote ja käytetyt tutkimusmenetelmät	FDM	Pilotointi	Julkaisut
1	Kuinka rakennuksen tietomalliin perustuvassa rakennussuunnittelussa voitaisiin nykyistä paremmin huomioida rakennuksessa tapahtuva toiminnallisuus ja sen vaatima tila?	Konstruktiivinen tutkimusote, kirjallisuuskatsaus, suunnittelututkimus, osallistuva havainnointi ja avoin haastattelu	X	1 ja 2	I, II, III ja IV
2	Kuinka Open BIM -standardien mukainen tietomalli saadaan pelillistettyä eri pelimoottoreille ja kuinka toiminnallisen suunnittelun menetelmää voidaan hyödyntää rakennussuunnittelussa yhdessä rakennuksen pelillistetyn tietomallin kanssa?	Konstruktiivinen tutkimusote, kirjallisuuskatsaus, suunnittelututkimus, osallistuva havainnointi ja avoin haastattelu	X	1 ja 2	I, II, III, IV ja X
3	Millaisen tavan epälineaarisen tarinankerronnan menetelmät ja työkalut voisivat tarjota organisoida ja hallita joukkoistettua suunnittelua pelillistetyssä tietomallissa?	Konstruktiivinen tutkimusote, kirjallisuuskatsaus, suunnittelututkimus, osallistuva havainnointi, teemahaastattelu ja avoin haastattelu		3 ja 4	IV, V, VI, VII, VIII, IX ja X

Taulukko 3. Tutkimuskysymysten ja pilotointien, sekä toiminnallisen suunnittelun menetelmän (FDM) välinen yhteys.

Taulukossa 4 esitetään yhteenveto keskeisimmistä vastauksista, joita toiminnallisen suunnittelun menetelmä (FDM) (luku 3, s. 51) ja väitöskirjassa esitettävät pilotoinnit (luku 4, s. 69) ovat antaneet väitöskirjan esittämiin tutkimuskysymyksiin. Yhteenvedossa eritellään lisäksi kuhunkin tutkimuskysymykseen ja esitettyyn vastaukseen liittyvät pilotoinnit, sekä näihin pilotointeihin liittyvät julkaisut.

Jokaisen tutkimuskysymyksen osalta taulukosta löytyy myös kuvaus käytetyistä tutkimusmenetelmistä. Taulukossa esitetään pilotointi- ja julkaisukohtaisesti kuvaus siitä, mitä tutkimusmenetelmiä on käytetty juuri kyseisen tutkimuskysymyksen yhteydessä pilotointien ja niihin liittyvien julkaisujen osalta.

Nro	Keskeisimmät vastaukset tutkimuskysymykseen ja käytetyt tutkimusmenetelmät
1	<p><u><i>Kuinka rakennuksen tietomalliin perustuva rakennussuunnittelussa voitaisiin nykyistä paremmin huomioida rakennuksessa tapahtuva toiminnallisuus ja sen vaatima tila?</i></u></p> <p>Keksimäni toiminnallisen suunnittelun menetelmä (FDM) (luku 3, s. 51), mahdollistaa minkä tahansa toiminnan vaatiman tilantarpeen mitoittamisen ja hyödyntämisen suoraan käytettävässä Open BIM -yhteensopivassa suunnitteluohjelmistossa tai pelillistetyssä tietomallissa. IFC 3D -tilaobjekteja voidaan käyttää joko sellaisenaan toiminnallisen suunnittelun apuna, tai niiden avulla voidaan luoda esim. erilaisia törmäystunnisteita. Tämä taas mahdollistaa esimerkiksi erilaiset automaattiset simuloinnit.</p> <p>Menetelmää ja sen hyödyntämistä on tutkittu ja testattu väitöskirjassa esitettävissä pilotoinneissa 1 (luku 4.2, s. 72) ja 2 (luku 4.3, s. 78).</p> <p>Pilotoinnissa 1 tähän tutkimuskysymykseen vastaava osuus on suunnittelututkimuksen periaatteiden mukaisesti luomamme käytännön artefakti. Artefaktin avulla esittelemme ideaamme siitä, kuinka keksimäni toiminnallisen suunnittelun menetelmän avulla voidaan rakennuksen pelillistettyä tietomallia hyödyntäen huomioida nykyistä paremmin rakennuksessa tapahtuva toiminta. Pelillistimme yhteistyökumppanimme Pieksämäellä sijaitsevan pääkonttorin tietomallin. Mitoitimme toiminnallisen suunnittelun menetelmän avulla vaihdettavia törmäystunnisteita pyörätuolilla liikkuvan pelihahmon ympärille. Törmäystunnisteet kuvasivat pyörätuolin käyttäjän erilaisten toimintojen vaatimia suurimpia tilantarpeita avustajien kanssa tai ilman avustajia.</p> <p>Arvioimme ideamme ja innovaatiomme toimivuutta suorittamalla koko pilotoinnin ajan osallistuvaa havainnointia. Lisäksi toteutimme osana pilotointia avoimen haastattelun, jossa selvitimme hankkeen yhteistyökumppaneidemme edustajien mielipiteitä ja näkemyksiä itse toiminnallisen suunnittelun menetelmästä ja sen käyttökelpoisuudesta suunnittelun apuvälineenä tämänkaltaisessa esteettömyyden suunnittelussa yhdessä rakennuksen pelillistetyn tietomallin kanssa. Pilotointi ja siitä saamamme tulokset vahvistivat näkemystämme siitä, että tällä tavoin voidaan testata esimerkiksi suunniteltavan rakennuksen esteettömyyttä. Menetelmä mahdollistaa myös erilaiset simuloinnit ja testausten automatisoinnin. Tähän pilotointiin liittyy ensisijaisesti väitöskirjan julkaisu I.</p> <p>Pilotoinnissa 2 ensimmäisen tutkimuskysymyksen esittämään haasteeseen rakennuksessa tapahtuvan toiminnallisuuden paremmasta huomioimisesta vastataan toteuttamalla suunnittelututkimuksen periaatteiden mukainen artefakti, jonka avulla suunnitelimme kauppakeskuksen hätäpoistumisteiden sijoittelua kauppakeskuksen pelillistetyn tietomallin, simulaatioiden ja data-analytiikan avulla. Keksimääni toiminnallisen suunnittelun menetelmää käytettiin pilotoinnissa kauppakeskuksen profiloitujen asiakkaiden erilaisten tilantarpeiden määrittämiseen. Määrittelyn pohjalta luotiin yksilölliset törmäystunnisteet (tilantarpeet) kunkin profiilin mukaiselle asiakkaalle.</p> <p>Jatkoimme pilotointia toteuttamalla edellä luodun artefaktin pohjalta uuden artefaktin, jossa kauppakeskuksen profiloituneet asiakkaat (pelihahmot) kirjoittavat lokiin metatietoineen kaikki mahdolliset törmäyksensä toisiin pelihahmoihin tai kauppakeskuksen rakenteisiin. Analysoimme näin saatua data-aineistoa tekoälyn ja koneoppimisen avulla ja pyrimme löytämään kauppakeskuksen hätäpoistumisen ongelmakohdat, sekä vertaamaan erilaisia hätäpoistumisvaihtoehtoja keskenään.</p>

	<p>Pyrimme arvioimaan ideoidemme ja innovaatioidemme toimivuutta suorittamalla pilotoinnin aikana osallistuvaa havainnointia. Lisäksi toteutimme osana pilotointia avoimen haastattelun, jossa selvitimme hankkeen yhteistyökumppaneidemme edustajien mielipiteitä ja näkemyksiä itse toiminnallisen suunnittelun menetelmästä ja sen käyttökelpoisuudesta apuvälineenä tämänkaltaiseen suunnitteluun yhdessä rakennuksen pelillistetyn tietomallin kanssa.</p> <p>Pilotointi ja sen aikana tekemämme havainnoinnit, sekä pilotointiin liittyvät haastattelut osoittivat menetelmän soveltuvuuden tämänkaltaiseen erilaisten toimintojen tilantarpeiden mitoitukseen yleisestikin. Tähän pilotointiin liittyvät myös julkaisut II, III ja IV.</p> <p>Edellä esitettyjen pilotointien lisäksi Julkaisu IV vastaa väitöskirjan ensimmäiseen tutkimuskysymykseen esittelemällä muutaman erillisen ideamme ja innovaatiomme hyödyntää toiminnallisen suunnittelun menetelmää tilantarpeiden mitoituksessa pelillistetyssä tietomallissa. Julkaisussa esitellään ideamme kuormausalueen mitoittamiseksi toiminnallisen suunnittelun menetelmää ja rakennuksen pelillistettyä tietomallia hyödyntäen siten, että rekat mahtuvat operoimaan alueella riittävän hyvin. Lisäksi julkaisussa esitellään ideamme tuotantotilojen mitoittamiseksi toiminnallisen suunnittelun menetelmää ja tuotantolaitoksen pelillistettyä tietomallia hyödyntäen siten, että tuotantolaitteille jää riittävästi tilaa toimia ja lisäksi laitteiden välissä on turvallista liikkua. Julkaisussa esitellään myös ideamme toiminnallisen suunnittelun menetelmän ja varastorakennuksen pelillistetyn tietomallin avulla tapahtuvasta hyllyjen ja hyllyvälien suunnittelusta siten, että trukki mahtuu operoimaan hyllyjen välissä riittävän väljästi ja turvallisesti. Lisäksi menetelmää voidaan hyödyntää mitoittamaan hyllyköt siten, että trukki ylettyy tarvittaviin paikkoihin riittävällä nostovoimalla.</p> <p>Loimme näidenkin ideoiden ja innovaatioiden pohjalta suunnittelututkimuksen mukaiset käytännön artefaktit ja esittelimme niiden avulla näitä ideoita ja innovaatioita hankkeen yhteistyökumppaneillemme. Samalla arvioimme ideoiden ja innovaatioiden toimivuutta suorittamalla osallistuvaa havainnointia, sekä tekemällä avoimen haastattelun liittyen heidän näkemyksiinsä näiden ideoiden ja innovaatioiden toimivuudesta. Nämäkin havainnot ja haastattelut vahvistivat näkemystämme siitä, että toiminnallisen suunnittelun menetelmä yhdessä rakennuksen pelillistetyn tietomallin kanssa auttavat huomioimaan suunniteltavassa rakennuksessa nykyistä paremmin rakennuksessa tai muussa vastaavassa kohteessa tapahtuvan toiminnallisuuden ja sen vaatiman tilan.</p>
2	<p><u>Kuinka Open BIM -standardien mukainen tietomalli saadaan pelillistettyä eri pelimooottoreille ja kuinka toiminnallisen suunnittelun menetelmää voidaan hyödyntää rakennussuunnittelussa yhdessä rakennuksen pelillistetyn tietomallin kanssa?</u></p> <p>Kehitimme yleisen menetelmän ja menetelmää tukevan prosessin Open BIM -standardin mukaisen tietomallin pelillistämiseksi metatietoineen (luku 2.3, s. 31). Lisäksi tutkimme ja pilotoimme keksimäni toiminnallisen suunnittelun menetelmää yhdessä pelillistetyn tietomallin kanssa mm. esteettömien tilojen mitoitukseen, hätäpoistumisen suunnitteluun sekä lastausalueiden, tuotantotilojen ja varastotilojen mitoitukseen.</p> <p>Tutkimme ja testasimme pilotoinneissa I (luku 4.2, s. 72) ja II (luku 4.3, s. 78) tähän aihepiiriin liittyviä asioita. Ensimmäisen tutkimuskysymyksen yhteydessä esitetyt pilotoinnit I ja II, sekä niistä saadut tulokset vastaavat myös osaltaan tähänkin tutkimuskysymykseen. Kehitimme yleisen</p>

menetelmän ja menetelmää tukevan prosessin Open BIM -standardin mukaisen tietomallin pelillistämiseksi. Lisäksi kehitimme ja pilotoimme erilaisia käyttökohteita, joissa pelillistettyä tietomallia ja toiminnallisen suunnittelun menetelmää voidaan käyttää yhdessä rakennussuunnittelun apuna. Pilotoimme vain muutamia mahdollisia käyttökohteita. Todellisuudessa erilaisia käyttökohteita on todella paljon. Tähän tutkimuskysymykseen ja siihen liittyviin pilotointeihin liittyvät myös väitöskirjan **julkaisut I, II, III ja IV**. Lisäksi **julkaisu X** liittyy aiheeseen tietomallin pelillistämisen ja pelillistetyn tietomallin hyödyntämisen osalta.

Pilotoinnissa 1 tähän toiseen tutkimuskysymykseen vastaava osuus oli testata kehittämäämme menetelmää ja menetelmää tukevaa prosessia Open BIM -standardin mukaisen tietomallin pelillistämiseksi. Lisäksi tähän tutkimuskysymykseen liittyi pilotoinnissa esiintyvän, keksimäni toiminnallisen suunnittelun menetelmän hyödyntäminen mitoituksen apuvälineenä pelillistetyssä tietomallissa.

Arvioimme kehittämäämme pelillistämismenetelmää ja sen toimivuutta, sekä toiminnallisen suunnittelun menetelmän hyödyntämistä yhdessä pelillistetyn tietomallin kanssa suorittamalla koko pilotoinnin ajan osallistuvaa havainnointia. Lisäksi toteutimme osana pilotointia avoimen haastattelun, jossa selvitimme hankkeen yhteistyökumppaneidemme edustajien mielipiteitä ja näkemyksiä kehittämästämme pelillistämismenetelmästä, sekä menetelmää tukevasta prosessista. Lisäksi selvitimme heidän mielipiteitään ja näkemyksiään toiminnallisen suunnittelun menetelmän käyttökelpoisuudesta tämällytyypisessä toiminnassa suunnittelun apuvälineenä. Pilotointi ja siitä saamamme tulokset vahvistivat näkemystämme siitä, että ideoimamme ja kehittämämme Open BIM -standardin mukaisen tietomallin pelillistämismenetelmä, sekä sitä tukeva prosessi toimivat myös käytännössä. Lisäksi pilotointi osoitti toiminnallisen suunnittelun menetelmän sopivan hyvin mitoituksen apuvälineeksi pelillistetyssä tietomallissa. Tähän pilotointiin liittyy ensisijaisesti väitöskirjan **julkaisu I**.

Pilotoinnissa 2 tähän tutkimuskysymykseen vastataan toteuttamalla suunnittelututkimuksen periaatteiden mukainen artefakti, jonka avulla suunnittelimme kauppakeskuksen hätäpoistumisteiden sijoittelua kauppakeskuksen pelillistetyn tietomallin, simulaatioiden ja data-analytiikan avulla. Tarkempi kuvaus tästä löytyy jo edellisen tutkimuskysymyksen yhteydestä. Pyrimme arvioimaan näidenkin ideoidemme ja innovaatioidemme toimivuutta suorittamalla pilotoinnin aikana osallistuvaa havainnointia. Lisäksi toteutimme osana pilotointia avoimen haastattelun, jossa selvitimme hankkeen yhteistyökumppaneidemme edustajien mielipiteitä ja näkemyksiä kehittämämme Open BIM -standardin mukaisen tietomallin pelillistämismenetelmästä ja tätä menetelmää tukevasta prosessista. Lisäksi selvitimme heidän mielipiteitään toiminnallisen suunnittelun menetelmän soveltuvuudesta tämänkaltaiseen esteettömyyden suunnitteluun.

Pilotointi ja sen aikana tekemämme havainnoinnit, sekä pilotointiin liittyvät haastattelut osoittivat menetelmän soveltuvuuden tämänkaltaiseen, erilaisten toimintojen tilantarpeiden mitoitukseen yleisestikin. Tähän pilotointiin liittyvät **julkaisut II, III ja IV**.

Edellä esitettyjen pilotointiensa lisäksi Julkaisu IV vastaa väitöskirjan toiseen tutkimuskysymykseen esittelemällä muutaman erillisen ideamme ja innovaatiomme hyödyntää toiminnallisen suunnittelun menetelmää tilantarpeiden mitoituksessa yhdessä pelillistetyn tietomallin kanssa. Tarkempi kuvaus näistä, sekä niihin liittyvistä tutkimuksistamme löytyy jo edellisen tutkimuskysymyksen yhteydestä.

	<p>Myös julkaisu X vastaa osaltaan tähän väitöskirjan toiseen tutkimuskysymykseen esittelemällä vaihtoehtoisen tavan Open BIM -standardin mukaisen tietomallin pelillistämiseksi kehittämämme Virrake-sovellusalustan avulla. Lisäksi Virrake-sovellusalusta mahdollistaa toiminnallisen suunnittelun menetelmän hyödyntämisen yhdessä sovellusalustan avulla pelillistetyn tietomallin kanssa luomalla toimintojen tilantarpeita kuvaavia primitiivejä (laatikoita, sylintereitä yms.) mittojen mukaan suoraan Virrake-sovelluksessa. Näitä voidaan hyödyntää erilaisessa tilojen mitoituksessa ja simuloinneissa.</p>
3	<p><u><i>Millaisen tavan epälineaarisen tarinankerronnan menetelmät ja työkalut voisivat tarjota organisoida ja hallita joukkoistettua suunnittelua pelillistetyssä tietomallissa?</i></u></p> <p>Toteutimme hankkeessamme työelämäpelin (artefaktin) pelillistämällä Mikkelin kaupungin keskustan 3D-mallin ja lisäämällä sinne erilaisia pelaajien työelämävalmiuksia parantavia aktiviteettejä. Toteutimme lisäksi työelämäpeliin monipelituen, jotta pääsimme testaamaan myös useamman samanaikaisen käyttäjän mahdollisia aktiviteettejä. Toteutimme työelämäpelin aktiviteetit epälineaarisen tarinankerronnan työkalun Twinen ja sen pelimoottori-integraation avulla. Testasimme samalla, voisivatko peliohjelmointiin perehtymättömät henkilöt luoda erilaisia aktiviteettejä pelimaailmoihin epälineaarisen tarinankerronnan menetelmiä ja työkaluja hyödyntäen. Havaitimme epälineaarisen tarinankerronnan menetelmien soveltuvan hyvin erilaisissa virtuaaliympäristöissä tapahtuvien toimintojen suunnitteluun ja ohjaukseen. Virtuaaliympäristöt voivat olla yksinpelityyppisiä tai monipeliympäristöjä.</p> <p>Toteutimme hankkeessamme lisäksi Virrake-sovellusalustan, joka on valmis monipelituella varustettu tietomallien pelillistämisalusta sisältäen mm. VR-tuen. Toteutimme pilotointiamme varten useita artefakteja, joiden avulla arvioimme Virrake-alustan ja siihen liittyvien ideoidemme ja innovaatioidemme toimivuutta. Lisäksi pilotoimme artefaktien avulla mm. joukkoistettua suunnittelua, kuten virtuaalisia työmaakokouksia ja monipelitapahtumien suunnittelua ja tapahtumien kulunhallintaa.</p> <p>Tutkimme ja testasimme pilotoinneissa III (luku 4.4, s. 88) ja IV (luku 4.5, s. 95) tähän aihepiiriin liittyviä asioita.</p> <p>Pilotoinnissa 3 tähän kolmanteen tutkimuskysymykseen vastataan kehittämämme työelämäpelin (artefakti) avulla. Pelin avulla pelaajat voivat kehittää mm. työelämätietojaan ja -taitojaan, sekä vuorovaikutustaitojaan. Toteutimme työelämäpelin tehtävät ja niihin liittyvän toimintalogiikan epälineaarisen tarinankerronnan menetelmien ja välineiden avulla. Tällöin tehtäviä ja niiden toimintalogiikkaa voidaan määritellä pelimoottoreiden ulkopuolella välineiden omien ja yleensä myös helppokäyttöisten työkalujen avulla. Valmis logiikka voidaan sitten tuoda pelimoottoriin esimerkiksi epälineaarisen tarinankerronnan välineiden tarjoaman pelimoottori-integraation avulla. Tutkimme pilotoinnin yhteydessä kahta pelimoottori-integraation sisältävää työkalua, Twinea ja Fungusta. Näistä päädyimme Twineen lähinnä sen monipuolisuuden ja yleiskäyttöisyyden vuoksi. Tämä osoittautui pilotoinnissa hyvin toimivaksi ja se soveltuu esimerkiksi ideoimiemme joukkoistetun rakennussuunnittelun ja virtuaalisten työmaakokousten yhdeksi toteutustavaksi yhdessä kohteen pelillistetyn tietomallin kanssa.</p> <p>Työelämäpeliin toteuttamamme monipelituki mahdollistaa myös erilaisten monipelitapahtumien järjestämisen pelillistetyssä tietomallissa. Lisäksi tuki mahdollistaa pelaajien välisen reaaliaikaisen kommunikoinnin.</p>

Arvioimme pilotoinnin aikana ideoimme ja innovaatioidemme toimivuutta ja käyttökelpoisuutta osallistuvan havainnoinnin avulla. Toteutimme lisäksi avoimen haastattelun, joka kohdistui hankkeen yhteistyökumppaneihimme. Suoritimme myös teemahaastattelun hankkeeseen osallistuneille aikuiskoulutettaville. Havainnoinnin ja suorittamiemme haastattelujen perusteella tulimme siihen johtopäätökseen, että epälineaarisen tarinankerronnan menetelmät soveltuvat hyvin pelimaailmassa tapahtuvaan toiminnan määrittelyyn ja ohjaamiseen. Oli sitten kyse yksinpelistä tai monipeliympäristöstä. Monipelitekniikat mahdollistavat myös suunnittelun joukkoistamisen ja muun vastaavan toiminnan. Tähän pilotointiin liittyviä asioita käsitellään myös suoraan tai välillisesti **julkaisuissa IV, V, VI, VII, VIII, IX.**

Pilotoinnissa 4 tutkimuskysymykseen vastataan kahden erillisen toteuttamamme artefaktin avulla. Toteutimme artefaktit kehittämämme Virrake-sovellusalustan avulla.

Ensimmäisen artefaktin avulla pilotoimme suunnittelun joukkoistamista ja Virrake-sovellusalustan toimivuutta yhteistyökumppanimme rakentaman koulurakennuksen kalustevaihtoehtojen suunnittelussa. Koulun oppilaat ja henkilökunta pääsivät näkemään pelillistetyn tietomallin avulla VR-lasien läpi tulevan koulurakennuksensa ja kommentoimaan suunnitelmia. Lisäksi he pääsivät äänestämään koulun pelillistetyssä tietomallissa koulun ruokalan kolmen erilaisen kalustevaihtoehdon välillä.

Toisen artefaktin avulla pilotoimme Virrake-sovellusalustan sisältämiä suunnittelu- ja kommunikointityökaluja. Käytimme yhteistyökumppanimme suunnitteleman paloaseman pelillistettyä tietomallia. Pilotointiin osallistuivat kaikki TKI-hankkeen yhteistyökumppanimme omilta työpisteiltään, jotta näkisimme, kuinka Virrake-sovellusalusta ominaisuuksineen ja joukkoistettu rakennussuunnittelu toimivat käytännössä.

Suoritimme molemmissa pilotoinneissa osallistuvaa havainnointia koko pilotoinnin ajan. Lisäksi toteutimme kummankin pilotoinnin yhteydessä hankkeen yhteistyökumppaneihin kohdistetun avoimen haastattelun, jonka avulla pyrimme selvittämään hankkeen yhteistyökumppaneidemme näkemyksiä ja mielipiteitä Virrake-sovellusalustan toimivuudesta ja tämänkaltaisesta joukkoistetusta suunnittelusta yleisemminkin. Lisäksi suoritimme koulurakennuksen kalustesuunnitteluun liittyen koulun oppilaisiin ja muutama opettajaan kohdistetun teemahaastattelun, jonka avulla selvitimme heidän näkemyksiään ja mielipiteitään tämänkaltaisesta osallistumisesta oman koulun tilojen suunnitteluun. Kaikki pilotointiin osallistuneet toimijat olivat sitä mieltä, että joukkoistettu suunnittelu ja muu kokoontuminen toimii pelillistetyssä tietomallissa erittäin hyvin ja että tämä on se suunta, johon rakennussuunnittelua tulisi tulevaisuudessa viedä. Esimerkiksi rakennuksen tulevien käyttäjien huomioiminen rakennussuunnittelussa nykyistä enemmän on kaikkien toimijoiden mielestä toivottavaa ja siihen tämänkaltaiset ratkaisut antavat hyvän mahdollisuuden. Tätä näkemystä tukee myös aiemmin väitöskirjassa esitelty aiheeseen liittyvä kirjallisuuskatsaus.

Tähän pilotointiin liittyviä asioita käsitellään pääosin **julkaisussa X.**

Taulukko 4. Yhteenvedo väitöskirjan tutkimuskysymyksiin löytämistämme vastauksista.

Esittelen väitöskirjassani ainoastaan väitöskirjan julkaisuihin liittyvät pilotoinnit. Teimme hankkeidemme aikana paljon muutakin tutkimus- ja kehitystyötä, sekä toteutimme erilaisia pilotointeja niihin liittyen. Rajaan ne kuitenkin tämän väitöskirjan ulkopuolelle.

5.4 TUTKIMUKSEN ARVIOINTIA

Yleistä arvioinnista

Tutkimuksen validiteetilla (pätevyydellä) tarkoitetaan, kuinka hyvin tutkimus mittaa juuri sitä asiaa, mitä sen avulla on tarkoituskin selvittää. Tutkimuksen validiteettia voidaan pitää yleisesti hyvänä, jos valittu tutkimusote ja sen sisältämät tutkimusmenetelmät vastaavat hyvin tutkittavaa ilmiötä. (Hirsjärvi, Remes, Sajavaara & Sinivuori, 2009.)

Tutkimuksen reliabiliteetillä (luotettavuudella) puolestaan tarkoitetaan sitä, kuinka luotettavasti ja toistettavasti käytetyt tutkimusmenetelmät mittaavat haluttua ilmiötä. Mitatut tulokset eivät saa olla sattumanvaraisia (Hirsjärvi, Remes, Sajavaara & Sinivuori, 2009.)

Vaikka validiteetti ja reliabiliteetti liitetäänkin yleensä ensisijaisesti kvantitatiiviseen (määrälliseen) tutkimukseen, niin sitä voidaan käyttää soveltaen myös kvalitatiivisen (laadullisen) tutkimuksen arviointiin. Myös kvalitatiivisen tutkimuksen puolella on tärkeää varmistaa, että tutkimus on tehty hyvin ja saadut tulokset, sekä niistä tehdyt johtopäätökset ovat oikeita. Laadullisen tutkimuksen yhteydessä tutkimuksen luotettavuutta parantaa mahdollisimman tarkka selvitys tutkimuksen toteuttamisesta, eli olosuhteista, joissa tutkimusaineisto on tuotettu. (Hirsjärvi, Remes, Sajavaara & Sinivuori, 2009.)

Suunnittelutieteeseen kuuluvassa suunnittelututkimuksessa pitäisi luodut artefaktit (konstruktit) olla uusia tai ainakin parempia ja tehokkaampia kuin parhaat aikaisemmin luodut artefaktit (konstruktit). Näin luodun konstruktion ja siitä toteutetun artefaktin (konstruktin) tulee myös tarjota ratkaisu kulloiseenkin tutkimusongelmaan ja lisäksi sen tulisi antaa tutkimuksen aihepiiriin uutta tutkimustietoa jollain uudella ja innovatiivisella tavalla. (March & Smith, 1995; Järvinen & Järvinen, 2011.)

Tutkimusotteen ja tutkimusmenetelmien valinnan arviointi

Suunnittelututkimus ja konstruktiivinen tutkimusote ovat paras ja ehkä jopa ainoa järkevä tapa toteuttaa pilotointiemme kaltaista hyvin voimakkaasti reaalimaailmaan kytkeytyvää ja hyvin käytännönläheistä tutkimusta. Suunnittelututkimuksessahan on periaatteena testata ideoita ja innovaatioita luomalla konstruktion pohjalta käytännön artefakti (konstrukti), jonka perusteella testataan ja arvioidaan idean tai innovaation toimivuutta käytännön kautta. (March & Smith, 1995; Järvinen & Järvinen, 2011.)

Kaikki väitöskirjassa esitettävät pilotoinnit on toteutettu konstruktiivisella tutkimusotteella suunnittelututkimuksen periaatteita noudattaen. Kaikissa pilotoinneissa toteutettiin vähintään yksi artefakti (konstrukti), jonka avulla pyrittiin selvittämään aina jonkun idean tai innovaation

toimiminen käytännössä. Toteutetut artefaktit on valittu siten, että ne toisivat esille tutkittavan idean tai innovaation mahdollisimman selkeästi. Lisäksi kaikki pilotointien artefaktit on pyritty luomaan siten, että niissä olisi uutuusarvoa. Tavoitteena on, että ne toisivat tutkittavan idean tai innovaation esille jollain uudella ja innovatiivisella tavalla, kuten edellä suunnittelututkimuksen yhteydessä todetaan. Tältä osin pilotoinnit ja niihin liittyvät artefaktit täyttävät lähtökohtaisesti suunnittelututkimuksen vaatimukset uutuudesta ja innovatiivisuudesta.

Suunnittelututkimus lähtee siitä ajatuksesta, että idean tai innovaation pohjalta kehitetään konstruktio ja sen pohjalta artefakti (konstruktio), jonka avulla päästään sitten arvioimaan idean tai innovaation toimivuutta käytännössä. Jokaiseen väitöskirjassa esitettyyn pilotointiin liittyy toteutettujen artefaktien ohella havainnointia ja haastattelututkimuksia. Niiden avulla pyritään arvioimaan (evaluoimaan) kulloisenkin idean tai innovaation toimivuus ja käyttökelpoisuus käytännössä.

Kaikki hankkeen toimijat suorittivat pilotointien aikana osallistuvaa havainnointia toimiessaan hanketiimien jäseninä. Tähän liittyy oleellisesti myös jokaisen pilotoinnin jälkeen hankkeen toimijoihin kohdistettu avoin haastattelu. Lisäksi kahteen pilotointiin (työelämäpeli ja koulun kalustus suunnittelu) osallistui hankkeen toimijoiden lisäksi myös joukko hankkeiden ulkopuolisia toimijoita. Näiden pilotointien yhteydessä suoritimme hankkeen ulkopuolisiin toimijoihin kohdistetun teemahaastattelun. Valitsimme teemahaastattelun, koska kohderyhmä ei ollut kovin perehtynyt aiheeseen ja tällöin pystyimme paremmin ohjaamaan haastattelun kulkua. Halusimme kuitenkin antaa haastateltaville melko avoimen mahdollisuuden kertoa kokemuksiaan, mielipiteitään ja näkemyksiään.

Seuraava taulukko esittää (**Taulukko 5**) kootusti pilotointeihin liittyvien haastattelujen tyypit, kohderyhmät ja otokset. Lisäksi taulukossa esitetään, kuinka monta prosenttia otos (n) on koko kohdepopulaatiosta. Tässä yhteydessä kohdepopulaatioksi ajatellaan kaikkien hankkeen toimijoiden joukko ja otokseksi ajatellaan kyseiseen tutkimukseen osallistuneiden hankkeen toimijoiden joukko. Taulukon prosenttiarvot (Otos (%) populaatiosta) eivät ole aivan tarkkoja, koska hankkeiden työntekijöiden määrät, samoin kuin yhteistyöyritystenkin hankkeisiin osallistuvien työntekijöidenkin määrät eivät olleet vakioita koko hankaan ajan. Hankkeisiin osallistui myös opiskelijoita työntekijöinä osa-aikaisesti eri rooleissa.

Pilotointi	Kohderyhmä	Haastattelun tyyppi	Otos (n)	Otos (%) populaatiosta
1	RedHal-hankkeen työntekijät ja hankkeen yhteistyöyritysten hankkeeseen liittyvät toimijat.	Avoin haastattelu	11	n. 80%
2	Virrake-hankkeen työntekijät ja kahden hankkeeseen liittyvän yhteistyöyrityksen toimijat.	Avoin haastattelu	7	n. 70%
3	”Työelämän digiosaaja”-hankkeen työntekijät, yhteistyökumppanit, sekä hankkeen aikuisopiskelijat.	Avoin haastattelu	25	n. 70%
	”Työelämän digiosaaja”-hankkeen aikuisopiskelijat.	Teema-haastattelu	13	n. 90%
4A Koulu	Virrake-hankkeen työntekijät ja hankkeen koulukeskukseen liittyvän yhteistyöyrityksen hankkeeseen liittyvät toimijat.	Avoin haastattelu	9	100%
	Yksi Hiekanpään koulun koululuokka ja heidän opettajansa.	Teema-haastattelu	35	n. 90%
4B Palo- asema	Virrake-hankkeen työntekijät ja hankkeen yhteistyöyritysten hankkeeseen liittyvät toimijat.	Avoin haastattelu	14	n. 90%

Taulukko 5. Pilotointeihin liittyvien haastattelujen tyypit, kohderyhmät ja otokset.

Tekemiemme artefaktien ja pilotoointeihin kohdistetun osallistuvan havainnoinnin ja haastattelujen avulla saimme melko hyvän kuvan kulloistekin ideoidemme ja innovaatioidemme toimivuudesta käytännössä. Eli havainnointi ja haastattelut antoivat riittävästi tietoa arvioinnin (evaluoinnin) suorittamiseksi, kuten suunnittelututkimuksen periaate edellyttää.

Tutkimuksen validiteetti

Ladullisen tutkimuksen perusteella toteutettu tulosten tulkinta on aina tutkijan oma henkilökohtainen näkemys. Tulkinnassa on aina jossain määrin mukana tutkijan omat intuiot ja tunteet. Tämän vuoksi tulosten tulkinta ei yleensä ole toistettavissa eikä siirrettävissä toiseen kontekstiin. Kaikesta huolimatta voidaan kuitenkin esittää joitain kriteereitä myös laadullisen tutkimuksen arvioimiseksi. Tällöin arviointi tulee kohdistaa ensisijaisesti tutkimusaineiston hankintaan, tutkimusaineiston analysointiin ja tutkimuksen raportointiin. (Eskola & Suoranta, 2000.)

Tässä tutkimuksessa pyritään hyvään validiteettiin kuvaamalla pilotoinnit riittävällä tarkkuudella ja siten, että tehtyjä valintoja myös perustellaan. Lisäksi saadut tulokset pyritään esittämään selkeästi ja tulosten tulkinnat perustellaan. Tulokset ja niiden tulkinnat suhteutetaan myös teoreettiseen viitekehykseen.

Tutkimuksen validiteettia voidaan tarkastella useammastakin eri näkökulmasta. Tarkastelen tässä väitöskirjan validiteettia rakennevaliditeetin, sisäisen validiteetin ja ulkoisen validiteetin näkökulmista.

Rakennevaliditeetilla tarkoitetaan tässä tapauksessa sitä, kuinka hyvin tutkimukseen osallistujat ovat käsitteellisesti samalla ymmärtämisen tasolla. Ilman riittävää rakenteellista validiteettia olisi todella vaikeaa saada pilotointeihin liittyvissä havainnoinneissa ja haastatteluissa valideja tuloksia. Voidaan katsoa, että rakennevaliditeetin näkökulmasta pilotointeihin osallistuneet toimijat olivat käsitteellisesti riittävästi samalla ymmärtämisen tasolla. Perusteluna tälle on, että:

1. Kaikki hankkeen toimijat, jotka suorittivat osallistuvaa havainnointia pilotointien aikana, olivat aikaisemmissa hankkeissa toimimisensa ja kirjallisuuden avulla perehtyneet aihealueeseen. He tunsivat alaa sekä rakennusalan, että myös tietotekniikan näkökulmasta. Lisäksi heillä on koulutus toiselta tai molemmilta aloilta.
2. Pilotointien yhteydessä suoritettujen avoimien haastattelujen kohdehenkilöt olivat kaikki rakennusalan ammattilaisia tai rakennusalaan perehtyneitä tietotekniikan ammattilaisia. Tästä syystä avoin haastattelu toimi hyvin ja sen avulla saatiin kerättyä arvokasta tietoa pilotoitavien ideoiden ja innovaatioiden käyttökelpoisuudesta ja mahdollisesta jatkokehityksestä.
3. Pilotointien yhteydessä suoritettujen teemahaastattelujen rakennevaliditeetti pyrittiin varmistamaan tutustuttamalla osallistujat jo hyvissä ajoin ennakolta pilotoinnin kohteeseen ja kertomalla mistä on kysymys. Samalla pyrittiin varmistamaan, että kaikki osallistujat (esim. koulun oppilaat ja henkilökunta, sekä työelämäpelin kehitykseen osallistuneet aikuisopiskelijat) olivat käsitteellisesti riittävällä tasolla tutkimukseen osallistumisen näkökulmasta. Lisäksi haastattelujen teemat oli suunniteltu etukäteen ja ne pyrittiin pitämään kohderyhmät huomioiden mahdollisimman selkeinä.
4. Itse olen ollut kaikkien pilotoinneissa käytettyjen sovellusten kehitystyössä isolla työpanoksella mukana ja käytännössä toteutin yksin pilotointien 1 ja 2 sovellukset. Minulla itselläni on tietojenkäsittelyn, sekä rakennusalan koulutukset, mitä pidän myös hyvänä asiana tämän tutkimuksen ja siihen liittyvien pilotointien rakennevaliditeetin näkökulmasta.

Sisäisellä validiteetilla (pätevyydellä) tarkoitetaan käytännössä sitä, ovatko tutkimusongelmat, käytetyt käsitteet ja tutkimusmenetelmät, sekä tehdyt johtopäätökset loogisia eivätkä riitele keskenään (Eskola & Suoranta, 2000).

Pilotointien tutkimusotteeksi valittiin konstruktiiivinen tutkimusote ja pilotointien tutkimusmenetelmäksi suunnittelutieteen alaan kuuluva suunnittelututkimus. Konstruktiiivinen tutkimusote ja suunnittelututkimus nähtiin oikeastaan ainoina käyttökelpoisina vaihtoehtoina, koska tutkimuksessa haluttiin testata keksimääni toiminnallisen suunnittelun menetelmää, kehittämäämme menetelmää ja prosessia rakennuksen tietomallin pelillistämiseksi, sekä niihin liittyviä ideoita ja innovaatioita käytännössä ja käytännön sovellusesimerkkien kautta. Halusimme tuottaa hankkeissamme konkreettisia tuloksia, joista olisi hyötyä yhteistyöyrityksillemme ja muille alan toimijoille käytännön rakennussuunnittelussa.

Jokainen pilottitutkimus tuotti kehittämämme idean ja/tai innovaation pohjalta vähintään yhden suunnittelututkimuksen periaatteiden mukaisen konstruktion ja siihen liittyvän käytännön artefaktin (konstruktiin), jota testasimme ja arvioimme (evaluoimme) yhdessä rakennusalan yhteistyökumppaneidemme kanssa. Kuten tutkimuksen rakennevaliditeettia käsittelevässä osassa aiemmin todettiin, niin kaikki hankkeen toimijat ovat alan ammattilaisia ja hyvin perehtyneitä alaan ja sen käsitteisiin. Tästä syystä heillä on hyvät edellytykset tuottaa pilotoinneista ja tätä kautta ideoista ja innovaatioista laadukkaita ja riittävän valideja johtopäätöksiä.

Pilotointien aiheet ja niissä toteutetut artefaktit eivät varmasti ole ainoita mahdollisia vaihtoehtoja testata juuri kyseistä ideaa tai innovaatiota, mutta ne on yhdessä rakennusalan yhteistyökumppaneidemme kanssa valittuja aihealueita. Ne tuovat mielestämme riittävän edustavasti ja konkreettisesti esille aina kulloinkin testattavan idean tai innovaation.

Ulkoisella validiteetilla tarkoitetaan tutkimuksen tuloksista tehtyjen johtopäätösten ja tutkimuksen empiirisen aineiston välistä suhdetta (Järvenpää & Kosonen, 2000). Tämä tarkoittaa käytännössä ensisijaisesti sitä, ovatko tulokset yleispäteviä vai onko kyseessä vain jokin tietty erikoistilanne, jota ei voida yleistää.

Väitöstutkimuksessa esiteltävissä pilotoinneissa toteutetut konstruktiot ja niistä edelleen johdetut käytännön artefaktit (konstruktit) on mietitty yhdessä rakennusalan yhteistyökumppaneidemme kanssa ja lähtökohtana on ollut ensisijaisesti ideoidemme ja innovaatioidemme toimivuuden testaus mahdollisimman yleisellä tasolla. Toki käytännön artefakti edustaa

aina jotain yksittäistä sovellusta ideasta tai innovaatiosta, mutta lähtökohtana on, että se edustaisi mahdollisimman yleisellä tasolla kyseistä ideaa tai innovaatiota.

Haastattelututkimusten todenperäisyys riippuu haastateltavien halusta ja kyvystä vastata tutkijoiden esittämiin kysymyksiin. Tästä syystä tutkimukseen pitää voida valita sellaiset haastateltavat, jotka tuntevat alan riittävän hyvin, ovat osallistuneet kohteena olevaan toimintaan ja myös muistavat tapahtuneet asiat riittäväällä tarkkuudella. Lisäksi on tärkeää luoda haastattelujen ilmapiiri sellaiseksi, että haastateltavilla ei ole tarvetta vääristellä asioita. (Toivonen, 1999.)

Ulkoisen validiuden vaatimukset täyttyvät väitöskirjan tutkimuksissa melko hyvin. Pilotoinnit ja niihin liittyvät artefaktit (konstruktit) on alan ammattilaisten kanssa pyritty valitsemaan siten, että tulokset olisivat mahdollisimman yleiskäyttöisiä ja alalle hyödyllisiä. Tätä korostaa vielä yhteistyökumppaneidemme halu saada tulokset hyödynnetyksi mahdollisimman nopeasti omassa yritystoiminnassaan. Lisäksi havainnoiteihin ja haastattelututkimuksiin osallistuneet henkilöt olivat hyvin perehtyneitä aihepiiriin, olivat motivoituneita, olivat koko pilotointien ajan mukana ja heillä ei myöskään ollut mitään tarvetta vääristellä tuloksia. Keskinäinen luottamus heidän kanssaan oli luotu jo aikaisemmissa yhteishankkeissa useamman vuoden aikana. Myös teemahaastatteluihin osallistuneet haastateltavat oli perehdytetty asiaan etukäteen ja he olivat hyvin innostuneita ja motivoituneita.

Tutkimuksen reliabiliteetti

Tutkimuksen reliabiliteetillä tarkoitetaan yleisesti tutkimuksen toistettavuutta. Eli jos sama tutkimus toistettaisiin, niin päädyttäisiinkin samoihin tuloksiin kuin kyseisessä tutkimuksessa. (Järvenpää & Kosonen, 2000.) Laadullisen tutkimuksen tapauksessa tämä tarkoittaa yleisesti tutkimuksen todenperäisyyttä, eli kuinka hyvin tutkimustuloksiin voi luottaa.

Kirjallisuuskatsauksen ja pilotoinneissa rakennettujen konstruktioiden ja niiden perusteella toteutettujen käytännön artefaktien osalta tutkimuksen reliabiliteetti on melko selkeä. Artefaktit edustavat yhdessä ideoimiamme ja innovoimiamme ratkaisuja rakennusalan yhteistyökumppaneidemme käytännön tarpeista nousseisiin ongelmiin ja kehitystarpeisiin. Eli väitöskirjan kaikki tutkimukset perustuvat rakennusalan käytännön todellisiin ongelmiin ja havaittuihin kehitystarpeisiin. Tarpeet on saatu hankkeidemme yhteistyökumppaneina toimivilta rakennusalan yrityksiltä. Toki he eivät edusta koko rakennusalaa, mutta edustavuus on kuitenkin melko hyvä. Mukana on arkkitehtitoimisto, rakennesuunnitteluun erikoistunut yritys, perinteinen rakennusyritys, IT-palveluja tarjoava yritys, liikenneasemia suunnitteleva ja rakentava yritys, sekä

ilmalämpöpumppuja ja muita LVI-laitteita valmistava yritys. Lisäksi heidän sitoutumisasteensa hankkeisiin on ollut korkea, sillä heillä on aito halu kehittää rakennusalaa ja sen käytänteitä. Myös kaikki yritykset ovat panostaneet hankkeisiin taloudellisesti merkittäviä summia. Tämä varmasti omalta osaltaan lisää myös sitoutumisen astetta.

Tarkemman tarkastelun tutkimuksen reliabiliteetin näkökulmasta vaativat pilotointien yhteydessä toteutetut havainnoinnit ja haastattelut. Tällaisten tutkimusten yleisenä ongelmana reliabiliteetin näkökulmasta on, että kaikkia kyseiseen haastattelutilanteeseen liittyviä tekijöitä ei millään voida sulkea pois, eli haastattelu on aina jonkin verran tilannesidonnainen (Järvenpää & Kosonen, 2000). Toisaalta mitä avoimempi haastattelu on, sitä paremmin haastattelua voidaan suunnata vielä haastattelutilanteessa haluttuun suuntaan. Tällöin saadaan paremmin selville esimerkiksi vastausten taustan motiiveja ja muita vastausten taustalla vaikuttavia seikkoja. (Hirsjärvi & Hurme, 2001.) Pilotointeihimme liittyvissä havainnoinneissa ja haastatteluissa voidaan luottamuksen ja tätä kautta rehellisyyden todeta olleen hyvällä tasolla, koska kaikki pilotointien osallistujat olivat pitkäaikaisia yhteistyökumppaneitamme. Lisäksi he olivat sekä rakennusalan ja/tai tietotekniikan ammattilaisia. Lisäksi pilotointien aikana oli havaittavissa selvää innostuneisuutta ja kaikilla toimijoilla oli myös aito halu kehittää rakennusalaa ja sen toimintoja pilotointien osoittamaan suuntaan. Toisaalta he osasivat olla myös kriittisiä pitkän kokemuksensa ja kovan ammattitaitonsa vuoksi. Heillä oli myös paljon käytännön osaamista rakentamisesta itsestään, sekä myös rakentamiseen liittyvästä muusta liiketoiminnasta.

Pilotointeihin osallistuneet peruskoulun oppilaat, opettajat ja aikuiskoulutettavat olivat myös silmin nähden innostuneita mahdollisuudestaan osallistua tällaiseen toimintaan. Lisäksi heihin kohdistettu teemahaastattelu oli enemmän strukturoitu, kun mitä ammattilaisiin kohdistetut avoimet haastattelut olivat. Toki heillekin annettiin myös mahdollisuus kertoa avoimesti asioita ja mielipiteitään virallisten teemojen ulkopuolelta.

Tulosten yleistettävyys

Tällaisessa tutkimuksessa on ensiarvoisen tärkeää, että tulokset ovat yleistettävissä. Aihetta sivuttiin jo aiemmin tässä luvussa, mutta käsitellään sitä tässä vielä hieman lisää. Pilotointeihin liittyvien artefaktien yleiskäyttöisyys pyrittiin varmistamaan yhdessä rakennusalan yhteistyökumppaneidemme kanssa. He ovat alan ammattilaisia ja tuntevat hyvin alan, sekä sen tarpeet. Vaikka he edustavat vain muutamaa rakennusalan yritystä, niin silti voidaan katsoa, että ostos on riittävän laaja-alainen ja kattava. Heidän mielipiteidensä ja näkemystensä voidaan katsoa edustavan yleisemminkin rakennusalaa. Erityisesti niitä rakennusalan toimijoita, jotka tunnistavat nykyiset alan ongelmat ja

haluavat kehittää alaa eteenpäin tietomallinnuksen ja tietomallien paremman hyödyntämisen suuntaan.

Väitöskirjan tarjoamat vastaukset väitöskirjan kolmeen tutkimuskysymykseen ovat melko hyvin yleistettävissä. Toiminnallisen suunnittelun menetelmä soveltuu pilotoinneissa esitettyjen käyttökohteiden lisäksi oikeastaan mihin tahansa suunnitteluun, jossa halutaan kaapata jonkin toiminnan vaatima tila ja varmistaa, että kyseinen toiminnallisuus mahtuu haluttuun tilaan. Sama toimii myös kääntäen, eli menetelmän avulla voidaan mitoitaa minkä tahansa toimijan (esim. ihminen tai trukki) ulottuvuus. Menetelmälle saadut Suomi- ja USA-patentit kertovat myös omalta osaltaan menetelmän uutuusarvosta ja yleiskäyttöisyydestä. Myös kehittämämme menetelmä ja menetelmää tukeva prosessi minkä tahansa Open BIM -standardin mukaisen tietomallin pelillistämiseksi on täysin yleiskäyttöinen. Menetelmää voidaan käyttää yksinään tai yhdessä toiminnallisen suunnittelun menetelmän kanssa. Lisäksi saamamme tulokset rakennussuunnittelun joukkoistamisesta monipelitekniikoiden avulla ovat hyvin yleiskäyttöisiä. Myös tulokset pelitapahtumien kulun määrittelystä ja ohjauksesta epälineaarisen tarinankerronnan menetelmien ja välineiden avulla ovat yleistettävissä.

Yhteenvedona voidaan todeta, että etsimme käytännön pilotointien avulla konstruktiiivista tutkimusotetta ja suunnittelututkimuksen periaatteita noudattaen vastauksia väitöskirjan kolmeen tutkimuskysymykseen. Vaikka pilotoinneissa toteuttamamme artefaktit ovat yksittäistapauksia, niin niiden avulla tekemämme tutkimukset osoittivat ideoidemme ja innovaatioidemme käyttökelpoisuuden myös yleisemmällä tasolla. Tämä varmistettiin vielä mukana olleiden rakennusalan ammattilaisten avulla. Eli väitöskirjan tulosten voidaan katsoa olevan yleistettävissä melko laajalti tietomallipohjaiseen rakennussuunnitteluun, sekä keksimäni toiminnallisen suunnittelun menetelmän osalta mihin tahansa tilantarpeiden tai ulottuvuuden mitoitukseen.

5.5 KESKUSTELUA JA POHDINTAA TULOKSISTA

Väitöskirjan aihe on mielestäni erittäin tärkeä ja ajankohtainen. Rakennusala on selvässä murroksessa. Rakennushankkeisiin tulee lisää toimijoita, joilta vaaditaan yhä saumattomampaa yhteistyötä. Samalla aikataulut tiukkenevat ja vaatimukset kasvavat. Suunnittelun ohjauksen merkitys korostuu entisestään, kuten edellä esitetyt tutkimuksetkin ovat osoittaneet (luku 2.1, s. 23). Tietomallinnus ja Lean-ajattelumalli valtaavat alaa (luku 3.1, s. 53). Vuosikymmeniä käytetyt menetelmät ja toimintatavat eivät välttämättä enää riitä tulevaisuudessa. Esimerkiksi yhä useampi rakennusalan tarjouskilpailu edellyttää jo nykyisin, että kilpailuun osallistujilla pitää olla valmius tietomallipohjaiseen suunnitteluun. Jopa

itse tarjous vaaditaan joissain tapauksessa tietomallin muodossa. Omasta ja haastattelemiemme rakennusalan yhteistyökumppaneidemme mielestä väitöskirjassa esitetyt ideat ja menetelmät voisivat tuoda merkittävää parannusta rakennusalan nykyiseen tilanteeseen, jos ne otettaisiin yleisesti käyttöön. Täytyy myös samalla todeta tämän olevan melkoinen haaste, koska rakennusala voidaan pitää hyvin konservatiivisena toimialana. Kuitenkin tämä on se suunta, jota kohti selvästikin ollaan rakennusosalalla menossa. Aikataulu vain on vielä auki.

Esimerkiksi ajatus tietomallipohjaisesta rakennusluvasta voi kuulostaa liian radikaalilta ja jopa hieman oudoltakin monen perinteisen rakennusalan toimijan mielestä. Kuitenkin tietomallipohjainen rakennuslupa mahdollistaisi monia sellaisia asioita, joita perinteinen rakennuslupahakemus ei mahdollista (luku 2.1, s. 23). Tätä on jo kokeiltu käytännössä ja hyödyt ovat ilmeisiä. Toki vaaditaan vielä kehitystyötä esimerkiksi prosessien ja ohjelmistojen yhteensopivuuden saralla. Tietomallipohjaisessa lähestymistavassa voitaisiin esimerkiksi viranomaisvaatimuksista luoda omat tarkistussääntönsä, jolloin vaatimusten täyttymisen varmistaminen olisi mahdollista automatisoida hyvinkin pitkälle. Lisäksi käyttäjien toiminnalliset vaatimukset voitaisiin tietomallin avulla todentaa aivan eri tasolla, kuin minkä perinteiset suunnitelmat ovat mahdollistaneet. Muutenkin tietomallipohjainen rakennuslupa mahdollistaisi aivan eri tasoisen kohteen havainnollistamisen. Kohde voitaisiin sijoittaa 3D-mallina esimerkiksi ympäristöstä tehtyyn 3D-malliin ja katsoa auringon valosta ja varjoista lähtien, miten kohde integroituu ympäristöönsä. Ympäristö voitaisiin mallintaa esimerkiksi dronen avulla, ellei valmista mallia ole saatavilla. Tässä väitöskirjassa esitettävä keksimäni toiminnallisen suunnittelun menetelmä sovellusalueineen voisi olla hyödyllinen apuväline jo rakennuslupavaiheessa tarkasteltaessa viranomais määräysten ja rakennuksen toiminnallisten tavoitteiden täyttymistä. Mikäli tietomallipohjainen rakennuslupa pelillistettäisiin, mahdollistaisi se jo rakennuslupavaiheessa erilaiset simuloinnit (esim. esteettömyys ja turvallisuus). Myös joukkoistettu suunnittelu ja erilaiset katselemukset mahdollistuisivat tätä kautta. Niiden avulla muutkin, kuin rakennusalan ammattilaiset voisivat ottaa kantaa suunnitelmiin jo alkuvaiheessa. Tämä olisi mahdollista pelillistetyn tietomallin ja monipelitekniikoiden tarjoaman korkean havainnollisuuden ja yhteisöllisyyden ansiosta.

Väitöskirjassa esiteltyjen hankkeiden yhteistyökumppaneiksi on valikoitunut sellaisia yrityksiä, jotka suhtautuvat havaintojeni mukaan huomattavasti keskimääräisiä rakennusalan yrityksiä myötemielisemmin tietomallinnukseen ja uusiin innovaatioihin. Tästä syystä tutkimuksen tulokset asiantuntijahaastattelujen osalta eivät välttämättä edusta tyypillisen suomalaisen rakennusliikkeen ajatuksia ja näkemyksiä asioista. Toki hankeisimmme oli tarkoituskin löytää ns. edelläkävijäyrityksiä, jotka

eivät vieroksu uusia menetelmiä ja uutta tekniikkaa, sekä ovat valmiita kokeilemaan uusia ideoita ja menetelmiä myös omassa liiketoiminnassaan. Olisi toisaalta ollut kiinnostavaa esitellä väitöskirjassa esitettäviä ideoita ja menetelmiä myös yrityksille, jotka eivät ole vielä ottaneet tietomallinnusta käyttöön ja joiden asenne muutenkin uusia asioita kohtaan olisi varauksellisempi ja pidättyväisempi kuin yhteistyöyrityksillämme.

Hankkeisiin osallistuvat yritykset ovat jo omassa liiketoiminnassaan nähneet, mitä hyötyä tietomallinnus ja siihen liittyvät väitöskirjassa esitetyn uudet tekniikat tuovat tullessaan. Esimerkiksi pääyhteistyökumppanimme Rakennusliike U. Lipsanen voitti jokin aika sitten suurehkon tarjouskilpailun Mikkelin keskussairaalan uusien sairaalarakennusten pelillistämiseksi VR-laseille siten, että sairaalan henkilökunta näki suunnitteilla olevat tilat virtuaalisesti ja tätä kautta he pystyivät kertomaan omia näkemyksiään suunnitelmasta ja antamaan omia parannusehdotuksiaan suunnitelmaan jo suunnitteluvaiheessa. He voittivat tarjouskilpailun juuri ketteryytensä ja hyvien tietomallin pelillistämismuutoksiensa ansiosta. Saamani tiedon mukaan myös pelillistämisen tilaajat olivat sitä mieltä, että tuo ylimääräinen suunnitteluvaihe tuotti hintansa moninkertaisesti takaisin toimivamman suunnitelman muodossa.

Väitöskirjan kirjallisuuskatsaus osoittaa, että väitöskirjan aihepiiriin liittyvää tutkimusta on tehty melko vähän, mutta sitä kuitenkin löytyy. Tehdyistä tutkimuksista käy ilmi, että tutkijat pitävät hyvin tärkeänä kehittää sellaisia menetelmiä, joiden avulla rakennussuunnittelun ja rakennussuunnitelmien selkeyttä ja havainnollisuutta pystyttäisiin lisäämään. Tätä kautta saataisiin rakennusten ja muiden kohteiden tulevat käyttäjät nykyistä paremmin suunnitteluun mukaan jo heti alusta lähtien. Nyt tätä vaikeuttaa oleellisesti, että suunnitelmien kunnollinen ymmärtäminen edellyttää yleensä rakennusalan tuntemusta, jota ei maallikoilta yleensä löydy. Tietomallinnus ja tietomallien pelillistäminen tuovat suunnitteluun kovasti kaivattua havainnollisuutta lisää.

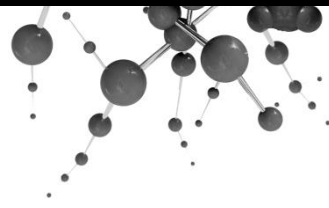
Joissain tutkimuksissa on myös tuotu esille tarve rakennuksessa tapahtuvan aktiivisuuden eli toiminnallisuuden parempaan huomioimiseen jo suunnitteluvaiheessa. Ratkaisuksi tähän tutkijat esittävät erilaisia menetelmiä ja toimintamalleja. Yleisesti tätä pidetään tärkeänä kehityssuuntana tulevaisuudessa. Keksimäni rakennusten toiminnallisen suunnittelun menetelmä (FDM) esittelee yhden uuden menetelmän ottaa kohteessa tapahtuva toiminta ja toiminnan vaatima tilantarve nykyistä paremmin huomioon jo suunnitteluvaiheessa.

Kirjallisuuskatsaus osoitti myös, että tutkijat pitävät suunnittelun joukkoistamista yhtenä tärkeänä tulevaisuuden suuntana. Heidän mielestään on erittäin tärkeää saada kaikki rakennushankkeen osapuolet

toimimaan jatkuvasti yhdessä yhteisen päämäärän eteen. Samalla tulevien käyttäjien saaminen suunnitteluun mukaan jo heti alkuvaiheessa on tavoittelemisen arvoinen kehityssuunta. Mielestäni tässä väitöskirjassa esitetyt ideat suunnittelun joukkoistamiseksi pelillistetyn tietomallin ja monipelitekniikoiden avulla, sekä tapahtumien kulun määrittely ja ohjaus epälineaarisen tarinankerronnan menetelmien avulla ovat juuri oikeansuuntaisia askeleita tähän suuntaan.

Viime aikoina on myös tutkimuksissa nostettu esiin termi Digital Twin (digitaalinen kaksonen). Termillä tarkoitetaan ajatusta siitä, että todellisen kohteen digitaalinen malli toimisi ikään kuin todellisen kohteen digitaalisena kaksosena. Digitaalinen kaksonen sisältää vaihtelavan määrän kommunikointia todellisen kohteen kanssa. Se voi tarjota esimerkiksi käyttöliittymän päästä rakennuksen valvontatietoihin käsiksi. Se voi myös tarjota mahdollisuuden ohjata ja säätää rakennuksen automatiikkaa. Tällöin rakennuksen digitaalinen kaksonen voitaisiin toteuttaa rakennuksen pelillistetyn tietomallin avulla.

Rakennusala on selkeässä murroksessa ja sen tulee ottaa oma digiloikkansa, jotta se pystyisi vastaamaan tulevaisuuden haasteisiin. Kyse ei mielestäni ole enää valinnasta, vaan kehitys on vääjäämätön. Tietomallinnus on tullut jäädäkseen ja siihen liittyvät, pelillistämisen kaltaiset lisäarvoa tuovat elementit tulevat varmasti yleistymään. Myös suunnittelun joukkoistaminen ja ajatus rakennuksen digitaalisesta kaksosesta ovat aivan varmasti rakennusalan tulevaisuutta. Väitöskirjassa esitettävät ideat ja menetelmät tuovat oman lisänsä tähän keskusteluun ja kehitykseen. Näitä ajatuksia tukevat vahvasti myös kirjallisuuskatsauksen tuoma tieto, sekä rakennusalan yhteistyökumppaneiltamme hankkeen aikana ja haastattelujen kautta saamamme näkemykset ja mielipiteet.



6 Johtopäätökset

Olemme yhteistyökumppaneidemme kanssa vakuuttuneita siitä, että tietomallien hyödyntäminen rakennussuunnittelussa ja rakennusten ylläpidossa tulee lisääntymään samalla, kun tietomallinnus yleistyy ja arkipäiväistyy. Pelimootoreiden kehityksen myötä ollaan myös huomaamassa pelillistämisen tarjoamat hyödyt rakennussuunnittelulle ja rakennusten ylläpidolle. Pilotointiemme ja niihin liittyvien tutkimustemme mukaan tietomallinnus ja tietomallin pelillistäminen tarjoavat yhdessä käyttökelpoisen ja monipuolisen toimintaympäristön kaikkiin suunnittelun tarpeisiin.

Lisäksi ajatus tietomallin roolista rakennuksen elinkaarenaikaisena käyttöliittymänä joko sellaisenaan tai pelillistettynä, tarjoaa todella paljon erilaisia mahdollisuuksia. Viime aikoina tutkijat ja muut toimijat ovat nostaneet myös esiin ajatusta ns. digitaalisesta kaksosesta (Digita Twin). Rakennuksen tai muun kohteen pelillistetty tietomalli toimisi mielestämme erittäin hyvin kohteen digitaalisen kaksosena (ylläpitokäyttöliittymänä) tarjoten mm. pääsyn todellisen kohteen seuranta- ja valvontatietoihin. Miksei myös esimerkiksi automaation ohjaukseen, kunhan tietoturva vain on kunnossa.

Uusien päätelaitteiden ja niihin liittyvien tekniikoiden (esimerkiksi VR, AR, MR ja XR) myötä pelillistetyn tietomallin käyttäjäkokemukset nousevat vielä aivan uusille tasoille. Uskomme, että tätä kautta pelillistämisen hyödyntäminen esimerkiksi rakennussuunnittelun ja havainnollistamisen apuvälineenä tulevat osaksi normaalia rakennussuunnittelua ja rakennusten elinkaaren aikaista ylläpitoa.

Sama koskee mielestämme myös muuta suunnittelua ja havainnollistamista toimialasta riippumatta. Myös suunnittelun joukkoistaminen ja erilainen yhteisöllinen suunnittelu tulevat varmasti olemaan tulevaisuuden kehitystrendejä kaikessa suunnittelussa. Esimerkiksi meidän pilotointimme, jossa rakenteilla olevan koulun oppilaat ja henkilökunta pääsivät valitsemaan koulun ruokalan kalusteet virtuaalisessa ympäristössä, herätti todella paljon innostusta ja mielenkiintoa.

Pilotointiin osallistuneiden toimijoiden mielestä tämä on juuri se suunta, johon suunnittelua tulee viedä tulevaisuudessa. Kohteiden tulevien käyttäjien saaminen mukaan jo suunnittelun alkuvaiheessa on mielestämme todella arvokas asia. Heiltähän löytyy usein paras asiantuntemus arvioida, kuinka hyvin suunniteltava kohde palvelee heidän tarpeitaan. Sama koskee mm. esteettömän kohteen suunnittelua. Kuka voisi olla sen parempi asiantuntija esteettömien ratkaisujen suunnittelussa, kuin kohderyhmään kuuluva henkilö itse.

Kehitimme hankkeessamme menetelmän ja menetelmää tukevan prosessin Open BIM -standardin mukaisen tietomallin pelillistämiseksi mille tahansa nykyaikaiselle pelimoottorille. Pilotoimme menetelmää, sekä prosessia. Havaitsimme molemmat niitä toimiviksi kaikenlaisissa rakennuskohteissa. Pelillistämisen suosion kasvun myötä näyttäisi siltä, että pelimoottorit alkavat enenevässä määrin tukemaan natiivisti erilaisia pelillistämiseen liittyviä menetelmiä ja tekniikoita. Esimerkiksi Unreal Engine -pelimoottori sisältää jo nyt natiivin tuen tuoda tietomalleja tai tietomallien osia metatietoineen oikeastaan mistä tahansa BIM-yhteensopivasta suunnitteluohjelmistosta. Muut pelimoottoreiden valmistajat (esim. Unity) tulevat seuraamaan uskoaksemme perässä.

Testasimme, pilotoimme ja tutkimme myös keksimääni ja patentoimaamme toiminnallisen suunnittelun menetelmää (FDM), joka mahdollistaa erilaisten suunniteltavassa kohteessa tapahtuvien toimintojen tilantarpeiden saamiseen suunnitteluun mukaan nykyistä paremmin. Havaitsimme menetelmän käytännössä toimivaksi ja näkemyksemme mukaan menetelmälle on todella paljon erilaisia käyttökohteita, joista olemme pilotoineet hankkeissamme vain muutamia.

Suoritimme TKI-hankkeidemme siis joukon käytännön pilotointeja ideoidemme ja kehittämiemme menetelmien, sekä niihin liittyvien prosessien tutkimiseksi ja testaamiseksi. Kaikkiin pilotointeihimme liittyi jollain tavalla tietomallin pelillistäminen. Useammassa pilotoinnissa oli myös toiminnallisen suunnittelun menetelmä tavalla tai toisella mukana. Havaitsimme toiminnallisen suunnittelun menetelmän hyvin monipuoliseksi. Emme varmasti osaa vielä kuvitellakaan kaikkia menetelmän tarjoamia mahdollisuuksia, emmekä käyttökohteita.

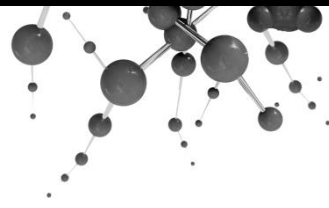
Myös data-analytiikan ja koneoppimisen menetelmien ja tekniikoiden tuominen pelillistettyyn tietomalliin, tarjoaa paljon uusia mahdollisuuksia entistä älykkäämpään rakennusten suunnitteluun ja elinkaarenaikaiseen hallintaan.

Aiomme tulevissa hankkeissamme jatkaa kehitystyötä saamiemme tulosten pohjalta. Viimeisin hankkeemme on keväällä 2020 käynnistynyt "Oppiva rakentaminen"-hanke. Hanke tulee keskittymään mm. älykkääseen rakentamiseen painopisteen ollessa mm. tekoälyn, data-analytiikan ja koneoppimisen hyödyntämisessä rakennusten elinkaarenaikaisessa datan hallinnassa. Tähän voidaan katsoa kuuluvaksi myös erilaiset rakennuksen pelillistetyssä tietomallissa toteutettavat simulaatiot ja niissä kerättyjen tietojen analysointi.

Kehitys menee esimerkiksi pelimoottoreiden, tekoälyn ja laitteistojen alueilla sellaisella vauhdilla eteenpäin, että on käytännössä täysin mahdotonta ennustaa tähän väitöskirjaan liittyvien asioiden kehitystä kovinkaan pitkälle tulevaisuuteen. Todennäköisesti kehitys tulee olemaan nopeampaa kuin mitä osaamme tänä päivänä kuvitella. Tämä koskee yhtä hyvin menetelmiä ja tekniikoita, kuin myös teknisiä laitteitakin. Ennustan, että esimerkiksi pelillistämisen saralla tulemme näkemään aivan huikeita juttuja jo aivan lähivuosina.

Meillä on alkamassa loppukevästä 2020 "Oppiva rakentaminen"-hanke. Hanke on arvoltaan lähes 600 k€ ja sen aikana on tarkoitus kehittää ja tutkia lisää mm. erilaisten simulaatioiden toteuttamista pelillistetyssä tietomallissa, sekä tekoälyn, koneoppimisen ja data-analytiikan hyödyntämistä kerätyn datan analysoinnissa.

Lisäksi eräänä tavoitteenamme on pyrkiä kehittämään rakennussuunnittelun automaatiota. Tämä on tarkoitus toteuttaa yhdistämällä tietomallin pelillistäminen, toiminnallisen suunnittelun menetelmä, tekoäly ja data-analytiikka, sekä rakennusliikkeillä ja muilla alan toimijoilla oleva toteutuneita rakennuskohteita koskeva data-aineisto (Big Data). Tämä hanke tulee varmasti tuottamaan mielenkiintoisia tutkimuksia ja pilotointeja, sekä niihin liittyviä julkaisuja.



7 Lähteet

- All, A., Van Looy, J. & Castellar, E.P.N. (2013). *An evaluation of the added value of co-design in the development of an educational game for road safety*. *International Journal of Game-Based Learning (IJGBL)*, 3(1), pp.1-17.
- Alonso, R., Borrás, M., Koppelaar, R.H.E.M., Lodigiani, A., Loscos, E. & Yöntem, E. (2019). *SPHERE: BIM Digital Twin Platform*. *Proceedings 2019*, 20, 9.
- Anttila, P. (1996). *Tutkimuksen taito ja tiedon hankinta*. Helsinki: Gummerus.
- Aram, S., Eastman, C., Sacks, R., Panushev, I. (2010). *Introducing a New Methodology to Develop the Information Delivery Manual for AEC Projects*. Paper 49. CIB W78. 27th International Conference 16-18 November 2010. Cairo. Egypt.
- Ashcraft, H. (2009). *Building Information Modeling: A Framework for Collaboration*. *Construction Lawyer*, 28 (3) 1-14.
<https://heinonline.org/HOL/LandingPage?handle=hein.journals/conlaw28&div=28&id=&page=> . Luettu 8.10.2019.
- Autodesk Inc (2019). *The official website of the Autodesk FBX format*.
<http://www.autodesk.com/products/fbx/overview>. Luettu 12.10.2019.
- Azhar, S., Brown, J. & Farooqui, R. (2009). *BIM-based sustainability analysis: An evaluation of building performance analysis software*.
<https://pdfs.semanticscholar.org/df0e/5bb056cba01ae8945459e060a1346c992b97.pdf>. The 45th ASC Annual Conference (Vol. 1, No. 4).

- Baranowski, T., Buday, R., Thompson, D.I. & Baranowski, J. (2008). *Playing for real: video games and stories for health-related behavior change*. American journal of preventive medicine, 34(1), pp.74-82.
- Barnes, J. (2015). *Microsoft Azure Essentials: Azure Machine Learning*. Microsoft Press, Redmond, Washington 98052-6399. ISBN: 978-0-7356-9817-8.
- Bazjanac, V. (2008). *IFC BIM-Based Methodology for Semi-Automated Building Energy Performance Simulation*. <https://www.osti.gov/servlets/purl/938422>. Luettu 12.9.2019.
- Becerik-Gerber, B. & Kensek, K. (2010). *Building information modeling in architecture, engineering, and construction: Emerging research directions and trends*. Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice, 136(3), 139-147. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EI.1943-5541.0000023](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EI.1943-5541.0000023).
- Bossavit, B. & Parsons, S. (2016). *This is how I want to learn: High Functioning Autistic Teens Co-Designing a Serious Game*. In Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (pp. 1294-1299). ACM.
- Buildercom Oy (2019). *The official website of the Buildercom Oy*. <https://buildercom.fi/>. Luettu 14.10.2019.
- BuildingSMART International (2019). *The official website of the buildingSMART*. <http://www.buildingsmart.org/>. Luettu 10.8.2019.
- BuildingSMART International (2019). *buildingSMART International Standards*. <https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/standards-library/>. Luettu 1.10.2019.
- BuildingSMART International (2019). *IFC4.1-standard*. https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4_1/FINAL/HTML/. Luettu 5.10.2019.
- Çıralı, H., & Usluel, Y. K. (2015). *A Descriptive Review Study about Digital Storytelling in Educational Context*. Presented at the 7th International Conference on Education and New Learning Technologies (EDULEARN15), Barcelona, Spain. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Hatice_Cirali_Sarica/publication/284177441.
- Construction Company U.Lipsanen Oy (2019). *Headquarters building. A 3D Model designed with ArchiCAD saved in the 3DS format*. Construction Company U.Lipsanen Oy, Pieksämäki, Finland, 2019.

- Construction Company U.Lipsanen Oy (2018). *A Building Information Model of Commercial Center in IFC format*, Pieksämäki, Finland, 2018.
- Construction Company U.Lipsanen Oy (2019) *A Building Information Model of Hiekanpää Scool Center in IFC format*, Pieksämäki, Finland, 2019.
- Cosma, G., Shopland, N., Battersby, S., Seymour-Smith, S., Pockley, A.G., Archer, M., Thompson, R., Khan, M. & Brown, D. (2015). *Co-design of a Prostate Cancer Se-rious Game for African Caribbean Men*. In 2015 International Conference on In-teractive Technologies and Games (pp. 71-75). IEEE.
- Davis, G. (2013). *Teaching Twine to Ten Year Olds*. [RE/ACTION]. [ONLINE] Avail-able at: <http://www.reactionzine.com/teaching-twine-to-ten-year-olds/>. Luettu 1.8.2019.
- De Jans, S., Geit, K., Cauberghe, V., Hudders, L. & De Veirman, M. (2017). *Using Games to Raise Awareness: How to Co-design Serious Mini-games?*. Computers & Education. 10.1016/j.compedu.2017.03.009.
- De Klerk, R., Duarte, A. M., Medeiros, D. P., Duarte, J. P., Jorge, J., Lopes, D. S. (2019). *Usability studies on building early stage architectural models in virtual reality*. Automation in Construction, 103, 104-116 (2019).
- Digiosaajaksi työelämään -hanke (2018). *"Digiosaajaksi työelämään" - hankkeen virallinen internet-sivusto*. Verkkosivusto: <https://www.xamk.fi/tutkimus-ja-kehitys/digiosaajaksi-tyoelamaan/>. Luettu 10.3.2019.
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R. & Liston, K. (2008). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, ISBN 978-0-470-18528-5.
- Eskola, J. & Suoranta, J. (2000). Johdatus laadulliseen tutkimukseen. Vastapaino.
- Fake Production Oy (2019). *Fake multi-user VR/AR – Next level meetings and collaboration*. <http://www.fake.fi/multiuser>. Luettu 30.8.2019.
- Friedow, A. J., Blankenship, E. E., Green, J. L., & Stroup, W. W. (2012). *Learning interdisciplinary pedagogies*. Pedagogy, 12(3), 405-424.
- Fungus (2019). *Funguksen virallinen verkkosivusto*. <https://fungusgames.com/>. Luettu 1.8.2019.
- Glue (2019). *Glue – Universal Collaboration Platform*. <https://glue.work/>. Luettu 30.8.2019.

- Grilo, A. & Jardim-Goncalves, R. (2010). *Value proposition on interoperability of BIM and collaborative working environments*. *Automation in Construction*, 19 (2010) 522–530. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.11.003>
- Hallberg, D. & Tarandi, V. (2011). *On the use of open bim and 4d visualisation in a predictive life-cycle management system for construction works*. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 16, 445–466. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-60984>. Luettu 15.12.2019.
- Hevner, A. R., March, S. T., Park, J. & Ram, S. (2004). *Desing Science in Information Systems Research*. *MIS Quartely*, 28:1, (ss. 75-105).
- Hilfert, T. & König, M. (2016). *Low-cost virtual reality environment for engineering and construction*. *Visualization in Engineering*, 4(2), 1-18 (2016).
- Hirsjärvi, S. & Hurme, H. (2001). *Tutkimushaastattelu, teemahaastattelun teoria ja käytäntö*. Helsinki: Helsingin yliopisto.
- Hirsjärvi, S., Remes, P., Sajavaara, P. & Sinivuori, E. 2009. *Tutki ja kirjoita*. 15. uud. p. Helsinki: Tammi.
- IfcOpenShell (2019). *The official website of the IfcOpenShell-project*. <http://ifcopenshell.org/> . Luettu 8.10.2019.
- Juul, J. (2002). *The Open and the Closed: Games of Emergence and Games of Progression*. *Computer Games and Digital Cultures Conference Proceedings*. Tampere University Press, June, 2002 Volume: 1. ISSN 2342-9666.
- Järvenpää, E. & Kosonen, K. (2000). *Johdatus tutkimusmenetelmiin ja tutkimuksen tekemiseen*, Teknillinen korkeakoulu, 101 s. (HUT Industrial Management and Work and Organizational Psychology Teaching Material No 1), ISBN 951-22-3321-5.
- Järvinen, P. & Järvinen, A. (2011). *Tutkimustyön metodeista*. Tampere: Opinpajan kirja. ISBN 978-952-99233-3-5.
- Kaewunruen, S., Rungskunroch, P. & Welsh, J. (2018). *A Digital-Twin Evaluation of Net Zero Energy Building for Existing Buildings*. *Sustainability*, MDPI, Open Access Journal, vol. 11(1), pages 1-22, December.

- Kakadiaris, I. & Metaxas, D. (1995). *3D Human Body Model Acquisition from Multiple Views*. IEEE International Conference on Computer Vision. 618-623. doi: <https://doi.org/10.1109/ICCV.1995.466881>
- Kalelioglu, F. (2015). *A new way of teaching programming skills to K-12 students*. Code.org. *Computers in Human Behavior*, 52, 200–210. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chb.2015.05.047>
- Kankainen J. & Junnonen J-M. (2015). *Rakennuttaminen*. Rakennustieto Oy, Vol. 3.
- Kharvari, F. & Höhl, W. (2019). *The Role of Serious Gaming using Virtual Reality Applications for 3D Architectural Visualization*. 11th International Conference on Virtual Worlds and Games for Serious Applications (VS-Games). IEEE. Electronic ISBN: 978-1-7281-4540-2. Print ISBN: 978-1-7281-4541-9. Electronic ISSN: 2474-0489. Print ISSN: 2474-0470. doi: 10.1109/VS-Games.2019.8864576
- Kim, H., Hilton, A. *3D Scene Reconstruction from Multiple Spherical Stereo Pairs*. *Int J Comput Vis* 104, 94–116 (2013). <https://doi.org/10.1007/s11263-013-0616-1>
- KIRA-digi hanke. (2020). Hnakeen www-sivusto. <http://www.kiradigi.fi/kokeiluhankkeet/kokeiluhankkeet/tietomalli-pohjainen-rakennuslupa-asuinkerrostalossa.html>. Luettu 20.10.2020.
- Klimas, C. (2019). *Twine / An open-source tool for telling interactive, nonlinear stories*. [ONLINE] Available at: <http://twinery.org/>. Luettu 6.10.2019.
- Koskenvesa, A ; Sahlstedt, S. (2011). *Rakennushankkeen ajallinen suunnittelu ja ohjaus*. Rakennustieto Oy. ISBN 978-951-682-994-7.
- Kosmadoudi Z, Lim T, Ritchie J, Louchart S, Liu Y, Sung R (2013). *Engineering design using game-enhanced CAD: The potential to augment the user experience with game elements*. *Computer-Aided Design* (2012), doi: 10.1016/j.cad.2012.08.00
- Kruus M. (2008). *Suunnittelun ohjausta tukevien menettelyjen kehittäminen projektinjohtorakentamisessa*. Teknillinen korkeakoulu, TKK Rakenne- ja rakennustuotantotekniikan laitos, Helsinki.
- Kuliga, S. F., Thrash, T., Dalton, R. C., Hölscher, C. (2015). *Virtual reality as an empirical research tool – Exploring user experience in a real building and a corresponding virtual model*. *Computers, Environment and Urban Systems*, 54, 363-375 (2015). doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2015.09.006

- Kunz, J. & Fischer, M. (2012). *Virtual design and construction: themes, case studies and implementation suggestions*. Working Paper #097, Center for Integrated Facility Engineering (CIFE), Stanford University (2012). url: <https://purl.stanford.edu/gg301vb3551>
- Laakso, M. & Kiviniemi, A. (2012). *The IFC Standard - A Review of History, Development, and Standardization*. *Electronic Journal of Information Technology in Construction*. 17.
- Lee, G., Eastman, C. M., Taunk, T., Ho, C. H. (2010). *Usability principles and best practices for the user interface design of complex 3D architectural design and engineering tools*. *International journal of human-computer studies*, 68(1-2), 90-104 (2010).
- Lee, Sang-Ho & Kim, Bong-Geun. (2011). *IFC Extension for Road Structures and Digital Modeling*. *Procedia Engineering*. 14. doi: 10.1016/j.proeng.2011.07.130.
- Leutenegger, S. & Edgington, J. (2007). *A games first approach to teaching introductory programming*. *ACM SIGCSE Bulletin*, 39(1), 115–118.
- Lin, Y. C., Chen, Y. P., Yien, H. W., Huang, C. Y., Su, Y. C. (2018). *Integrated BIM, game engine and VR technologies for healthcare design: A case study in cancer hospital*. *Advanced Engineering Informatics*, 36, 130-145 (2018).
- Magnusson, S.-E., Frantzich, H. & Harada, K. (1995). *Fire safety design based on calculations – Uncertainty analysis and safety verification*. Lund, SE: Lund University, 1995. 120 s. (Report 3078.) ISSN 1102–8246k.
- March, S. T. & Smith, G. F. (1995). *Design and natural science research on information technology*. *Decision Support Systems* 15 (1995) 251-266.
- Maru, A. (2015). *Lean Construction in Civil Engineering and Project Management: Case Study Analysis of UT Arlington College Park*. *American Journal of Civil Engineering*. Vol. 3, No. 3, 2015, pp. 70-74. doi: 10.11648/j.ajce.20150303.13
- Mastrolembo Ventura, S., Simeone, D., Ghelfi, D., Oliveri, E. and Ciribini, A. L. C. (2016). *Building Information Modeling and Gamification for Educational Facilities*, *ISTeA 2016 International Conference, BACK TO 4.0: Rethinking the Digital Construction Industry*, Naples, Italy, 30 June-1 July, 2016.
- Mavrikios, D., Karabatsou, V., Alexopoulos, K., Pappas, M., Gogos, P. & Chryssolouris, G. (2006). *An approach to human motion analysis and modelling*. *International Journal of Industrial Ergonomics*. Volume 36, Issue 11, November 2006, Pages 979-989.

- Microsoft (2019). The Azure Machine Learning service.
<https://azure.microsoft.com/en-us/services/machine-learning-service/>. Luettu 22.4.2019.
- Mitarakis P., Kapogiannis G. (2016). 4th International Workshop - *When Social Sciences meets Lean and BIM* - book of abstracts. University of Huddersfield Press, Huddersfield, UK. ISBN 978-1-86218-136-6.
- Moloney, J., Amor, R. (2003). *StringCVE: Advances in a game engine-based collaborative virtual environment for architectural design*. In: Proceedings of CONVR 2003 conference on construction applications of virtual reality, pp. 156-168 (2003).
- Müller, B.C., Reise, C. and Seliger, G. (2015). Gamification in Factory Management Education – A Case Study with Lego Mindstorms. *Procedia CIRP*, 26, 121-126.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.07.056>
- Nandavar, Anirudh & Petzold, Frank & Nassif, Dr & Schubert, Gerhard & Ag, Bmw. (2018). *INTERACTIVE VIRTUAL REALITY TOOL FOR BIM BASED ON IFC - Development of OpenBIM and Game Engine based layout planning tool - a novel concept to integrate BIM and VR with bi-directional data exchange*.
- Oldfield, J.; Van Oosterom, P.; Beetz, J. & Krijnen, T.F. (2017). *Working with Open BIM Standards to Source Legal Spaces for a 3D Cadastre*. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2017, 6, 351. doi: <https://doi.org/10.3390/ijgi6110351>
- Paloposki, T., Myllymäki, J. & Weckman H. (2002). VTT Oy. Julkaisu.
<http://www.vtt.fi>. ISBN:951-38-6114-7.
- Palos, S., Kiviniemi, A. & Kuusisto, J. (2014), *Future perspectives on product data management in building information modeling*. *Construction Innovation*, Vol. 14 No. 1, pp. 52-68. doi: <https://doi.org/10.1108/CI-12-2011-0080>.
- Panushev, I., Eastman, C., Sacks, R., Venugopal, M. & Aram, V. (2010). *Development Of The National BIM Standard (NBIMS) For Precast/Prestressed Concrete*. Paper 18.CIB W78. 27th International Conference 16-18 November 2010. Cairo. Egypt.
- Partala, T., Nurminen, A., Vainio, T., Laaksonen, J., Laine, M., Väänänen, J. (2010). *Saliency of visual cues in 3D city maps*. In: Proceedings of the 24th BCS Interaction Specialist Group Conference, pp. 428-432 (2010).

- Partala, T., Salminen, M. (2012). *User experience of photorealistic urban pedestrian navigation*. In: Proceedings of the International Working Conference on Advanced Visual Interfaces, AVI 2012, pp. 204-207 (2012).
- Rakennustieto Oy (2019). *RT-kortisto. Esteettömyys*.
<http://www.esteettomyys.rakennustieto.fi/vaatimukset>. Luettu 14.9.2019.
- Rossi, J. & Dave, B. (2015). *Digitalization and quality enhancement initiatives in sw assisted design processes in building and construction industries*. 9th International Conference on Computer Engineering and Applications, Dubai, 2015. ISBN 978-1-61804-276-7.
- Sacks, R., Koskela, L.J., Dave, B. and Owen, R. (2010). *The interaction of lean and build-ing information modeling in construction*. Journal of Construction Engineering and Management, 136 (9), pp. 968-980.
- Salem, O., Asce, M., Solomon, J., Genaidy, A. & Minkarah, I. (2006). *Lean Construction: From Theory to Implementation*. Journal of Management in Engineering - J MANAGE ENG. 22. doi: 10.1061/(ASCE)0742-597X(2006)22:4(168).
- Seaborn K., Felsh I. D, (2015). *Gamification in theory and action: A survey*. International Journal of Human-Computer Studies Volume 74, 2015, Pages 14-31. ISSN: 1071-5819,
<https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2014.09.006>, Elsevier Ltd.
- Seed, W. R. (Ed.). (2015). *Transforming design and construction: A framework for change*. Lean Construction Institute.
- Selin, J. (2016). Patentti. Kaakkois-Suomen Ammattikorkeakoulu Oy. *An action space defining object for computer aided design*. FI 125913 B.
- Selin, J. (2019). Patentti. Kaakkois-Suomen Ammattikorkeakoulu Oy. *An action space defining object for computer aided design*. US 10,296,667 B2.
- Shen W, Shen Q & Sun Q. (2012). *Building Information Modeling-based user activity simulation and evaluation method for improving designer-user communications*, Automation in Construction, Volume 21, 2012. Pages 148-160. ISSN 0926-5805, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.05.022>.
- Shen W., Zhang X., Shen Q. (2013) Terrence Fernando, *The User Pre-Occupancy Evaluation Method in designer-client communication in early design stage: A case study*. Automation in Construction, Volume 32, 2013, Pages 112-124, ISSN 0926-5805.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.01.014>

- Shinde G. & Jadhav V.S. (2012). *Ergonomic analysis of an assembly workstation to identify time consuming and fatigue causing factors using application of motion study*. International Journal of Engineering and Technology. 4. 220-227.
- Sipiläinen, P. (2011). *Kuntouttavan hoivatyön vaatimukset ikäihmisten asunnoille. Demands on dwellings for the elderly in home care*. Doctoral Dissertation. Aalto University, Finland. ISBN 978-952-60-4225-1. In Finnish, 2011. 176 pp.
- Suermann, P. & Issa Raja. R.A. (2010). *United States Air Force Milcon Transformation: Building Information Modeling Case Studies*. Paper 46.CIB W78. 27th International Conference 16-18 November 2010. Cairo. Egypt.
- Tauriainen, M, Marttinen, P, Dave, B & Koskela, L. (2016). The effects of BIM and lean construction on design management practices. in Creative Construction Conference 2016, CCC 2016, 25-28 June 2016 : Selected papers. Procedia Engineering, vol. 164, Elsevier, pp. 567-574, Creative Construction Conference, Prague, Czech Republic, 21/06/2014. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.659>
- Tekla Oy (2019). *Tekla Promotes Open Approach to BIM*. Verkkosivu. <http://www.tekla.com/company/building-construction/Open-BIM>. Luettu 20.10.2019.
- Tekla Oy (2019). *Trimble Connect -alustan verkkosivusto*. <http://www.tekla.com/fi/tuotteet/tekla-bimsight>. Luettu 1.8.2019.
- Toivonen, Timo (1999). *Empiirinen sosiaalitutkimus. Filosofia ja metodologia*. Porvoo: WSOY.
- Topalli, D., & Cagiltay, N. E. (2018). *Improving programming skills in engineering education through problem-based game projects with Scratch*. Computers & Education, 120, 64-74. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2018.01.011>
- Twine (2019). *Twinen virallinen verkkosivusto*. <https://twinery.org/>. Luettu 1.8.2019.
- Unity Inc (2019). *The official website of the Unity game engine*. Verkkosivusto: <https://unity.com/>. Luettu 15.9.2019.
- Unity Inc (2019). *The official website of Navigation System in Unity*. <https://www.unity3d.com/Manual/nav-NavigationSystem.html>. Luettu 20.9.2019.

- Unreal Engine Website (2019). Unreal Engine -game engine. *The official website*. <https://www.unrealengine.com/en-US/>. Luettu 20.10.2019.
- van Berlo, L.A.H.M., Beetz, J., Bos, P., Hendriks, H. & Tongeren, R.C.J. (2012), *Collaborative engineering with IFC: new insights and technology*. in G Gudnason & R Scherer (eds), 9th European Conference on Product and Process Modelling, July 25-27, 2012. Reykjavik, Iceland. Routledge Taylor & Francis Group, New York, pp. 811-818.
- Virrake (2020). *Virrake-sovellusalan virallinen internet-sivusto*. Verkkosivusto: <https://virkake.fi/>. Luettu 12.3.2020.
- Virrake (2019). *"Virtuaalinen rakentaminen"-hankkeen virallinen internet-sivusto*. Verkkosivusto: <https://www.xamk.fi/tutkimus-ja-kehitys/virtuaalinen-rakentaminen/>. Luettu 12.3.2019.
- Viitanen, K., Harju, V., Niemi, H., & Multisilta, J. (2014). *Digitaalisen tarinankerronnan monet mahdollisuudet. Rajaton luokkahuone*. Opetus 2000 (pp. 187–211). Jyväskylä: PSkustannus.
- Waly, A. F. & Thabet, W. Y. (2003). *A virtual construction environment for preconstruction planning*. *Automation in construction*, 12(2), 139-154 (2003).
- Wang, S., Van Schyndel, M., Wainer, G., Rajus V.S. & Woodbury, R. (2012) *DEVS-based Building Information Modeling and simulation for emergency evacuation*. *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC)*, Berlin, 2012, pp. 1-12. doi: 10.1109/WSC.2012.6465087
- Wang S-H., Wang W-C., Wang K-C., Shih S-Y. (2015). *Applying building information modeling to support fire safety management*. *Automation in Construction*. Elsevier. Volume 59, November 2015, Pages 158-167. ISSN: 0926-5805. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.02.001>
- Weckman, H. (1997). *Rakennuksista poistumisen laskennallinen arviointi*. VTT Oy, Jul-kaisu. ISBN 951-38-5133-8, ISSN 1235-060.
- W3C. *Tietoja W3C -organisaatiosta*. <http://www.w3.org/Consortium/>. Luettu 10.9.2019.
- The National Research Council (Cnr). (2019). *The official website of the MeshLab software*. Luettu 10.8,2019. <http://www.meshlab.net/>
- The xBIM Toolkit (2019). *Avoimen xBIM-projektin GIT-sivusto*. <https://github.com/xBimTeam>. Luettu 5.8.2019.

Yousefi, S., Kondori, F. A., & Li, H. (2011). *Stereoscopic visualization of monocular images in photo collections*. *Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), 2011 International Conference on* (ss. 1-5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/WCSP.2011.6096688>

Zhang, C., Beetz, J., Weisen, M. (2015). *Interoperable validation for IFC building models using open standards*. *ITcon Vol. 20, Special issue ECPPM 2014 - 10th European Conference on Product and Process Modelling*, pg. 24-39, <https://www.itcon.org/2015/2>



Julkaisu I

Selin, J., & Rossi, M. (2016). Simulation of Universal Design by a Functional Design Method and by Gamification of Building Information Modeling. In *Proceedings of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS 2016)* (pp. 1671-1674). ACSIS, Vol. 8. ISSN 2300-5963. <http://dx.doi.org/10.15439/2016F306>

Julkaisukanavan taso: **JUFO 1**

© ACSIS 2016, Reprinted with permission.

Simulation of Universal Design by a Functional Design Method and by Gamification of Building Information Modeling

Jukka Selin

Department of Electrical Engineering and Information
Technology, Mikkeli University of Applied Sciences
Ltd Patteristonkatu 2, 50100 Mikkeli FINLAND
jukka.selin@mamk.fi

Markku Rossi

Department of Electrical Engineering and Information
Technology, Mikkeli University of Applied Sciences
Ltd Patteristonkatu 2, 50100 Mikkeli FINLAND
markku.rossi@mamk.fi

Abstract—We have developed a method and a process with which we can simulate the functionality and the space requirements of different actions in buildings. We utilize Gamification of Building Information Modeling (BIM). The essential goal of Building Design is to produce designs corresponding to customers' needs. In our method the electronic CAD model is inserted into a Game Engine and is gamified. Features and limitations that correspond to the reality as exactly as possible are generated for the virtual objects steered in the game by the designers. In addition, the space requirements for the actions performed by a simulated user can be dimensioned by our Functional Design Method. We generate 3D space objects of maximum space requirements for actions from videos of real human actions. The 3D space objects created this way can be Collider Objects used by the designers attending to the Gamification. We get simulated User Experiences from the rooms under design. This method helps to understand better than before different end users and their needs. The result is buildings that fit the requirements of the users.

I. INTRODUCTION

The Pilot Experiments described in this article use our method to generate computer game like environments out of a Building Information Models (BIM) by Gamification. The gamified Building Model enables us to simulate actions in buildings.

With the aid of the gamified model we can simulate different User Experiences in a building already when the building is under design.

The "Players" following different roles can move like the First Person Controller (FPC) or the Third Person Controller (TPC) in the virtual space. Features and limitations according to a role (e.g. a Handicapped using a wheelchair) can be realised.

The Game Object can include the space requirements belonging to the actions of the role. The space requirements are from our Functional Design Method, FDM [1],[2]. From the space requirements we can generate variable Collider Functions around the Game Object. The method makes it possible to simulate different functionalities and space requirements related to actions. The Player can e.g. take the role of a person using a rollator. With the aid of the gamified

Building Model he can get the User Experience of moving around with a rollator. We detect already in the beginning the possible problems and shortcomings, and corrections are then low coast and fast compared to during the construction or even after the building project.

The developed method also helps designers of the Construction Industry to better understand the needs and limitations of buildings. It is also possible to involve the user groups to the design via the method of gamified Building Model. The end users can get a view that is understandable and real enough. We can then achieve buildings that match more closely their purpose.

With the method it is also possible to automate the testing against the Universal Design principles, by moving 3D-models with their space requirements (like a wheelchair patient with two assistants) automatically through the model. After the tests the possible problems and their locations can be found in the report automatically generated.

If the designer uses VR glasses, like Oculus Rift, the User Experience of the gamification of Building Information Models can be quite realistic.

The gamification of the models serves all phases of the construction project from sales and marketing until the completion of the Architectural Design. By the aid of the gamified model it is possible to communitise and crowdsourcing by distributing the gamified model in the Internet. The end users can then be given an opportunity to present ideas, test functionalities and so attend to the design.

This article first describes the methodologies and software related to the research. Then we present the new method and the process for gamification of Building Information Models as an aid in design. Finally, we observe the meaning of the new results and scenarios for the next steps.

II. METHODOLOGIES AND SOFTWARE USED IN THE RESEARCH

The developed method utilises a work based invention report at Mikkeli University of Applied Sciences Ltd (Mamk) filed by Jukka-Pekka Selin. The maximum space requirement in dimensions x,y and z can be derived from video clips of real human actions. In this method the real actions are videoed with at least two video cameras that are situated at right angles. The need of space from the actions in three

dimensions is measured and a corresponding geometrical object is created. This 3D object in IFC file format is compatible with CAD software. The goal is to ensure that the required actions can fit the space under design. [1],[2],[3].

During the research program the application that is BIM compatible, under development and is meant for Lifecycle Management of Building Data, and the application extension Value Add Data of Mamk R&D, were used for creating 3D objects. The application extension realizes the functionality of the FDM. The Colliders describing the space requirements for different actions to the gamified model were created via the execution of the Value Add Data software.

The 3D-model that contains a Building Model was realised with the ArchiCAD design software and it was gamified with the Unity Game Engine.

III. THE FDM TOGETHER WITH THE GAMIFICATION OF THE BUILDING INFORMATION MODELS ENHANCE THE QUALITY, VISIBILITY AND UNDERSTANDABILITY IN DESIGN

When the practices of BIM develop, new ways to design, visualise and analyse buildings are developed in parallel. The earlier the issues are detected and corrected, the lower are the costs and related work efforts. The FDM we developed earlier is a method and process born out of need. It can be applied very well in parallel with BIM, and could even be standardised to be an integral part of it.

The FDM can be the basis for developing new analysis functions, techniques and methods to support the design process and the designers.

We combined the FDM to the gamification of the Building Models and did research on whether it could be possible to create User Experiences about how the usage of e.g. a wheelchair or a rollator succeeds in the spaces under design.

With the aid of the 3D space objects from the FDM we can generate e.g. Colliders around the functional unit (e.g. a wheelchair user with two assistants). Collider is a term used in Game Design. The Collider then corresponds to the measured space requirements of the human action. In the First Person Controller concept the Colliders created this way can be attached to the virtual model of a wheelchair Use Case. After this we could move around with the wheelchair in the gamified Building Model and swap the Collider according to the actions the handicapped and his assistants were doing.

When VR glasses like Oculus Rift are used, we got a very realistic User Experience about how it would feel to move and perform different kinds of functions with a wheelchair in a real building.

Our partners agreed this kind of visualisations and generation of User Experiences are one of the directions for forcefully developing BIM and its applications. This kind of approach is quite new in the relatively conservative Construction Industry, but we think it will become more common.

The virtualisation of buildings and gamification open new perspectives to the whole construction business and the design processes used there. It e.g. enables to involve the future users to the idea gathering phase and to the design work in ways not possible earlier.

A. The space required by Human Actions is converted into a 3D object by the FDM

The design needs described earlier get means of enhancement from the FDM from Phil.Lic. Jukka-Pekka Selin. The method helps especially in a situation where the building operations are not yet active but there exists a digital model of the building.

In addition to a mere idea we offer a ready process that enables to transfer the space requirements of real Human Actions to the BIM based designs via our 3D IFC-objects. It is possible to test and simulate with the Building Model how the functional demands fit the rooms under development. The diagram below shows the process of the FDM:

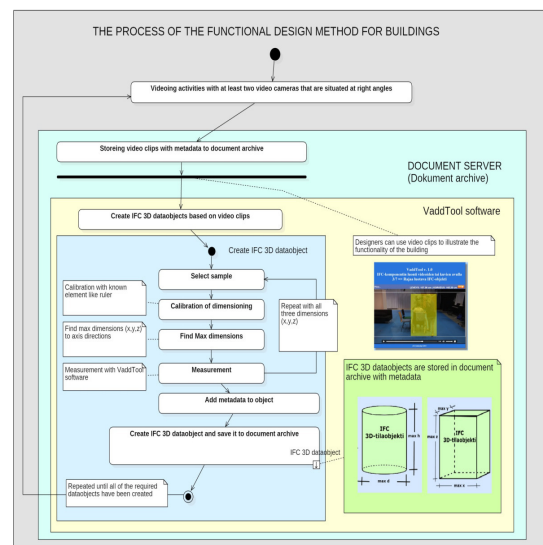


Fig 1. The process of the FDM for Buildings.

An example of the meant human activities is “an assistant who helps a wheelchair user to dress on outdoors clothes“. The invention to use real human activities and turn them into 3D CAD objects is from Licentiate of Philosophy Jukka-Pekka Selin who is the principal lecturer of data processing at Mamk.

Fig. 2 shows how the dimensioning (x, y, z) of the forthcoming IFC data object is performed.



Fig 2. A screen shot of the Space Required by Activity dimensioning function of the Value Add Data software prototype.

B. The Gamification of Building Models with the Unity Game Engine

We realised a pilot project at Mamk where we gamified the building model of the headquarters of the construction company U.Lipsanen Oy. The foundation was the 3D-model from ArchiCAD software. It was a part of the building model [4]. The Unity Game Engine supports importing data in various 3D file formats. After iterative testing and piloting we ended up to recommend that the import format should be the FBX format developed by Autodesk, Inc. [5]. Unity has native FBX support.

C. Simulating the actions of a handicapped building user

We piloted the methods by simulating a wheelchaired, moving person. The space requirements for different actions where first generated by the FDM. The original material was a set of video clips about real actions that were input to our Value Add Data software for creating IFC files.



Fig 3. A 3D building model converted first to FBX has been imported to the Unity Game Engine.

In the pilot we created a Third Person Controller-type Player who moved with a wheelchair. As much realism as possible was programmed for the dimensions, the movements and the building automation. We also created swappable Colliders around the virtual player. This way the space requirements can be swiftly selected according to the action under test. We can see and experience in a concrete way how well the action fits the spaces under design.

The dimension data from the FDM, representing the space need of a real action, can be utilised as such when creating Colliders in the Game Engine. One of the future research topics is to develop an automated creation procedure of Colliders based on the 3D IFC files. The next table below shows as an example the space requirements of two actions studied in piloting.

TABLE I.
MAXIMUM SPACE REQUIREMENTS FOR THE DIMENSIONING OF THE COLLIDERS CREATED BY THE FDM

The dimensioned Action (VaddTool)	Space Requirement (m)
The wheelchair user is helped to dress on or off his shoes by his assistant	1.10 x 1.90 x 1.51 (x,y,z)
The assistant walks with the wheelchair user on the side or behind the wheelchair	1.07 x 1.90 x 1.30 (x,y,z)

Respectively it is possible to dimension and simulate all kinds of actions, also not related to Building Design, by using the Functional Design Method and Gamification of 3D Models. There is a lot of potential in generalisation.

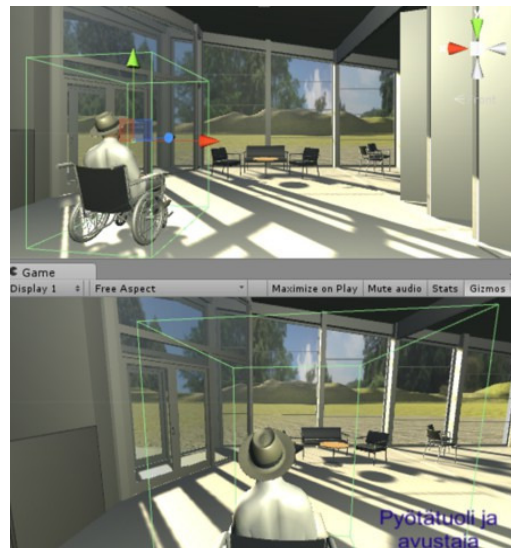


Fig 4. A handicapped virtual player with an added Collider Box (in green) derived with the FDM. Respectively it is possible to dimension and simulate all kinds of actions, also not related to Building Design, by using the FDM and Gamification of 3D Models.

D. Work process oriented, location aware document management and viewing services for the whole Lifecycle

After testing the creation of 3D IFC objects and short term document storage with the Value Add Data software prototype we began to negotiate with the public financiers about developing a service that would manage the documents during the whole lifecycle of buildings. In December 2015 the construction company U.Lipsanen Oy won a partial public financing for their development project RedHal.

The new targeted functionality differs from the presently available services in several features. After the documents reach the status “As built – Ready“, we will move the documents to a long term data repository with a targeted service life of 100 years. The University is an expert in Data Migration through storage technologies and in semantic digital archiving [7].

We are targeting to use indoor positioning in the 0.5 metre accuracy range together with tablets and Augmented Reality services. The data structures both in the Pre As built service and in the long term repository are according to the semantic structures of buildingSMART.

The document viewing will be of an active type. It takes into account the role of the viewer, the location, the orientation and the current phase of the design or construction process. The co-operation between designers will be based on Building Models according to the BIM standards. This project will be finalised by June 2018.

IV. RESULTS AND CONCLUSIONS

The following picture describes the process aspect in piloting our method.

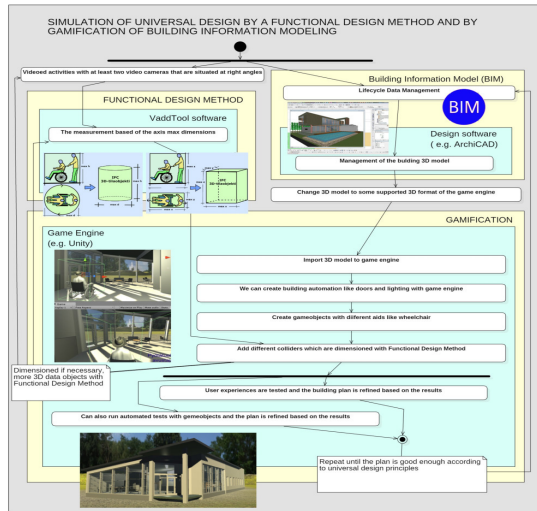


Fig 5. The process developed at MAMK in simulation of Universal Design with the aid of a gamified Building Model.

The results from the piloting are promising. The User Experience in the gamified model can be highly natural. The attendants of the Design Game thought that by bringing a handicapped virtual player to the game, a demonstrative and mind-expanding understanding was created about how well the building corresponds to users' needs.

Their opinion was that the method helps any designer to take the position of a handicapped user and this way to understand their needs and take them into account. The method also helps to test how well the building automation (e.g. active doors and adaptive lighting) serve different users. The FDM was found during the piloting also to be practical in ensuring that the spaces are dimensioned according to real needs. The idea behind the developed method about FDM based Colliders for the Players in a simulation based on gamified Models was found to be good and practical.

We also studied the automating of dimensioning testing by moving Players with Space Requirement Colliders automatically through pre-selected rooms in a way that the collisions and reroutings were documented to a log. Now we saw at once the locations which were too small or narrow for the required actions. It was also possible to study the steepness of ramps. The partners said the gamification of Building Models and the virtualisation of the usage of buildings create new and necessary dimensions to the whole building design process and we have the right future direction in our research. The development of Design Processes can now move towards crowdsourcing and communitisation by bringing the gamified Building Model e.g. via the WebGL technology to the Net and by enabling the future users of buildings access to the preliminary designs, for commenting. We think these processes can help in creating buildings that really fit the users' needs.

REFERENCES

- [1] Toimintatilan määrittävä objekti tietokoneavusteista suunnittelua varten. Finnish patent application 20135286FI. Applicant Mikkeli University of Applied Sciences Ltd (Jukka-Pekka Selin).
- [2] An action space defining object for Computer Aided Design. PCT patent application WO 2014/154942 A1. Applicant Mikkeli University of Applied Sciences Ltd (Jukka-Pekka Selin).
- [3] Rossi, Markku J., Dave, Bhargav., *Digitalization and quality enhancement initiatives in sw assisted design processes in building and construction industries*. 9th International Conference on Computer Engineering and Applications, Dubai, 2015. ISBN 978-1-61804-276-7.
- [4] Rakennusliike U.Lipsanen, Rakennusliike U.Lipsanen Oy Headquarters building (Lipatie 1, 76850 Naarajärvi). A 3D Model designed with ArchiCAD saved in the 3DS format. Construction Company U.Lipsanen Oy, Pieksämäki, Finland, 2015.
- [5] Autodesk Inc. The official website of the Autodesk FBX format. Accessed on March 30, 2016. <http://www.autodesk.com/products/fbx/overview>
- [6] Autodesk Inc. The official website of the FBX Converter software. Accessed on March 30, 2016. <http://usa.autodesk.com>.
- [7] Uosukainen, Liisa (ed.), Open Source Archive. Towards open and sustainable digital archives. Mikkeli University of Applied Sciences, Series A, No. 94, 2014. 100 pp. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-588-456-5>. Accessed on May 9, 2016.



Julkaisu II

Selin, J., & Rossi, M. (2018). The functional design method for buildings (FDM) with gamification of information models and AI help to design safer buildings. In Proceedings of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS 2018) (pp. 907-911). ACSIS, Vol. 15. ISSN 2300-5963. <http://dx.doi.org/10.15439/2018F162>

Julkaisukanavan taso: **JUFO 1**

© ACSIS 2018, Reprinted with permission.

The functional design method for buildings (FDM) with gamification of information models and AI help to design safer buildings

JUKKA SELIN

Department of Information Technology
South-Eastern Finland University of
Applied Sciences Ltd
Patteristonkatu 2, 50100 Mikkeli FINLAND
jukka.selin@xamk.fi www.xamk.fi

MARKKU ROSSI

RTD and Services
South-Eastern Finland University of
Applied Sciences Ltd
Patteristonkatu 2, 50100 Mikkeli FINLAND
markku.rossi@xamk.fi www.xamk.fi

Abstract— We have developed a method that enables better taking into account of need of space of actions of moving objects in a building when Building Information Modeling (BIM) is used. The 3D spatial objects for real space requirements of actions created with our method can be used with various design tools as such in dimensioning or to generate video game colliders defining the need of space. Together with the gamified model of the structure from BIM they enable dimensioning in designs and simulations. We can dimension spatial objects for example related to safety. There are a lot of needs and applications for our methods. It is possible to design buildings and other structures that fit their purpose well.

I. INTRODUCTION

In this article we present the utilization of the Functional Design Method (FDM) “Value Add Data / VAddD” together with the Gamified BIM Information Model during the simulation of emergency evacuation from a supermarket. The simulation relates to the joint R&D and piloting effort of the S-E Finland University of Applied Sciences (XAMK) and our industrial construction partners. The Functional Design Method is based on the Finnish patent by our senior lecturer and Licentiate of Science Jukka-Pekka Selin. The patent was derived from an earlier internal innovation report [1], [2], [3].

The core idea in the FDM is to capture the space requirements of real action in three dimensions and then create a new 3D spatial object. The new 3D objects represent the maximum spatial space requirements of actions. When using Construction CAD these objects can be used in dimensioning different spaces. The goal can be both to fit an action to a space or alternatively ensure that an object can reach all the needed places in a space. If the Information Model in the form of an IFC (Industrial Foundation Classes) file is gamified it becomes possible to use the spatial objects to realise e.g. adaptation capable game colliders around game objects. In that case we can test the fitting of different actions or reaching capabilities of objects to stationary parts of the construction. We can also perform simulations.

In our piloting program we used a real construction project of our industrial partner, a Finnish supermarket [4]. In piloting we simulated the emergency evacuation from a supermarket with a gamified model by utilising AI (Artificial Intelligence) based navigation of moving avatars in the model of the market. In the simulation we had avatars with individual behavioristic profiles and sets of rules. We made

the avatars evacuate themselves using an AI engine and individual parameters along evacuation routes that were rapidly chosen after a fire alarm.

II. METHODOLOGIES AND SOFTWARE USED IN THE RESEARCH

The maximum space requirement in dimensions x,y and z can be derived from video clips of real human actions. In this method the real actions are videoed with at least two video cameras that are situated at right angles. The need of space from the actions in three dimensions is measured and a corresponding geometrical object is created. This 3D object in IFC file format is compatible with different CAD software. The goal is to ensure that the required actions can fit the space under design [1], [2], [3].

During the research program the application that is BIM compatible and is meant for Lifecycle Management of Building Data, and the application extension Value Add Data of Xamk R&D, were used for creating 3D objects. The application extension realizes the functionality of the FDM. The Colliders describing the space requirements for different actions to the gamified model were created via the execution of the Value Add Data software [5].

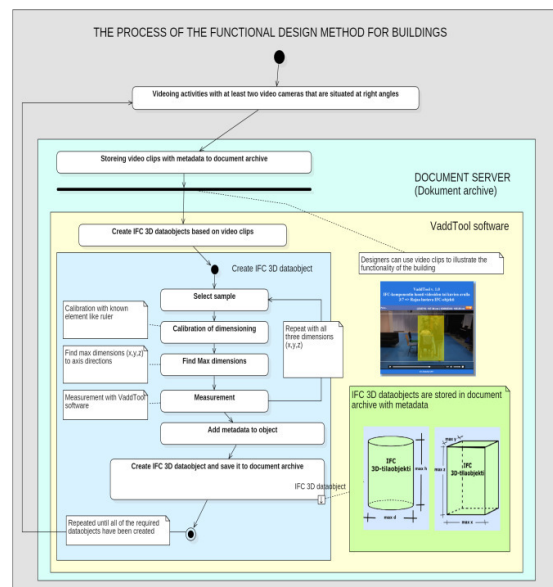


Fig 1. The process of the FDM for Buildings [5].

The Information Model used with the supermarket consists of several submodels that have been created by the designers of architecture, structures and different subsystems, with different CAD tools. As an example, the architecture model has been designed with the ArchiCAD software by Graphisoft SE. All submodels of the supermarket have been received for piloting in the IFC format [4], [6]. The submodels have been converted by the tools of the Open Source software family IfcConvert to the OBJ format [7]. The files that were in the OBJ format have been further optimized and shortened with the Open Source software MeshLab.

The metadata that are in the IFC files have been transferred by using the XML format. The conversion from IFC into XML has been performed with the IfcConvert. The gamification itself has been performed with the Unity game engine. When simulating the emergency evacuation we used the Navigation extension of the Unity engine. This extension brings possibilities to use AI based navigation schemes [8].

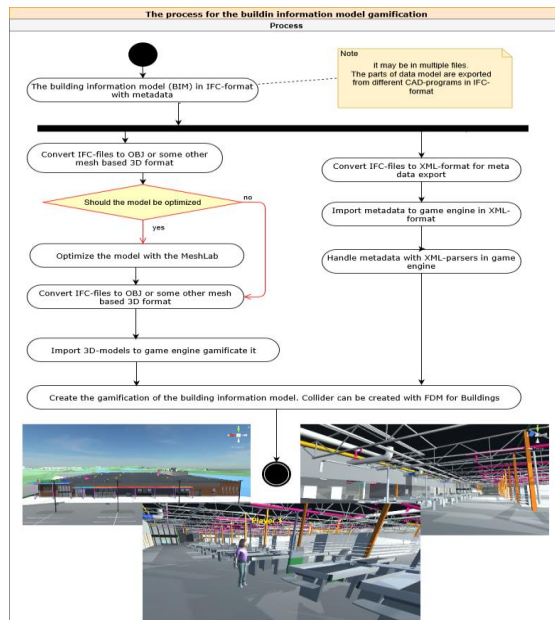


Fig 2. Our process for gamifying Information Models.

The schematic above describes the process developed by us to gamify Information Models of buildings. The basic principle of the process is that the gamification should be possible independent of the choice of the original CAD design tool. The only requirement is that the CAD tool supports the IFC format and can export both data and metadata into an IFC file according to the BIM recommendations [6].

Into a model gamified this way we can bring spatial objects generated by our FDM. These VAddD spatial objects can also support designs as such or if further converted into Game Colliders.

III. THE FUNCTIONAL DESIGN METHOD FOR BUILDINGS TOGETHER WITH GAMIFICATION OF INFORMATION MODELS HELP TO DESIGN SAFER BUILDINGS

We created pilots to study different possibilities and applications for the FDM. We utilized an Information Model of a real supermarket. Our partner, the construction company U.Lipsanen Oy is currently building the supermarket. We received the Information Model as several IFC submodels, so we were able to test our procedure to gamify models represented according to the recommendation IFC (Fig 2) so that also the metadata can be input to the gamified model [4].

The main goal was to be able to use open software. For that reason we ended up to use the IfcConvert software from the IfcOpenShell library to convert IFC files into mesh models supported by game engines. Among the formats of mesh model formats we selected the OBJ format. We had a need to optimize and radically reduce the amount of polygons approximating the surfaces, especially related to pipes. To do this we chose the open MeshLab software that has support for the OBJ format. We also used the IfcConvert to create XML files from IFC and to bring the metadata of the models together with the 3D model into the game engine [6], [7].

With the aid of the gamified Information Model we piloted the usage of FDM in the emergency evacuation with an AI navigation control used in a Unity game environment [8]. We placed profiled or individually parametrized avatars randomly inside the supermarket and then commanded the avatars to proceed to the closest emergency exit with the aid of the AI engine. Around each avatar we placed game colliders that described the space needed for the avatar when mobile, according to the avatar profile. Such avatar can use different aids to overcome limited mobility when moving. An avatar using an aid like a rollator usually needs more space than an average person. Each of the avatars also possessed an individual moving speed.

With FDM we generated the 3D spatial objects representing spatial needs for actions. The description of the cases for avatars can be seen in the following table (Table 1).

TABLE I.
MAXIMUM SPACE REQUIREMENTS FOR THE DIMENSIONING OF THE COLLIDERS CREATED BY THE FDM

The dimensioned Action	Space Requirement (m)
A walking person	0.50 x 1.90 x 0.70 (x,y,z)
A running person	0.65 x 1.90 x 0.90 (x,y,z)
The assistant walks with the wheelchair user on behind the wheelchair	1.30 x 1.90 x 1.00 (x,y,z)
The wheelchair user without the assistant	1.00 x 1.50 x 1.00 (x,y,z)
The user with rollator	0.90 x 1.90 x 0.75 (x,y,z)
The user with crutches	0.90 x 1.90 x 1.00 (x,y,z)

From each of the cases we generated an avatar prototype that has colliders corresponding to the table. In this pilot the characteristics of the colliders were specified on a relatively common level. We felt that this accuracy is adequate from

the piloting of simulation method point of view. The avatar profiles could well be much more individual and more different types of avatars representing different customers of the supermarket could be created.

For accurate and realistic simulations corresponding to real situations it is necessary to increase both the number of variables and to increase the number of movement functions that have a partially random outcome. The number of simulation drives should be high when we want to apply statistical methods to the outcomes of the individual simulation drives. The results of the statistical studies would show how well the supermarket supports safety and show hints how to further increase safety by design. Different building designs could be simulated and compared. After iterating with different designs it is possible to reach the functionality requirements.

In our piloting we were mainly interested in the feasibility of the FDM in this kind of dimensioning and simulations. We used in our pilots some randomness in the collisions in between different objects to increase realism. The piloting was performed by using the Unity game engine and the C# programming language. We added a simulation extension to the gamified Information Model of the supermarket. The simulation extension creates a predefined number of avatars with different characteristic profiles. In the beginning of the simulation the avatars are located at their initial locations around the floor area, derived from random values of parameters. The characteristics for different types of avatars are in the table above (Table I).

In the simulation we used the Navigation tools of Unity, based on AI. With the tool we could create a navigation map situated on the floor level of the supermarket. More generally, the map could include any stationary objects of the gaming world. With the aid of the navigation map an avatar can now be commanded to progress to the needed target area so that the AI tool steers the movement of the avatar. The events during the navigation phase can be controlled by numerous different navigation parameters. Among the features that can be controlled are the maximum physical difficulty level of obstacles that can be over- or sidewise passed, and the intensity of effort in movement.

We realized the simulation in a way that the customer avatars with spatial needs according to their profiles are moving and directed by the AI towards emergency exits. The situation can be monitored by virtual cameras situated in the gamified Information Model. Each of the avatars are also carrying their own cameras that can be switched on when necessary.

The development of the situation can now be monitored from all angles. With the simulation application developed You can quickly control e.g. the number of customers, randomness of events and navigation parameters. It is also possible to change and define quickly the target-objects that are the destinations of the avatars. The avatar game objects that represent supermarket customers and are used in the

simulation can in principle look like whatever the artist decides, but we increased the realism of the simulation by creating 3D avatars that look like typical shoppers. We also made them move according to kinetic data from an earlier human motion capturing session with cameras. Their movement looks therefor quite natural.

The realism of the simulation can be enhanced by adding different effects. Here we wanted to simulate a fire in a supermarket and we added a smoke effect to the gamified model. The progress of the fire follows a well known Fire Intensity Curve that is a generalized model about how the fires progress (Fire Intensity against elapsed time) [9]. The following picture (Fig 3) visualizes a generalized Fire Intensity curve that represents the intensity of the fire in majority of cases. In addition, the picture visualizes the phases of the evacuation and parameters used in the case of a supermarket.

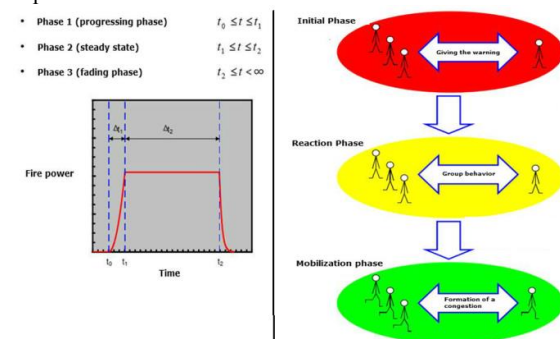


Fig 3. On the left side a generalized Fire Intensity curve that represents the intensity of the fire in majority of cases. On the right side the phases of an emergency evacuation [9].

The fire develops inside a building usually so that the environment becomes intolerable for humans. The cause can be different poisonous and irritating gases and the heat. Because of the fatal environment one should remove humans from the building as quickly as possible [9].

At the University of Lund the research aimed to find out how long it takes before the environment close to the fire becomes intolerable for humans. Also the VTT Technical Research Centre of Finland Ltd has performed research on the topic. In both research programs the critical factor was found to be the smoke occupying the whole volume of the building. The scattering of the research results is however relatively high [9], [10].

Based on the before mentioned research results we set the critical elapsed time after the start of the fire to 25 minutes with a standard deviation of 8 minutes. We put 500 customers into the supermarket corresponding to the daily rush hour. Our simulation can however adapt easily to a wide range of parameters for each case. The evacuation of humans from the buildings can be divided into three main phases. The phases are called the preliminary phase, the reaction phase and the mobilization phase. The total time elapsing in the evacuation follows the formula $t = t(\text{initial}) + t(\text{reaction}) +$

(mobilization). The durations of these times are naturally very individual, so we need to include random variables related to the behaviour of people to our calculations. We realized the simulation application of an emergency evacuation by utilizing scientific studies mentioned above. We set the parameters of the dangerous situation (here a fire) so that the situation can be divided into the above mentioned phases. It was possible to freely change the durations of the phases. We also designed the customer (avatar) profiles so that there is randomness in the profiles and the process follows the phases of an evacuation [9].

The following picture (Fig 4) shows a view from the simulation application on the display during the run of a process performed by the Unity game engine.



Fig 4. A simulation application realized with the Unity game engine. A game collider corresponding to the spatial need of an avatar is visible on the picture.

The event that causes the need for evacuation can be parametrized and the seriousness and location can be varied. We can test a situation where a fire restricts access to a certain area and can even prevent using certain emergency exit.

After the simulation starts the game objects corresponding to profiled supermarket customers begin to move towards the selected emergency exits. The following picture (Fig 5) visualizes a situation where the fire simulation is active and the profiled customers are trying to move towards the emergency exits. Their spatial needs and profile settings affect their moving speed and route when they navigate past shelves and other structures, while interacting with the other customers. We can observe how the customers occasionally prevent each other using the most direct routes.



Fig 5. The simulation is active and smoke begins to enter the interior of the supermarket. The profiled customers (game objects) are rushing in chaos towards the defined emergency exits under the control of the AI engine (the reaction phase and the mobilization phase).

The structure of the simulation application is such that it saves the movements of the profiled customers to a log file. The applications also recorded for every customer the moment when he moved from a phase to the next. We also recorded to the log of the collisions with the other avatars

and the moment of time when the customer was able to exit the building. Then the avatar reached the emergency exit that was the target location of the navigation.

The simulation was built so that the profiled customers possessed randomness according to the range found out in the studies [9], [10] and [11] during the initial and reaction phases. The simulation run specific log file generated gave a lot of valuable data about the functioning of the building in an emergency. With the aid of the logs it is e.g. possible to study the success level of different safety increasing measures. The log includes data for e.g. finding out when 90% of the customers have left the building or how much a new exit reduces the time of evacuation and also what the best place for a new exit is. In the exemplary simulation presented here all of the 500 customers could exit the building in 15 minutes. Over 90% of the customers had exited already in less than 10 minutes from the beginning of the fire. The last ones to exit were the individuals who have long reaction times and who are using aids for reduced mobility. When we made the distance between the shelf units narrower the evacuation times increased significantly especially with high numbers of people. Correspondingly, extra exits shortened the evacuation times, as expected. According to this simulation the supermarket was found to be safe enough in fire situations with the designed types of corridors and exits.

We also tested during the simulations a situation where the cameras are videoing from the point of view of the customers. We gave each customer an own camera enabling us to switch to the view from any of these cameras. It was especially interesting to note how an aged customer using mobility supporting aids and moving slowly suffers from collisions with other customers moving more swiftly. The following picture visualizes the emergency evacuation event from the point of view of e.g. an older customer moving slowly and using a rollator. This fact could also be found from the generated log files. The following picture (Fig 6) visualizes the emergency evacuation event from the point of view of e.g. an elderly.



Fig 6. Simulation showing the point of view of a slowly moving elderly using a rollator.

Finally we simulated a situation where the viewer is a TPC-type object (Third Person Controller) who tries to exit the building. Also in this case we have a set role and spatial needs that were dimensioned by using the FDM. We conclude that this could be an excellent way to practice doing the emergency evacuation. By using the multiplayer functions of Unity we could simulate situations where several players are practicing emergency evacuation or generally any co-

operation with other players. The following picture (Fig 7) visualizes a situation where each of the players of the simulation is moving a profiled avatar that has settable parameters. The players can do different roles like rescue or leading the evacuation operation. In the picture the player has entered the supermarket and encounters there customers who are rushing out. This way we could practice beforehand the actions during emergencies from the point of view of different actor roles.



Fig 7. A TPC player (Player1) has entered the supermarket after having received an alarm, performs rescue and assistance work and encounters customers who are rushing in panic.

The approach of this pilot appeared to be very interesting and relevant. The FDM brought clear added value to the piloting, because the different individual spatial needs could be taken into account in the simulation. According to our industrial partner the principle to combine the simulation of emergency evacuation with the usage of the FDM is a very good idea. We are planning to further develop these methods in our current research project.

The insertion of multiplayer functionality and co-operation of a community into this kind of simulation was especially rewarding. When the Information Model is gamified and we crowdsource the emergency evacuation simulation we could get valuable knowledge and ideas from a large group of people to enhance the accessibility and safety of a supermarket. We plan to develop these methods and tools further in the future.

IV. RESULTS AND CONCLUSIONS

The pilots presented strengthened our view that the Functional Design Method VAddD developed earlier is a useful and practical tool for designing buildings and that it is flexible to cover different purposes and application environments. The method suits also to different design challenges of infrastructure and built environment in addition to building design. It helps to perform the designs based on end users' activities in the buildings. The method is also independent on what CAD ecosystem was used to design the first 3D model. The pilot presented belong to our research program for the construction and building industry.

We conducted a small scale interview among our R&D partners related to the research results. We interviewed the industrial contact persons who are either managers or designers from the construction industry. One of the designers interviewed was specialized on gaming.

As a summary from the results of the interviews the usage of BIM, the gamification of Information Models and the

Lifecycle Management of the Information Model were seen very welcome and needed development paths for the construction industry. The interviewed also said that the FDM is a very good idea for taking the human actions into account in all kinds of design challenges better than before. All new methods belonging to this category of methods were seen as welcome development. The partners thought that the simulation of the emergency evacuation scene was successful and stated that the FDM brings clear added value and new feasibility because You can now profile the users of the building and create individual characteristics and spatial needs to the avatars used. This way the simulation can be made very realistic and the results really bring new data about the building design and its functionality.

The partners of our R&D program think that the FDM for buildings and the pilots utilizing the methods are interesting, bring added value to the design processes and so are definitely worth further studies. Exactly to this direction should the design of buildings according to their opinion be developed in the future. When this pilot analysis cases are combined with further analysis of other actions in the building we have a large number of analysis results from a complete toolset of analysis fulfilling the needs in structural design, simulation, building automation design, training and even lifetime measurement and control during the whole lifecycle. Our vision is to adapt and expand the methods to develop virtual user interfaces or digital twins to buildings for the whole lifetime, beginning from the design phase.

REFERENCES

- [1] An action space defining object for computer aided design. Finnish Patent 125913, granted on April 15, 2016. Fourteen claims. Current owner: Xamk. Inventor: Selin, Jukka-Pekka. Is the origin of the PCT patent application WO 2014/154942 A1.
- [2] An action space defining object for Computer Aided Design. PCT patent application WO 2014/154942 A1. Applicant Mikkeli University of Applied Sciences Ltd (Jukka-Pekka Selin).
- [3] Rossi, Markku J. and Bhargav, Dave, Digitalization and quality enhancement initiatives in sw assisted design processes in building and construction industries. 9th International Conference on Computer Engineering and Applications, Dubai, 2015. ISBN 978-1-61804-276-7.
- [4] Construction Company U.Lipsanen Oy, A Building Information Model of Commercial Center in IFC format, Pieksämäki, Finland, 2018.
- [5] Selin Jukka., Rossi Markku J., Simulation of universal design by a functional design method and by Gamification of Building Information Modeling. FedCSIS, 2016 Federated Conference, Gdansk, Poland, 2016. ISBN 178-8-3608-1090-3 and 978-1-5090-0046-3, IEEE.
- [6] BuildingSMART International. The official website of the IFC-format (ISO 16739:2013). Accessed on April 18, 2018. <http://www.buildingsmart-tech.org/specifications/ifc-releases>
- [7] The official website of the IfcOpenShell-project. Accessed on April 18, 2018. <http://ifcopenshell.org/>
- [8] Unity Inc. The official website of the Unity game engine. Accessed on April 18, 2018. <https://www.unity3d.com/>
- [9] Paloposki Tuomas, Myllymäki Jukka, Weckman Henry. VTT Oy. Julkaisu. <http://www.vtt.fi>. (ISBN:951-38-6114-7). Accessed on May 11, 2018.
- [10] Magnusson, S.-E., Frantzich, H. & Harada, K. Fire safety design based on calculations – Uncertainty analysis and safety verification. Lund, SE: Lund University, 1995. 120 s. (Report 3078.) ISSN 1102-8246k.
- [11] Weckman, H. Rakennuksista poistumisen laskennallinen arviointi. VTT Oy, Julkaisu. ISBN 951-38-5133-8, ISSN 1235-060



Julkaistu III

Selin, J., Letonsaari, M., & Rossi, M. (2019). Emergency exit planning and simulation environment using gamification, artificial intelligence and data analytics. YSC2019, 8th International Young Scientist Conference on Computational Science (pp. 283-291). Procedia Computer Science, Elsevier, Vol. 156. ISSN 1877-0509.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.08.204>

Julkaisukanavan taso: **JUFO 1**

© Elsevier 2019, Reprinted with permission.



Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

Procedia Computer Science 156 (2019) 283–291

Procedia
Computer Science

www.elsevier.com/locate/procedia

8th International Young Scientist Conference on Computational Science

Emergency exit planning and simulation environment using gamification, artificial intelligence and data analytics

Jukka Selin^{a,*}, Mika Letonsaari^a, Markku Rossi^a

^a*South-Eastern Finland University of Applied Sciences, Patteristonkatu 2, 50100 Mikkeli, FINLAND*

Abstract

In our research, we explore methods to utilize gamified building data models and data analytics. In this paper, we present a study, where an emergency exit planning and simulation platform is implemented with a commercial center gamified data model. In the study, we compare various emergency exit location options and search the critical areas for customer evacuation. Customized user profiles are used to estimate the movement capabilities of elderly and handicapped people. The feasibility of data analytics methods for analyzing the simulation results is examined. The results show that simulations based on gamification are well-suited tools emergency exit evaluations.

© 2019 The Authors. Published by Elsevier Ltd.

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Peer-review under responsibility of the scientific committee of the 8th International Young Scientist Conference on Computational Science.

Keywords: BIM; Gamification; Data Analytics; Simulation; AI;

1. Introduction

Building information modeling (BIM) and BIM-based thinking have become more common in buildings design. In our research, we develop processes and techniques for gamification of building information models. This is used to

* Corresponding author. Tel.: +358-50-525-9689 .

E-mail address: jukka.selin@xamk.fi

create added value in building design and management. In addition, we develop the utilization of the gamified data models throughout the lifecycle of the building.

Gamification is a quite broad term. In this study, gamification and gamified data model are defined to mean importing building's digital plan (data model) to a game engine (like Unity or Unreal Engine) from a computer-aided design (CAD) software. Game engines provide tools such as a physics engine, character animations, artificial intelligence (AI) for controlling characters, and user interface functions. In this way, a 3D environment like computer games can be implemented from a building plan. A gamified data model may be used in several functionalities, for example, simulations. The functionalities can be implemented using application specific programming techniques. A building data model (or data model) means a building's digital plan that includes building design information, such as the 3D models of the building.

The idea of this project is that the gamified data model serves first the design, planning, and construction of the building. When the building is ready, the gamified data model serves as a two-way maintenance interface for the entire lifecycle of the building. For example, data related to the usage of the building can be accessed with data and analyzing tools through this maintenance interface. The gamified data model of the building provides a digital twin during the lifecycle of the building.

The study presented here is part of this larger research. In this study, we explore the use of the building's gamified data model as a simulation platform for emergency exits. In addition, the aim is to study the analysis of data obtained in the simulation using data analytics.

The aim of this study is to answer the following question: Is it feasible to implement an emergency exit planning and simulation environment using the building's gamified data model and data analytics methods?

The gamified data model enables simulations to be performed with the building. During the simulations, we can automatically collect data from the simulation and analyze the data with data analytics methods. This way e.g. security and accessibility issues can be tested already during the design phase. Possible changes and corrections are much easier to do and cheaper to implement during the design phase than later when the construction of the building is physically finished.

In this simulation-based emergency exit study, we used a real building design from a construction company that participates in our research. The purpose of the simulation was to study the safety of a commercial shopping center during a fire emergency.

In the simulation, we placed computer-controlled human characters (customers) with several different physical profiles to the commercial shopping center. User model profiles include specific types of interest such as elderly people and handicapped people. Computer controlled characters were controlled by the game engine's artificial intelligence designed to mimic real human behavior.

We tested by simulation how long it would take to evacuate the commercial shopping center in different fire scenarios. To evaluate the model we used the comparative data from studies by the University of Lund and VTT to see how quickly different fire compartments turn life-threatening for humans as the fire progresses [1, 2].

We implemented a data collection mechanism for the simulation. It allows data to be collected e.g. about the behavior of profiled persons during the simulation, as they search for emergency exits. We analyze the data collected with data analytics methods and search the critical places in the design of the emergency exits. In addition, we also compared various alternatives to place the emergency exits.

In the second chapter of this article, we present the materials and methods used in the study. We also introduce the programs we use. In the third chapter, we present our research. We study the planning and simulation of the emergency exit of the commercial center using gamification and data analytics. In the fourth chapter, we review the main results of the study. Conclusions and discussion about the study are presented in the last chapter.

2. Materials, methods, and programs

Gamification is defined as the use of game design elements in a nongame context. In this case, the context is the building design and construction. Gamification is also often used for example in teaching or marketing to arouse interest. [3] In this study, the method of gamification means that tasks involved in building design and planning are done utilizing game engine functions that are normally used in games.

Machine learning technology is a method for making predictions from existing history data using analysis models taught by different algorithms. Algorithms are used to identify and learn interdependencies between data. Using the information obtained in this way, from the data to be analyzed we get different assumptions and predictions. Analyzing new data is based on the information learned from previously analyzed data. The result of the analysis will improve as the amount of data analyzed (history data) increases. [4]

The data model of the building we used in this study is the information model of a real shopping center built by our R&D partner Construction Company U. Lipsanen. [6] We obtained the data model for research use.

The data model used with the shopping center consists of several sub-models created by the architects, and engineers designing different structures and functional subsystems using CAD tools. As an example, the architecture model is designed with the ArchiCAD software.

All sub-models of the commercial shopping center have been received in the IFC file format. [6, 7] The sub-models have been converted to the OBJ file format using IfcConvert open source software tools [8]. Files that are in the OBJ format have been further optimized using open source software MeshLab [9].

Using the gamified data model we studied the emergency evacuation with an AI navigation control provided by the Unity game engine [10, 11]. Profiled and individually parametrized game characters were placed randomly inside the shopping center. The game characters were then commanded to proceed to the closest emergency exit with the aid of the AI engine.

Around each game character, we placed game colliders that described the space needed for the game character when mobile, according to the game character profile. Such a game character can use different aids to overcome limited mobility when moving. A game character using a mobility aid like a rollator usually needs more space than an average person. Each of the game characters also possessed an individual moving speed. [12]

The Functional Design Method (FDM) was used to determine the spatial needs of profiled customers (game characters). The Functional Design Method is based on the Finnish patent by our senior lecturer and Licentiate of Science Jukka Selin. The patent was derived from an earlier internal innovation report. [13, 14]

The core idea in the FDM is to capture the space requirements of real action in three dimensions and then create a new 3D spatial object. The new 3D objects represent the maximum spatial space requirements of actions. With FDM we generate the 3D spatial objects representing spatial needs for actions. The description of the cases for game characters can be seen in Table 1. [12, 15, 16]

Table 1. Maximum space requirements for the dimensioning of the colliders created by the FDM [11].

The dimensioned Action	Space Requirement (m)
A walking person	0.50 x 1.90 x 0.70 (x, y, z)
A running person	0.65 x 1.90 x 0.90 (x, y, z)
The assistant walks with the wheelchair user on behind the wheelchair	1.30 x 1.90 x 1.00 (x, y, z)
The wheelchair user without the assistant	1.00 x 1.50 x 1.00 (x, y, z)
The user with rollator	0.90 x 1.90 x 0.75 (x, y, z)
The user with crutches	0.90 x 1.90 x 1.00 (x, y, z)

From each of the cases, we generated a game character prototype that has colliders corresponding to the table. In this study, the characteristics of the colliders were specified on a relatively common level. We estimated that this accuracy is adequate from the simulation method point of view. The profiles could well be much more detailed and more types of profiles representing customers with different attributes could be created if required.

The simulation is programmed so that each profiled game character writes all their events during simulation to the log file. We analyze the data thus obtained using data analytics. We strive to find the problem areas of the emergency exit and to optimize the location of emergency exits.

The collected data is analyzed using the Microsoft Azure Machine Learning Studio. As an example, simple predictive analysis models are used. Data analysis is not dependent on the analysis tool so it is possible to perform the same analysis using other preferred analysis tools.

3. Research

In this study, we tried to find answers to our research question: Is it feasible to implement an emergency exit planning and simulation environment using the building's gamified data model and data analytics methods?

An emergency exit simulation application is used as the basis for this study. The emergency exit simulation application has been implemented with a gamified data model of a commercial center built by our construction partner.

The simulation application of the emergency exit of the commercial shopping center is presented in Fig. 1. In the figure, the game characters (customers) profiled with different profiles try to find defined emergency exits under the control of the Unity Navigation System. The figure also shows the space required for the person using the rollator (Collider) [11, 12].

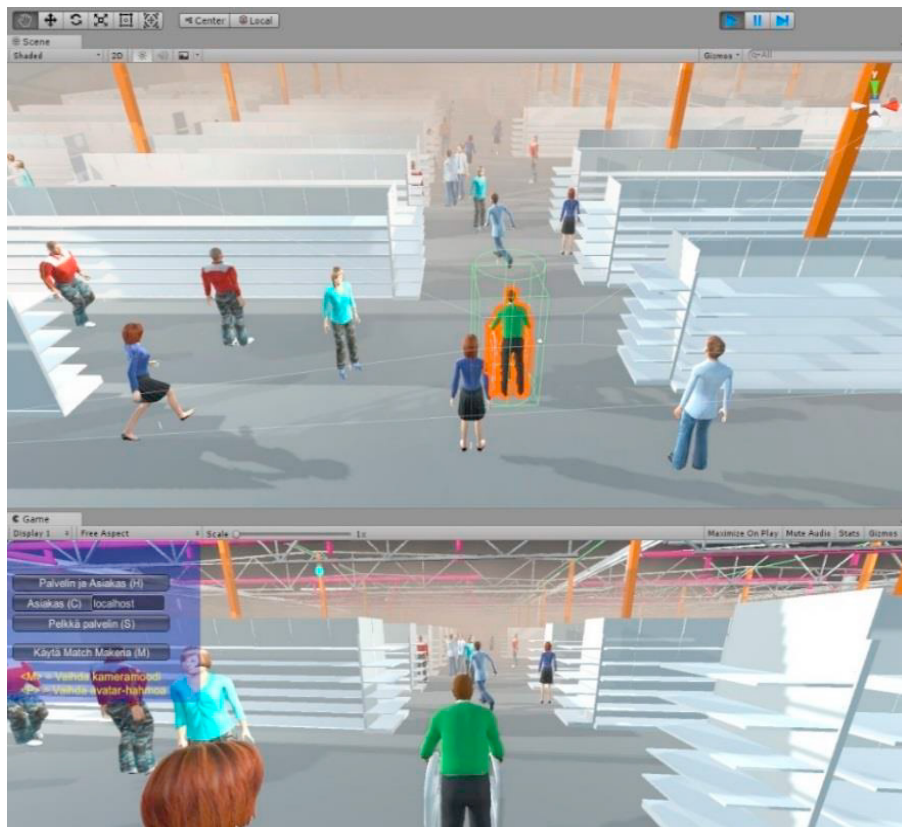


Fig. 1. A simulation application realized with the Unity game engine. A game collider corresponding to the spatial need of a game character is visible in the figure.

The profiles, quantity, and location of the game characters can be freely changed. In addition, the location and extent of the event that caused the emergency can be altered in the simulations. For example, it is possible to test a situation where a fire restricts movement in a particular area and can even prevent the use of a certain emergency exit completely.

In this study, we placed from 1 to 180 gaming characters with artificial intelligence to the gamified data model of the shopping center. We added a program code to game characters, which allows the character to write all their events during the simulation to the log file. We carried out in total 36 simulation runs with different amount of game

characters. In each simulation, we randomly placed the game characters differently in the commercial center. The data for each simulation run was written to the log file.

The floor of a gamified data model is divided into 5m x 5m squares. The game code associated with the game characters automatically calculates on what square the collision has occurred. The application writes the id (boxid) of the square to the log file instead of the coordinates. If necessary, the size of the squares can be reduced to provide a more accurate result or the exact location can be obtained using the raw coordinates. In this case, the grid size was selected for the task-dependent visualization purposes. With this grid size, the result is accurate enough to find the problems of emergency exits.

The events written by the game engine to the log file are presented in Table 2. For different use cases and applications, it is possible to include more detailed information on required simulation events.

Table 2. The events that were written by the game characters to the log file.

A game character event	Data to the log file
A game character collides with another character or other object	The name of the game object
	The name of the other object
	Time from the beginning of the simulation (s)
	In which box did the collision occur (id)
The game character leaves the building through the emergency exits	The name of the game object
	The name of the other object (not relevant)
	Time from the beginning of the simulation (s)
	In which box did the collision occur (id) (not relevant in this case)

In this study, we had two separate emergency exits. The game characters were programmed to move always to the nearest emergency exit. The result of each simulation was written to its own log file in CSV format. As a result of the simulations, we got 36 separate log files.

The data collected at simulations were analyzed with the data analytics and data visualization to find the problem areas of the commercial shopping center emergency exits. The critical parts of the building were determined by analyzing the number of collisions between computer characters and building model objects.

An excerpt of a CSV log file generated by the simulation application is presented in Fig. 2.

	A	B	C	D
1	name	target	time	boxid
2	rollaattoriprof2 (3)	0ia0pygcbFcRGpBJPlbqdF	00.360	R229 170
3	rollaattoriprof2 (3)	0ia0pygcbFcRGpBJPlbqdF	00.660	R229 170
4	pyoratuolipref1 (3)	3QJVxVOgz1vAvJ71BDJfG_	01.140	R229 169
5	rollaattoriprof2 (3)	0ia0pygcbFcRGpBJPlbqdF	02.360	R229 170
6	exit2	rollaattoriprof2 (1)	16.860	R225 176
7	rollaattoripref1 (1)	hahmo62 (1)	35.420	R230 172
8	hahmo62 (1)	rollaattoripref1 (1)	35.420	R230 172
9	hahmo1	2dVDDYcvPDVfW9kCIBAZt2	41.640	R226 168
10	hahmo6	rollaattoriprof2 (2)	45.200	R228 173
11	rollaattoriprof2 (2)	hahmo6	45.200	R228 173
12	hahmo6	rollaattoriprof2 (2)	45.300	R228 173
13	rollaattoriprof2 (2)	hahmo6	45.300	R228 173

Fig. 2. A beginning of the log file created during simulations.

Using the data analytics tools, we created an application that gets the data from the log file to the input data and searches out the problem locations for the emergency evacuation. We located the areas of the commercial shopping center where more collisions occurred than usual in simulations. If there are lots of collisions within a short time in a certain area, it is clearly problematic for evacuations.

The application implemented in the graphical programming environment of the Azure Machine Learning tool is illustrated in Fig. 3. The application analyzes the collected data and performs analysis. Data can be used to retrieve various data using SQL.

In the first analysis, the number of collisions of each square is retrieved. The search result is sorted to descending order based on the number of collisions. The top of the list shows the most problematic areas of the emergency exit. In addition, the analysis searches from the data material for the maximum time it takes to clear the shopping center (Time_to_empty). The analysis also calculates the average (Exit_avg_time) of the exit times of all the game characters in the game.

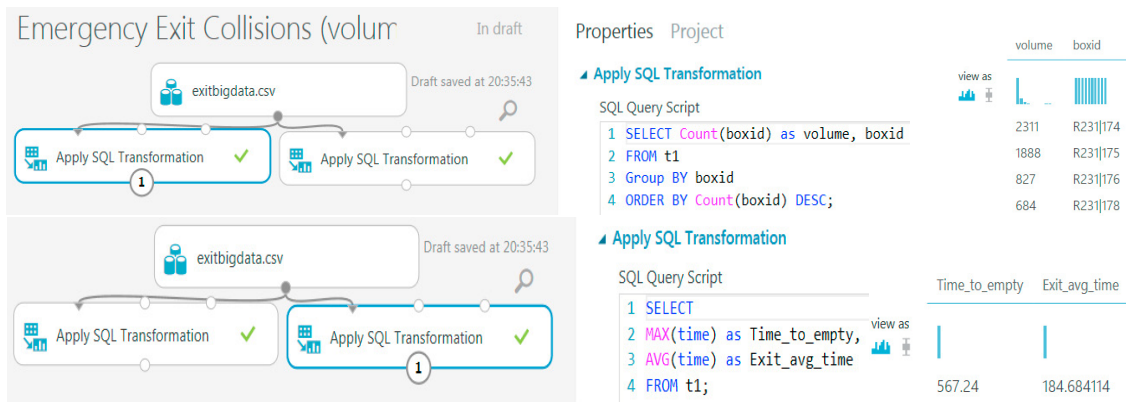


Fig. 3. The number of collisions by grid square and exit characteristics analyzed from the log data.

A result file with the number of game characters, the maximum exit time, and the total number of collisions for every 36 simulations was created by the analysis. This data file is used in the second analysis presented in Fig. 4. A linear regression model is used to predict emergency exit times with a different amount of customers. 30% of the data is used for the teaching model and the quality of the model is analyzed.

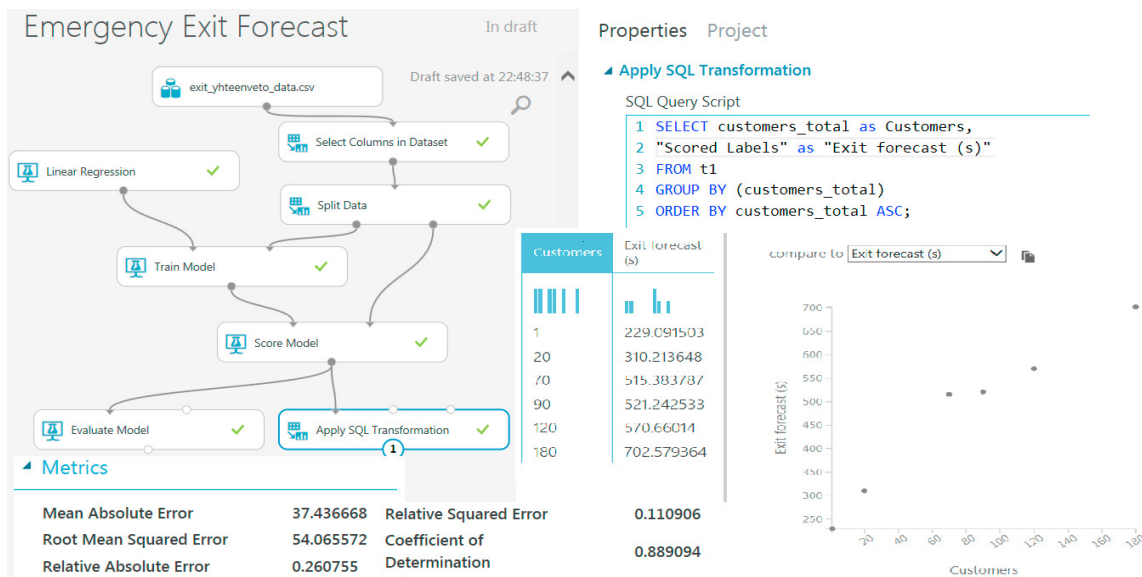


Fig. 4. Emergency exit forecast, a predictive model.

4. Results

The data analysis is presented in Fig. 5. It shows that the most critical point for an emergency exit is the exit lines adjacent to the cash desks, whose capacity is not good enough for emergency exits. It would be very important that, in the event of an emergency, customers could go past the cash registers unhindered. In these locations, there were especially such collisions in the simulations in which the person (customer) using the assistive device was the other stumbling party.

Another critical point is found in between the shelves. For this reason, the space between the shelves must be extended.

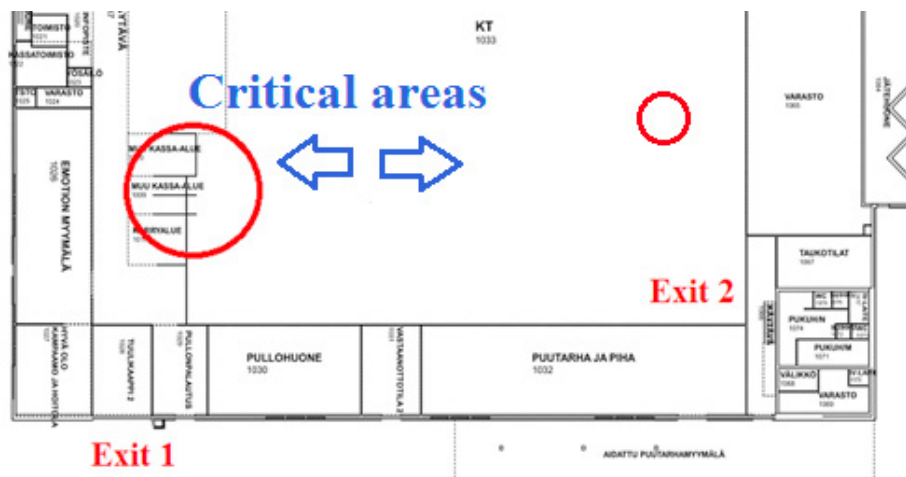
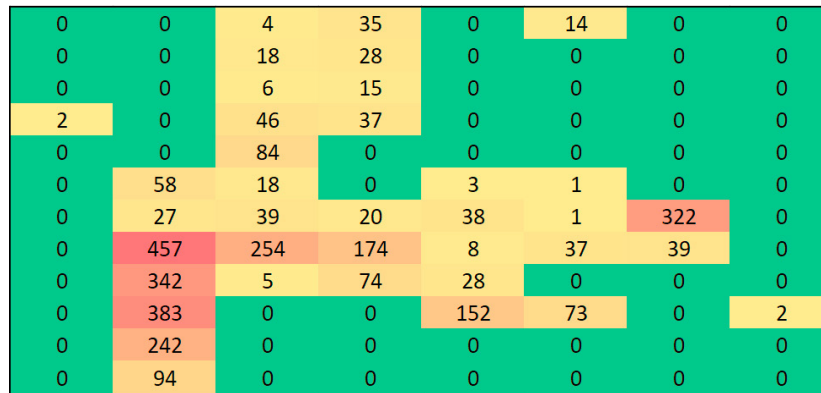


Fig. 5. The heat map of critical areas found by the data analysis.

With the prediction model (Fig. 4), it was shown that shopping center emergency exits are good enough for emergency exits, even if the number of customers exceeds the maximum number allowed.

Previous research has shown that in a fire, the critical time in a building is about 20 minutes. After that, the fire gases in the fire rise to a life-threatening level. [1, 2] In these simulations the maximum time for evacuation was 703 seconds which is about 12 minutes. For the safety of the shopping center, it is very good that in all simulations the commercial center was emptied in time with clear marginal to the limit on 20 minutes.

5. Conclusions

In this research, we looked for the problem locations for a commercial shopping center emergency exits using simulations on gamified building models. In simulations, computer-controlled characters were controlled by the Unity game engine's artificial intelligence that is designed to mimic the behavior of real humans.

The artificial intelligence algorithm is based on the A* (A star) pathfinding algorithm. [11] The algorithm expects agents to be fully aware of the map of the building and the location of exits. It can be argued that this is not always the case in real life situation. But usually exits are marked well in modern buildings and we can expect the A* algorithm to correspond well to the behavior of a person who follows exit signs. Also, exits are often located near the entrance of the building and it can be expected that customers are aware of their location in relation to the entrance of the building.

The more simulations we would have completed, the larger the data material we would have collected. Through this, the reliability of analyzes made would also increase. The data analytics tools also allow one to create machine learning applications. As the data material grows, the quality of analyzes made would also improve. In addition to the data material collected in the simulations, reference data collected from other similar buildings obtained either by simulation or from actual situations could be included in analytics. There are a lot of different possibilities.

We used data analytics tools through their own interface. We could also create Web Services (Web APIs) based for example on REST/JSON interface technologies. In this case, the client applications could communicate with the data services directly through the interfaces.

Results from the gamified simulations are credible and generally believable even though no formal validation was performed. For the visual validation, it must be noticed that we expect computer characters to behave unnaturally. The default behavior for games is that character "runs 90 miles per hour, comes to a halt immediately and turns on a dime" [17]. So extra caution must be applied to quantify physical characteristics of game characters.

The data analytics tools also allow applications where the application is taught to analyze data. In that case, the accuracy and reliability of the analysis will improve over time as the application learns to better interpret the data material.

In our opinion, the research and our results show that simulations and data analytics are well suited for emergency exit analysis of this kind. The answer to our research question is that it is possible and feasible to implement an emergency exit planning and simulation environment using the building's gamified data model and data analytics methods.

The attained results confirm our vision that the idea we have developed to utilize the gamified data model as a platform for various simulations is good and usable. Analyzing the resulting data material with data analytics methods helps to identify potential problem points during the design phase, where the modifications are still fast to perform and inexpensive. This kind of simulations and associated data analysis will help designers to achieve better design solutions. The results confirm our view about the usefulness of data analytics methods also for the whole lifecycle of buildings.

Acknowledgment

This work was supported by the European Union Regional Development Fund and the Leverage from the EU 2014-2020 programme.

References

- [1] Magnusson, S.-E., Frantzich, H. & Harada, K. Fire safety design based on calculations –Uncertainty analysis and safety verification. Lund, SE: Lund University, 1995. 120 s.(Report 3078.) ISSN 1102–8246k.
- [2] Weckman, H. Rakennuksista poistumisen laskennallinen arviointi. Espoo: Valtionteknillinen tutkimuskeskus, 1997. 50 s. + liitt. 11 s. (VTT Tiedotteita – Meddelanden –Research Notes 1846.) ISBN 951–38–5133–8 ISSN 1235–060.
- [3] Seaborn Katie., Felsh I. Deborah., Gamification in theory and action: A survey. International Journal of Human-Computer Studies Volume 74, 2015, Pages 14-31. ISSN: 1071-5819, <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2014.09.006>, Elsevier Ltd.
- [4] Barnes, Jeff (2015) "Microsoft Azure Essentials: Azure Machine Learning" Microsoft Press, Redmond, Washington 98052-6399. ISBN: 978-0-7356-9817-8.

- [5] The official website of the Azure Machine Learning service. <https://azure.microsoft.com/en-us/services/machine-learning-service/>. Accessed: 2019-4-22.
- [6] The Construction Company U.Lipsanen Oy, A Building Information Model of Commercial Center in IFC format, Pieksämäki, Finland, 2018.
- [7] BuildingSMART International. The official website of the IFC-format (ISO 16739:2013). Accessed on April 18, 2018. <http://www.buildingsmart-tech.org/specifications/ifc-releases>. Accessed: 2019-4-24.
- [8] The official website of the IfcOpenShell-project. <http://ifcopenshell.org/>. Accessed: 2019-4-24.
- [9] The National Research Council (Cnr). The official website of the MeshLab software. <http://www.meshlab.net/>. Accessed: 2019-4-24.
- [10] Unity Inc. The official website of the Unity game engine. <https://www.unity3d.com/>. Accessed: 2019-4-24.
- [11] Unity Inc. The official website of Navigation System in Unity. <https://www.unity3d.com/Manual/nav-NavigationSystem.html>. Accessed: 2019-4-24.
- [12] Selin Jukka., Rossi Markku J., The functional design method for buildings (FDM) with gamification of information models and AI help to design safer buildings. FedCSIS, 2018 Federated Conference, Poznan, Poland, 2018. ISBN 978-83-949419-5-6, 978-83-949419-6-3 and 978-83-949419-7-0, ISSN 2300-5963, IEEE.
- [13] An action space defining object for computer aided design. Finnish Patent 125913b, granted on April 15, 2016. Fourteen claims. Current owner : Xamk. Inventor: Selin, Jukka-Pekka. Is the origin of the PCT patent application WO 2014/154942 A1.
- [14] An action space defining object for Computer Aided Design. PCT patent application WO 2014/154942 A1. Applicant Mikkeli University of Applied Sciences Ltd (Jukka-Pekka Selin).
- [15] Rossi, Markku J. and Bhargav, Dave, Digitalization and quality enhancement initiatives in sw assisted design processes in building and construction industries. 9th International Conference on Computer Engineering and Applications, Dubai, 2015. ISBN 978-1-61804-276-7.
- [16] Selin Jukka., Rossi Markku J., Simulation of universal design by a functional design method and by Gamification of Building Information Modeling. FedCSIS, 2016 Federated Conference, Gdansk, Poland, 2016. ISBN 178-8-3608-1090-3 and 978-1-5090-0046-3. ISSN 2300-5963, IEEE.
- [17] Unity Inc. Manual: Character Controller. <https://docs.unity3d.com/Manual/class-CharacterController.html>. Accessed: 2019-7-4.

.....



Julkaisu IV

Selin, J., & Rossi, M. (2019). The Functional Design Method for Public Buildings Together with Gamification of Information Models Enables Smart Planning by Crowdsourcing and Simulation and Learning of Rescue Environments. *Intelligent Systems Conference (IntelliSys 2019)* (pp. 567-587). *Intelligent Systems and Applications, Springer, Volume 2*. ISBN 978-3-030-29512-7. https://doi.org/10.1007/978-3-030-29513-4_42

Julkaisukanavan taso: **JUFO 1**

© Springer 2019, Reprinted with permission.

The Functional Design Method for Public Buildings Together with Gamification of Information Models Enables Smart Planning by Crowdsourcing and Simulation and Learning of Rescue Environments

Jukka Selin and Markku Rossi [21]

South-Eastern Finland University of Applied Sciences Ltd., Patteristonkatu 2,
50100 Mikkeli, Finland
{j u k k a . s e l i n , m a r k k u . r o s s i } @ x a m k . f i

Abstract. We have developed and piloted a method that can be used to create planning and learning environments that fuse buildings design with game programming. The method also allows e.g. to design and different simulations of building usage (like emergency evacuation by rescue teams). The method also brings together the students of game programming and buildings design with building users and construction professionals to work together towards mutual goals. This way they all learn in addition to group work to act in projects with students, building users and professionals of many disciplines. This is increasingly a key skill in the modern work life that relies heavily on projects. In this environment it is important for the actors to learn how to understand and appreciate the specialists of other disciplines and their professional skills. The gamified information model of a building can be used after its completion as a learning and testing space for the construction professionals. In the gamification we utilize our patented Functional Design Method for Buildings that enables to take into account the space needed for human actions in buildings or other targets under design in information model based (BIM) design of buildings. The objects to be dimensioned could e.g. be related to safety, loading and unloading areas or production processes and their requirements for space. An inverse approach is also possible. The method helps all actors of construction business, building users and students to better take into account and understand operational spatial requirements in a building and about safety.

Keywords: BIM · AI · Multi-gaming · Gamification · Crowdsourcing · Simulation · Learning · Learning environment · Function dimensioning · Universal design · Barrier free · Energy efficiency

1 Introduction

In this paper we present the method and different applications of gamified 3D building designs derived from the methods. We also present our experiences from the pilot studies. We also tell about our views and results we gathered about the usefulness of

this kind of information models to learning environments of both game design and buildings design. We will examine them both from R&D and software products points of view. We also present valuable knowhow we have accumulated in pilot studies about the feasibility of the Functional Design Method (FDM) to dimensioning of spaces and about studying dimensioning when related to creating human actions based building specifications.

In addition, we will present the utilization of the Functional Design Method (FDM) "Value Add Data/VAddD" together with the Gamified BIM Information Model during the different phases and applications of building design. The cases presented relate to the joint R&D and piloting efforts of the S-E Finland University of Applied Sciences (XAMK) and our industrial construction partners. FDM is based on the Finnish patent by our senior lecturer and Licentiate of Science Jukka-Pekka Selin. The patent was derived from an earlier internal innovation report [1- 3].

The core idea in the FDM is to capture the space requirements of real action in three dimensions and then create a new 3D spatial object. The new 3D objects represent the maximum spatial space requirements of actions. When using Construction CAD these objects can be used in dimensioning different spaces. The goal can be both to fit an action to a space or alternatively ensure that an object can reach all the needed places in a space. If the Information Model in the form of an IFC (Industrial Foundation Classes) file is gamified it becomes possible to use the spatial objects to realise e.g. adaptation capable game colliders around game objects. In that case we can test the fitting of different actions or reaching capabilities of objects to stationary parts of the construction. We can also perform simulations. The buildings and constructions will now fit their purpose better than when using current design methods.

The core idea is to design the spaces and walls in terms of meant actions and not adapt the actions to the spaces available. The FDM provides excellent tools to achieve this goal. In our piloting program we used a real construction project of our industrial partner, a Finnish supermarket [4]. We gamified the complete BIM Information Model and were then able to test the FDM from different perspectives.

In the first pilot we simulated the emergency evacuation from a supermarket with a gamified model by utilizing AI (Artificial Intelligence) based navigation of moving avatars in the model of the market. In the simulation we had avatars with individual behavioristic profiles and sets of rules. We made the avatars evacuate themselves using an AI engine and individual parameters along evacuation routes that were rapidly chosen after a fire alarm. This piloting action helped all partners to understand in a concrete way the importance of safety and Barrier Free principles in the buildings design especially when related to fire safety. The attendants could also learn from the research data and apply their new knowledge to practice. The pilot studies also helped the students of data processing to develop skills in simulation applications utilizing Artificial Intelligence (AI). With those applications it was necessary to realize as closely reality matching virtual game environments as possible by combining results

from the research. The pilots also enabled to test the feasibility of the FDM to extract the spatial needs of purpose profiled spaces and after this to test the dimensioning of the corresponding game colliders used in the realization of simulations.

In the second pilot we tested the FDM in the dimensioning of spaces to be adequate and enclose all the necessary actions planned to occur in the spaces. The external loading yard of a supermarket was designed for efficient and safe operation of trucks. The pilot studies taught the students to dimension spaces according to different norms and regulations. The program also developed the skills of especially construction students and also students from other disciplines in dimensioning loading areas so that all necessary vehicles are able to operate in the space. In this trial we were able to test the feasibility of the FDM to dimensioning studies and professional dimensioning of real sites.

The third pilot was a dimensioning of an industrial plant with manufacturing lines and robots. The positioning of the lines and robots was optimized together with the allocation of minimal manufacturing space. The piloting taught the actors to dimension production facilities so that also knowhow to take into account safety to an adequate degree was achieved. Especially the construction students gained understanding in designing safe production spaces and the required safety zones, as requested by norms and regulations. In this program we similarly tested the feasibility of the FDM to the dimensioning of production lines and safety zones and to the dimensioning studies.

We also present a pilot where the reaching capabilities of moving actors to objects to be moved were tested. We dimensioned the shelves of a supermarket and the corridors between them so that the forklifts can operate in between the shelves and can also reach well and safely the shelves at the top. The piloting actions taught the students to dimension storage facilities. The spaces must be large enough, safe, and it must be possible to reach all objects during operations safely. Related to the pilots we tested also the FDM for the design of reachability.

All piloting actions increased knowledge and understanding of both game programming students and construction students about the human actions based design so that the safety and Barrier Free design principles were realized. The skills related to understanding different norms and regulations steering the designs increased. Different actors also learned to take into account and appreciate the knowhow of representatives of other professional disciplines. The students realized that these kinds of design projects will not succeed at all without a combined effort of different expertise. Everybody learned new skills from other actors and the initial idea that one person can handle the whole design field was abandoned in favor of group work.

2 Materials and Methods

The maximum space requirement in dimensions x, y and z can be derived from video clips of real human actions. In this method the real actions are videoed with at least two video cameras that are situated at right angles. The need of space from the actions in three dimensions is measured and a corresponding geometrical object is created. This 3D object in IFC file format is compatible with different CAD software. The goal is to ensure that the required actions can fit the space under design [1- 3].

During the research program the application that is BIM compatible and is meant for Lifecycle Management of Building Data, and the application extension Value Add Data of XAMK R&D, were used for creating 3D objects. The application extension realizes the functionality of the FDM. The Colliders describing the space requirements for different actions to the gamified model were created via the execution of the Value Add Data software [4]. The Information Model used with the supermarket consists of several submodels that have been created by the designers of architecture, structures and different subsystems, with different CAD tools. As an example, the architecture model has been designed with the ArchiCAD software by Graphisoft SE. All submodels of the supermarket have been received for piloting in the IFC format [4, 6]. The submodels have been converted by the tools of the Open Source software family IfcConvert to the OBJ format [7]. The files that were in the OBJ format have been further optimized and shortened with the Open Source software MeshLab [8].

The metadata that are in the IFC files have been transferred by using the XML format. The conversion from IFC into XML has been performed with the IfcConvert. The gamification itself has been performed with the Unity game engine [9].

When simulating the emergency evacuation we used the Navigation extension of the Unity engine. This extension brings possibilities to use AI based navigation schemes [10]. In addition to the Building Information Model we also used other 3D models. To convert these other models and animations related to them to required formats we utilized the 3ds Max software by Autodesk Inc., and also the SketchUp Make software by Trimble Inc. [11, 12].

The schematic above (Fig. 1) describes the process developed by us to gamify Information Models of buildings. The basic principle of the process is that the gamification should be as independent as possible of the choice of the original CAD design tool. The only requirement is that the CAD tool supports the IFC format and can export both data and metadata into an IFC file according to the BIM recommendations [6]. Into a model gamified this way we can bring spatial objects generated by our FDM. These VAddD spatial objects can also support designs as such or if further converted into Game Colliders.

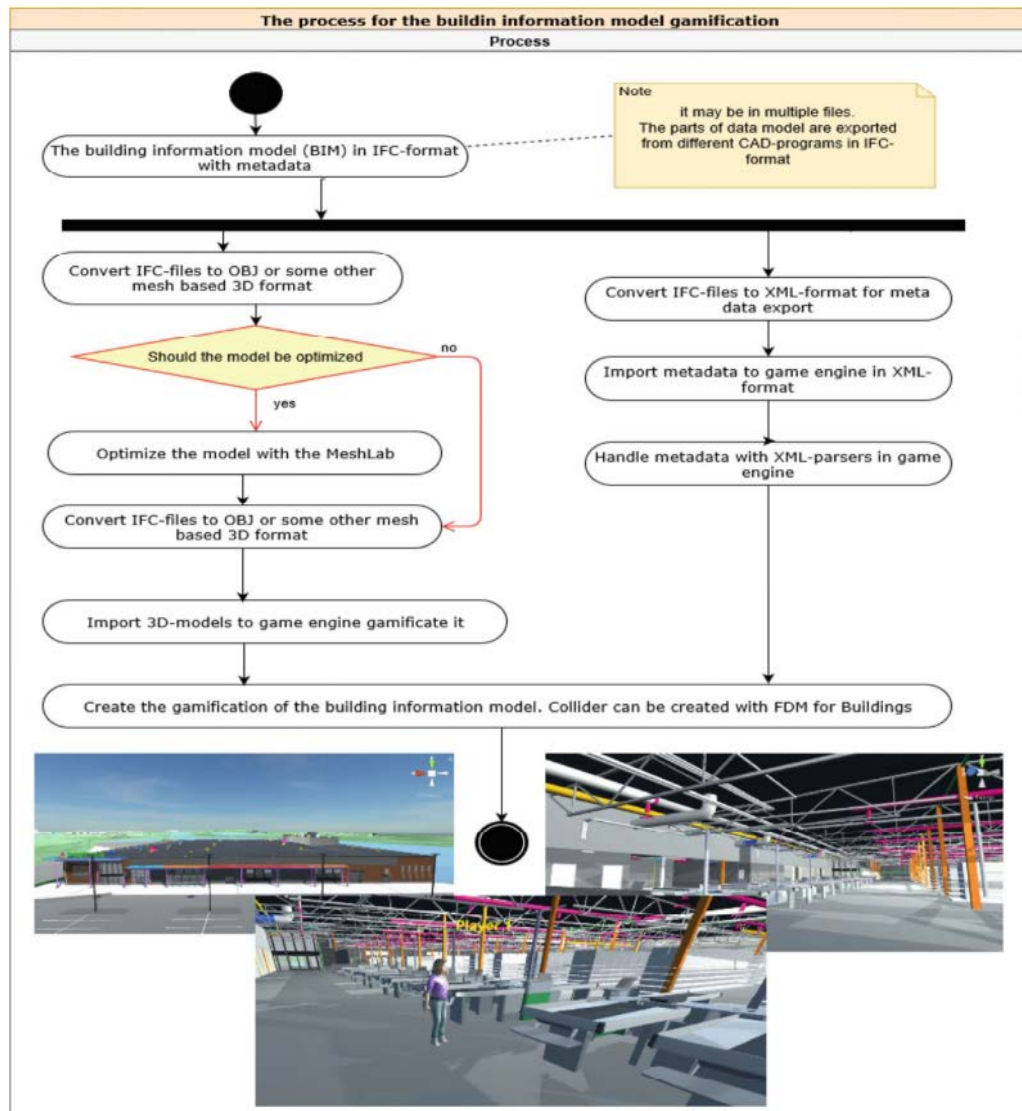


Fig. 1. Our process for gamifying Information Models.

3 The FDM Together with Gamification of Information Models Teaches and Helps to Design Safer Buildings and Structures that Fit Their Purpose Better Than Before

We created pilots to study different possibilities and applications for the FDM. We utilized an Information Model of a real supermarket. Our partner, the construction company U. Lipsanen Oy built the supermarket in 2018. We received the Information Model as several IFC submodels, so we were able to test our procedure to gamify models represented according to the recommendation IFC (Fig. 2) so that also the metadata can be input to the gamified model [5]. The main goal was to be able to use open software. For that reason we ended up to use the IfcConvert software from the IfcOpenShell library to convert IFC files into mesh models supported by game engines. Among the formats of mesh model formats we selected the OBJ format. We had a need

to optimize and radically reduce the amount of polygons approximating the surfaces, especially related to pipes. To do this we chose the open MeshLab software that has excellent support for the OBJ format. We also used the IfcConvert to create XML files from IFC and to bring the metadata of the models together with the 3D model into the game engine [7, 8].

With the aid of the gamified Information Model we piloted the usage of FDM to different simulation targets. The first target was the emergency evacuation with an AI navigation control used in a Unity game environment [13]. We placed profiled or individually parametrized avatars randomly inside the supermarket and then commanded the avatars to proceed to the closest emergency exit with the aid of the AI engine.

Around each avatar we placed game colliders that described the space needed for the avatar when mobile, according to the avatar profile. Such avatar can use different aids to overcome limited mobility when moving. An avatar using an aid like a rollator usually needs more space than an average person. Each of the avatars also possessed an individual moving speed.

The second simulation target was a loading area outside of the supermarket. There trucks with whole trailers should be able to operate efficiently and safely.

In the third pilot we tested the planning of the placement of industrial robots and other objects in a production facility so that the gamified objects with colliders enabled to optimally plan the functionality and the safety of the space.

In the fourth pilot we tested the FDM for buildings in a situation when we wanted to ensure that a certain object is able to reach target objects with their manipulators. We aimed to place storage shelves to a supermarket so that a forklift could flexibly operate in between the shelves and could also reach the shelves well enough and safely. We now describe more closely the pilots and present the main results and conclusions.

Both Information Technology and Construction Engineering students attended to the piloting actions. According to our observations the pilots were useful as aids of design and visualization, but also offered an excellent learning environment to the students of both Information Technology and Construction Engineering. During the system and software development phase the prototype system and its components were parts of the learning environment. Later the integrated software applications were parts of the learning environment. During the piloting actions the students of different disciplines learned how to interact and co-operate with graduated professionals, and also among the students. They learned to combine knowhow from different sectors and appreciate skills from other attending educational disciplines.

3.1 In the First Pilot We Simulate an Emergency Evacuation from a Supermarket by Utilizing AI and Using the FDM

We dimensioned the spatial needs of different kinds of people who either used aids to enhance mobility, or walked without extra gear. With FDM we generated the 3D spatial objects representing spatial needs for actions. The description of the cases for avatars can be seen in the following Table 1.

Table 1. Maximum space requirements for the dimensioning of the colliders created by the FDM.

The dimensioned action	Space requirement (m)
A walking person	0.50 x 1.90 x 0.70 (x, y, z)
A running person	0.65 x 1.90 x 0.90 (x, y, z)
The assistant walks with the wheelchair user behind the wheelchair	1.30 x 1.90 x 1.00 (x, y, z)
The wheelchair user without the assistant	1.00 x 1.50 x 1.00 (x, y, z)
The user with rollator	0.90 x 1.90 x 0.75 (x, y, z)
The user with crutches	0.90 x 1.90 x 1.00 (x, y, z)

From each of the cases we generated an avatar prototype that has colliders corresponding to the table. In this pilot the characteristics of the colliders were specified on a relatively common level. We felt that this accuracy is adequate from the piloting of simulation method point of view. The avatar profiles could well be much more individual and more different types of avatars representing different customers of the supermarket could be created.

For accurate and realistic simulations corresponding to real situations it is necessary to increase both the number of variables and to increase the number of movement functions that have a partially random outcome. The number of simulation drives should be high when we want to apply statistical methods to the outcomes of the individual simulation drives. The results of the statistical studies would show how well the supermarket supports safety and show hints how to further increase safety by design. Different building designs could be simulated and compared. After iterating with different designs it is possible to reach the functionality requirements.

In our piloting we were mainly interested in the feasibility of the FDM in this kind of dimensioning and simulations. We used in our pilots some randomness in the collisions in between different objects to increase realism.

The piloting was performed by using the Unity game engine and the C# programming language. We added a simulation extension to the gamified Information Model of the supermarket. The simulation extension creates a predefined number of avatars with different characteristic profiles. In the beginning of the simulation the avatars are located at their initial locations around the floor area, derived from random values of parameters. The characteristics for different types of avatars are in the table above (Table 1).

In the simulation we used the Navigation tools of Unity, based on AL. With the tool we could create a navigation map situated on the floor level of the supermarket. More generally, the map could include any stationary objects of the gaming world. With the aid of the navigation map an avatar can now be commanded to progress to the needed target area so that the AI tool steers the movement of the avatar. The events during the navigation phase can be controlled by numerous different navigation parameters. Among the features that can be controlled are the maximum physical difficulty level of obstacles that can be over- or sidewise passed, and the intensity of effort in movement [10].

We realized the simulation in a way that the customer avatars with spatial needs according to their profiles are moving and directed by the AI towards emergency exits. The situation can be monitored by virtual cameras situated in the gamified Information Model. Each of the avatars are also carrying their own cameras that can be switched on when necessary.

The development of the situation can now be monitored from all angles. With the simulation application developed You can quickly control e.g. the number of customers, randomness of events and navigation parameters. It is also possible to change and define quickly the target-objects that are the destinations of the avatars.

The avatar game objects that represent supermarket customers and are used in the simulation can in principle look like whatever the artist decides, but we increased the realism of the simulation by creating 3D avatars that look like typical shoppers. We also made them move according to kinetic data from an earlier human motion capturing session with cameras. Their movement looks therefore quite natural.

The realism of the simulation can be enhanced by adding different effects. Here we wanted to simulate a fire in a supermarket and we added a smoke effect to the gamified model. The progress of the fire follows a well-known Fire Intensity Curve that is a generalized model about how the fires progress (Fire Intensity against elapsed time) [14]. The following picture (Fig. 3) visualizes a generalized Fire Intensity curve that represents the intensity of the fire in majority of cases. In addition, the picture visualizes the phases of the evacuation and parameters used in the case of a supermarket.

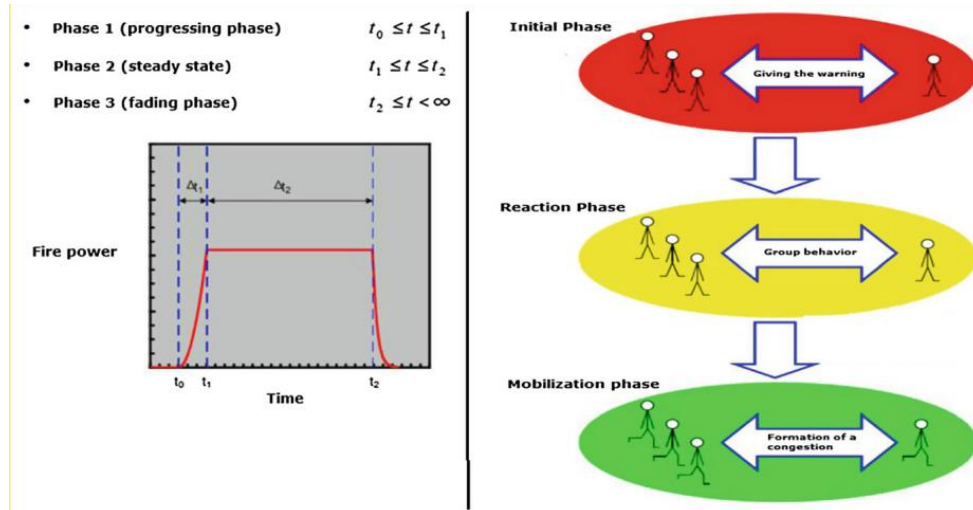


Fig. 2. On the left side a generalized Fire Intensity curve that represents the intensity of the fire in majority of cases. On the right side the phases of an emergency evacuation (14).



Fig. 3. A simulation application realized with the Unity game engine. A game collider corresponding to the spatial need of an avatar is visible on the picture.

The fire develops inside a building usually so that the environment becomes intolerable for humans. The cause can be different poisonous and irritating gases and the heat. Because of the fatal environment one should remove humans from the building as quickly as possible [14].

At the University of Lund the research aimed to find out how long it takes before the environment close to the fire becomes intolerable for humans. Also the VTT Technical Research Centre of Finland Ltd has performed research on the topic. In both research programs the critical factor was found to be the smoke occupying the whole volume of the building. The scattering of the research results is however relatively high [14, 15].

Based on the before mentioned research results we set the critical elapsed time after the start of the fire to 25 min with a standard deviation of 8 min. We put 500 customers into the supermarket corresponding to the daily rush hour. Our simulation can however adapt easily to a wide range of parameters for each case.

The evacuation of humans from the buildings can be divided into three main phases. The phases are called the preliminary phase, the reaction phase and the mobilization phase. The total time elapsing in the evacuation follows the formula $t = t(\text{initial}) + t(\text{reaction}) + t(\text{mobilization})$. The durations of these times are naturally very individual, so we need to include random variables related to the behaviour of people to our calculations [16]. The following picture visualizes the phases of the evacuation and parameters used in the case of a supermarket.

We realized the simulation application of an emergency evacuation by utilizing scientific studies mentioned above. We set the parameters of the dangerous situation (here a fire) so that the situation can be divided into the above mentioned phases. It was possible to freely change the durations of the phases. We also designed the customer

(avatar) profiles so that there is randomness in the profiles and the process follows the phases of an evacuation [14].

The following picture shows a view from the simulation application on the display during the run of a process performed by the Unity game engine.

The event that causes the need for evacuation can be parametrized and the seriousness and location can be varied. We can test a situation where a fire restricts access to a certain area and can even prevent to use certain emergency exit.

After the simulation starts the game objects corresponding to profiled supermarket customers begin to move towards the selected emergency exits. The following picture (Fig. 4) visualizes a situation where the fire simulation is active and the profiled customers are trying to move towards the emergency exits. Their spatial needs and profile settings affect their moving speed and route when they navigate past shelves and other structures, while interacting with the other customers. We can observe how the customers occasionally prevent each other to use the most direct routes.



Fig. 4. The simulation is active and smoke begins to enter the interior of the supermarket. The profiled customers (game objects) are rushing in chaos towards the defined emergency exits under the control of the AI engine (the reaction phase and the mobilization phase).

The structure of the simulation application is such that it saves the movements of the profiled customers to a log file. The applications also recorded for every customer the moment when he moved from a phase to the next. We also recorded to the log the collisions with the other avatars and the moment of time when the customer was able to exit the building. Then the avatar reached the emergency exit that was the target location of the navigation.

The simulation was built so that the profiled customers possessed randomness according to the range found out in the studies [14, 15] and [16] during the initial and reaction phases. The simulation run specific log file generated gave a lot of valuable data about the functioning of the building in an emergency. With the aid of the logs it is e.g. possible to study the success level of different safety increasing measures. The log includes data for e.g. finding out when 90% of the customers have left the building or how much a new exit reduces the time of evacuation and also what the best place for a new exit is.

In the exemplary simulation presented here all of the 500 customers could exit the building in 15 min. Over 90% of the customers had exited already in less than 10 min from the beginning of the fire. The last ones to exit were the individuals who have long reaction times and who are using aids for reduced mobility. When we made the distance between the shelf units narrower the evacuation times increased significantly especially with high numbers of people. Correspondingly, extra exits shortened the evacuation times, as expected. According to this simulation the supermarket was found to be safe enough in fire situations with the designed types of corridors and exits.

We also tested during the simulations a situation where the cameras are videoing from the point of view of the customers. We gave each customer an own camera enabling us to switch to the view from any of these cameras. It was especially interesting to note how an aged customer using mobility supporting aids and moving slowly suffers from collisions with other customers moving move swiftly. The following picture visualizes the emergency evacuation event from the point of view of e.g. an older customer moving slowly and using a rollator. This fact could also be found from the generated log files. The following picture (Fig. 5) visualizes the emergency evacuation event from the point of view of e.g. an elderly.



Fig. 5. Simulation showing the point of view of a slowly moving elderly using a rollator.

Finally, we simulated a situation where the viewer is a manually steerable TPC-type object (Third Person Controller) who tries to exit the building. Also in this case we have a set role and spatial needs that were dimensioned by using the FDM. We conclude that this could be an excellent way to practice doing the emergency evacuation. By using the multiplayer functions of Unity we could simulate situations where several players are practicing emergency evacuation or generally any co-operation with other players.

The following picture (Fig. 6) visualizes a situation where each of the players of the simulation is moving a profiled avatar that has settable parameters. The players can do different roles like rescue or leading the evacuation operation. In the picture the player has entered the supermarket and encounters there customers who are rushing out. This way we could practice beforehand the actions during emergencies from the point of view of different actor roles.



Fig. 6. A TPC player (Player!) has entered the supermarket after having received an alarm, performs rescue and assistance work and encounters customers who are rushing in panic.

The approach of this pilot appeared to be very interesting and relevant. The FDM brought clear added value to the piloting, because the different individual spatial needs could be taken into account in the simulation. According to our industrial partner the principle to combine the simulation of emergency evacuation with the usage of the FDM is a very good idea. We are planning to further develop these methods in our current research project.

The insertion of multiplayer functionality and co-operation of a community into this kind of simulation was especially rewarding. When the Information Model is gamified and we crowdsource the emergency evacuation simulation we could get valuable knowledge and ideas from a large group of people to enhance the accessibility and safety of a supermarket. We plan to develop these methods and tools further in the future.

The simulation of emergency exits increased the knowhow and awareness about safety related matters of buildings both for attending students and the graduated professionals. The realization of the pilot program called for studies of previously published research and applying these results to the environment under development. This process increased the skills of the personnel in designing safety and especially in this case the knowhow about fire safety when designing buildings. The piloting program also gave excellent new skills in utilizing AI in this kind of applications. The attendants learned to find and include research results as well as different design rules, norms and requirements from standards to the specifications of the software code they produced.

3.2 Dimensioning of a Loading Area of a Supermarket in Such a Way a Truck with Full Trailer Is Able to Move There Safely and with Sufficient Space

In the second pilot we utilized the Functional Design Method to dimension the loading area so that a truck with a **full** trailer fits in safely and with space to spare. We used the

building object data cards (RT-cards) of Rakennustieto Oy to create the needed 3D spatial objects. This assistive information card library helps to design buildings and infrastructure according to the Finnish regulations. The building object data cards used were from the sublibrary dimensioning of roads [13]. We would have also been able to dimension the truck with the trailer by measuring the maximum space requirements to x, y and z-directions from video capture (Fig. 7).

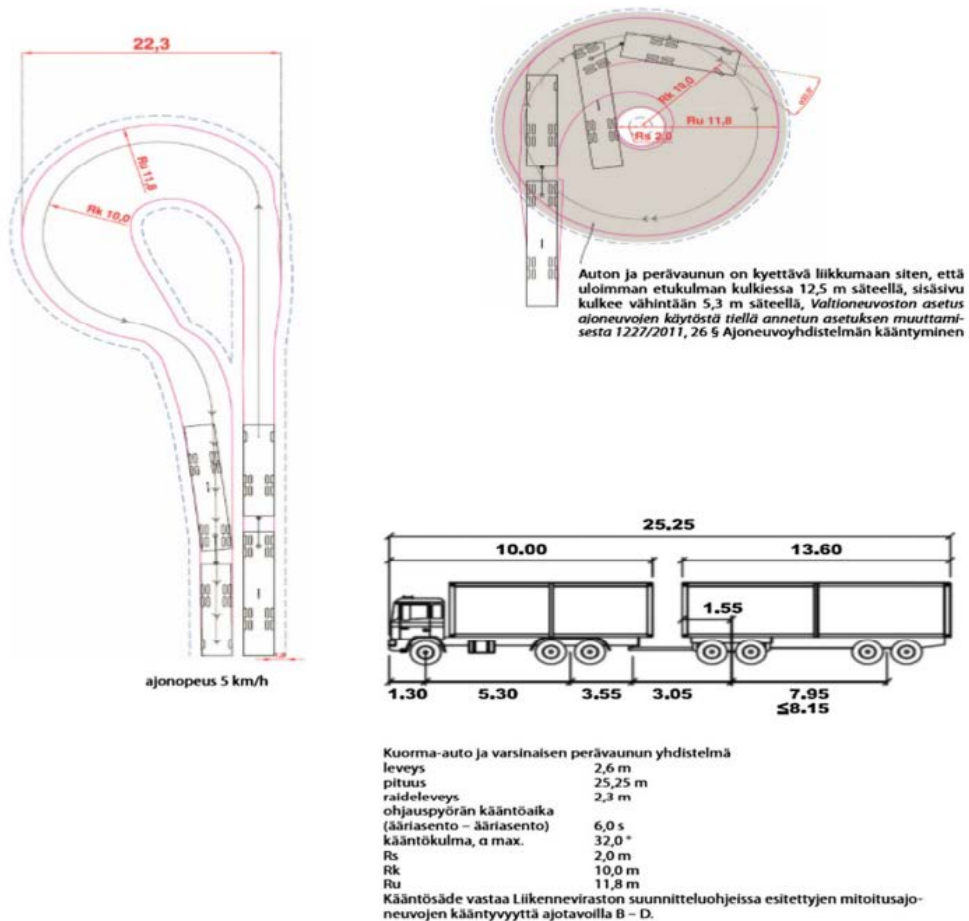


Fig. 7. Dimensions of a truck with a trailer [13].

The next picture (Fig. 8) shows how a loading area can be dimensioned with FDM and gamification.

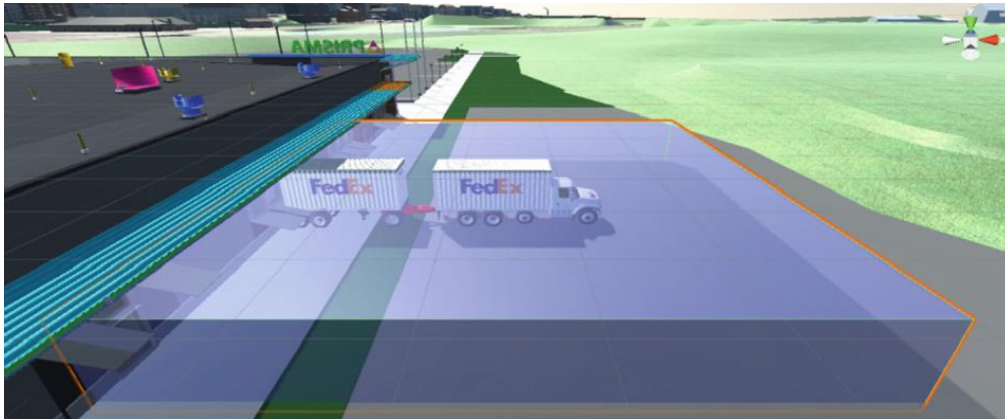


Fig. 8. Testing of the spatial fitting of a truck with a full trailer at a loading area of a supermarket with the aid of a transparent 3D spatial object.

The piloting was successful according to our expectations . We think the FDM brought clear added value to the planning of the loading area and to the comparison of design alternatives. When using our new methods it is possible to have the spaces serve better than before the real functions and procedures performed in the space under design. In this case the target was smooth and safe unloading operations. Our partners agreed that the added value compared to the traditional methods was significant.

The benefits of our methods are wide scope of applications, flexibility and high quality of visualization. A spatial object can be generated out of the actions and movements of any object if the used cameras can capture the whole object, and converted by FDM into a 3D spatial object compatible with IFC files. The method is not limited to whether the moving object is a person or several persons, robots or e.g. a truck with a trailer as in the pilot two. The piloting successfully demonstrates the excellent visualization capabilities . It is possible to increase details by creating a 3D model of a truck that has the Physical Capabilities parameters of the game engine in it. We could then simulate the movement of a realistic truck on the loading area of a supermarket. This piloting program increased the knowledge and understanding of the attendants in dimensioning and in the norms and standards related to dimensioning. We also gained very good practical evidence about the good applicability of the FDM to this kind of tasks. Based on these results it is possible to build e.g. to the Logistics sector game based simulations for virtually practicing steering, driving and loading in reality conforming virtual operation environments of e.g. commercial malls.

3.3 Dimensioning of Manufacturing Spaces for Industrial Robots with the Maximum Spatial Need Data

The purpose of the third pilot was to test the feasibility of the FDM to dimensioning of manufacturing spaces so that the spatial needs of all the industrial gear are taken into account in the design. We think that this kind of thinking enables to place the functionality on the first priority when designing facilities. Instead of first designing the walls and then trying to fit the actions inside we can now design the spaces according to

the needed actions and after that design the walls to safely encompass the needed actions. This increases the fit of the spaces to their purpose, enhances safety and minimizes the material costs.

We think the FDM suits very well to the task of dimensioning the need of space of manufacturing equipment, like robots. The maximum space required by the equipment can be defined and then the gear can be placed to the floor with the safety margins but at the same time minimizing the need of space.

It is possible to make the usage of space more efficient and increase safety. In this simulation it is possible to enter the time as the fourth dimension. Then the colliders of objects could touch each other as long as the collisions appear at different moments. There would not be safety issues in this case if the machines are time controlled. The tools and methods also make it possible to use realistic looking models of the manufacturing gear with animations bringing in the spatial needs aspect. In addition to spatial needs we could then simulate also the functionality of the machine and then the whole production.

In this pilot we used the supermarket space model as a factory space model and placed some industrial robots with their spatial movement needs into the hall. We were now able to test the feasibility of the FDM with this kind of spaces. In this pilot we performed the placement of objects and the dimensioning of spaces directly in the Unity game engine. Similarly, the spatial requirements in the IFC format from the FDM process could be the source of 3D data in any of the various CAD design tools, and one could do the dimensioning and the design of spaces there.

The following picture (Fig. 9) visualizes the situation where a couple of industrial robots has been placed into a hall so that their maximum-reaching game colliders derived from FDM results are not intersecting each other, but all manufacturing gear has space to operate and move simultaneously. The 3D spatial objects shown include the actual visual models and the movement animations making the picture quite real looking. From the view of the spatial design alone this higher level of detail is not necessary.

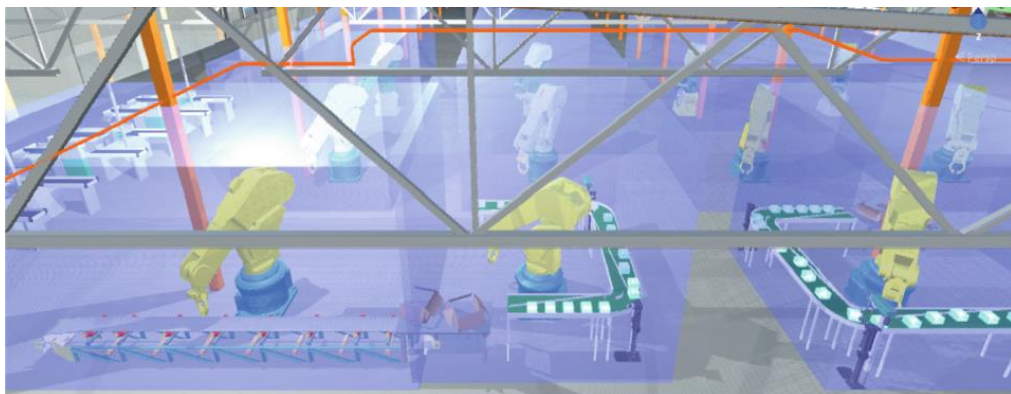


Fig. 9. The production equipment with colliders according to the spatial need objects placed to the gamified Information Model of the manufacturing hall.

Our way to apply the FDM to the dimensioning of manufacturing facilities appeared to be rather feasible. The method and 3D spatial objects bring according to our opinion added value to the design and dimensioning of this kind of spaces. The method suits very well together with gamification and game engines because the colliders from 3D spatial objects already bring by their definition the possibility to test the fit of the object to the surrounding spaces.

The idea presented in the piloting could be further developed e.g. by introducing workers to the production space in the game engine. The workers could have FPC- (First Person Controller) or TPC - (Third Person Controller)-type characteristics as used in game engines. In this case the player of the game could act as an active production worker in the manufacturing space and we could see the functionality from the efficiency and safety perspectives. The following picture (Fig. 10) shows a situation where the game application is executing the game and the player in moving among the manufacturing gear. We can now examine the feasibility of the placement plan and e.g. safety.



Fig. 10. The piloting of a game application is under execution and the production gear with game colliders with the real spatial needs is performing its production process.

Further, it would be possible to simulate production by the multiplayer capability and crowdsourcing so that several simultaneous players with different roles are performing their duties together with the production equipment. If the players are actual workers and end users of the spaces we think we could get valuable data about the real user friendliness and real safety of the facility.

We became convinced ourselves that the **FDM** actually is an excellent tool when designing the spatial needs of machinery in a space and probably also when designing the spaces for human actions. We can address both dimensioning and the simulation of movement of objects. Our partners find the results especially interesting when the original goal of our joint development program was to develop design of buildings with Information Models so that the basis of the design would be the actions taking place in the building under design. We want to design with the customer's actions as the

starting point, not the walls or the pre-estimated cubic volume. We will definitely be continuing this kind of research with construction companies.

This piloting research program turned out to be both interesting and skills enhancing. Most of the attendants found the safety issues and dimensioning problems of production lines relatively new to themselves. Along the studying of the building norms and regulations was very instructive. The simulations gave a very good view about the functionality of production machinery and about why the safe distances and safety zones are needed. The students also came to understand why there are strict design rules for production facilities. Robots operating with humans can move quite unexpectedly and introduce dangerous safety risks.

3.4 Dimensioning of Storage Shelves so that the Forklift Reaches Them Well and Safely

In our fourth pilot we studied the feasibility of and applied the FDM to an inverse application compared to avoiding collisions between different objects. So we wanted to ensure that a forklift moving in between shelves can reach all the shelves safely. A good design is essential to the working safety because the forklift can become unstable when lifting heavy cargos high and the forklift can even topple over. We utilized the FDM in the design of the elevations of the shelves, the placement of the shelf units and the width of the corridors so that the forklift can well move in between the shelves and also load and unload objects on the shelves.

In this pilot we used the FDM to design around the forklift an 3D object describing the maximum need of space of the forklift when it operates. In addition we designed a second 3D object. Within the space of the second object a forklift is able to safely lift and unload cargo onto a shelf. The collider related to fitting to the corridors existed simultaneously with the latter collider.

The following picture (Fig. 11) has been captured from the Unity game engine from a situation where the shelves were placed in such a way that the forklift has sufficient space to move and can also safely reach all the shelves.

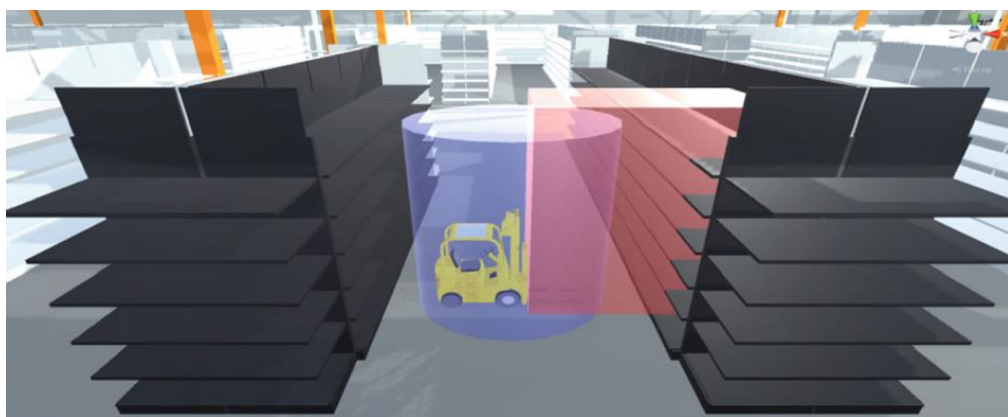


Fig. 11. The forklift has colliders generated by the FDM and they are used to dimension both shelf units and the corridor space in between the shelf units. Blue represents the moving space and red the volume of safe reaching.

We think that the FDM fits excellently also to this kind of reverse dimensioning when the goal is to have an object reach other objects in the Information Model.

Based on the former pilot we could even generate several forklifts that operate simultaneously and would be steered by the AI engine of the game. We realized a quite similar case earlier when we simulated the emergency evacuation. We would be able to observe how well the co-operation of forklifts succeeds. The simulation could be further developed into a training environment for the forklift operators for learning how to act the right way and safely. It is possible to generate a camera view to the storage space from the driver's seat pointing normally forward. It is possible also to utilize VR (Virtual Reality).

In the following picture (Fig. 12) the player and the forklift occupy the same environment. We could then test and simulate e.g. the smoothness of operations in the storage facility and safety. Further, when activating multiplayer functionalities we can practice and test operations so that each player has an own role. In such a way we can crowdsource parts of the design work to actual end users and receive valuable knowledge and development proposals.



Fig. 12. A forklift with added game colliders and the added reachability region operates in a warehouse and the player of the piloting application exists in the same space.

The results from the pilots awakened interest and new lines of thought also among our partners. By combining results from methods piloted here to the same gamified Information Model we created a comprehensive gamified Information Model that is also a simulation environment capable of testing and simulating the functionality and operations of e.g. a supermarket during different levels of spatial stress and emergencies. In this piloting subproject we were able to test the FDM to two process directions, to dimensioning both adequate spaces and reach. The actors also gained excellent knowledge about designing and dimensioning safe storage facilities. We actually concluded that a further development step should be a learning environment where students of Logistics could become familiar with operating forklifts safely in different reality conforming virtual environments and operations.

4 Results and Discussion

The pilots presented strengthened our view that the Functional Design Method VAddD developed earlier is a useful and practical tool for designing buildings and that it is flexible to cover different purposes and application environments. The method suits also to different design challenges of infrastructure and built environment in addition to building design. It helps to perform the designs based on end users' activities in the buildings. The method is also independent on what CAD ecosystem was used to design the first 3D model. The pilots presented belong to our research program for the construction and building industries.

We conducted a small scale interview among our R&D partners related to the research results. We interviewed the industrial contact persons who are either managers or designers from the construction industry. One of the designers interviewed was specialized on game engines and gamification and has an IT background at our partner company.

As a summary from the results of the interviews the usage of BIM, the gamification of Information Models and the Lifecycle Management of the Information Model were seen very welcome and needed development paths for the construction industry. The interviewed also said that the FDM is a very good idea for taking the human actions into account in all kinds of design challenges better than before. All new methods belonging to this category of methods were seen as welcome development. The topics of the piloting actions performed originated partly from our partners so their orientation towards the pilots was positive and enthusiastic from the beginning. They especially thought that the simulation of the emergency evacuation scene was successful and stated that the FDM brings clear added value and new feasibility because You can now profile the users of the building and create individual characteristics and spatial needs to the avatars used. This way the simulation can be made very realistic and the results really bring new data about the building design and its functionality.

The partners of our R&D program think that the FDM for buildings and the pilots utilizing the methods are interesting, bring added value to the design processes and so are definitely worth further studies. Exactly to this direction should the design of buildings according to their opinion be developed in the future.

The piloting program and the interviews related to it show that the Functional Learning Methods combined with multidisciplinary teams provide an excellent learning environment. We observed increased abilities in communications and co-operation during the program. The familiarity and respect of other fields of study increased when the students realized the necessity of the involvement of all professionals. The expertise in the student's own field increased when studying the norms and regulations preceded the problem to find solutions to concrete applications of real life. These benefits emerged as results from both our lab observations and post program interviews. The program offered a very good learning environment via the Functional Learning Method to the attendants. The developed software applications themselves also acted as new kind of learning environments. During the program we also created a parametrized multiplayer game development platform using game engines. When utilizing our platform it is now possible to realize corresponding piloting programs relatively

swiftly. Because of the platform we can construct virtual reality games to enable the simultaneous operation of several avatars or users in the virtual building. This makes it possible to study and simulate e.g. the co-operation of several avatar workers and the production machinery in a factory or the co-operation of the rescue personnel in a commercial mall.

As the different exemplary cases of the piloting of the FDM show, the 3D spatial objects representing the maximum needed space for actions can be created in several different ways. We can use videos from played actions or corresponding still pictures. It is possible to create them also e.g. based on readily available dimension data of objects, like demonstrated above. The dimensions to the three directions can be recovered either manually or by e.g. applying pattern recognition algorithms. The FDM adapts to all of these methods. It is possible to create nearly an infinite number of 3D spatial objects to describe different actions that should fit the building under design. By using different functional limits in the gamification one can allow certain objects to touch or intersect each other up to a needed level or deny intersections. The designer can allow the needed objects to use the same space when possible. When we add the time as the fourth dimension the same objects can occupy the same space if this is not happening simultaneously. The number of different cases and design challenges that can benefit from these methods is numerous.

5 Conclusions

The pilots presented strengthened our view that the Functional Design Method VAddD developed earlier is a useful and practical tool for designing buildings and that it is flexible to cover different purposes and application environments. The method suits also to different design challenges of infrastructure and built environment in addition to building design. It helps to perform the designs based on end users' activities in the buildings. The method is also independent of what CAD ecosystem was used to design the first 3D model. The pilots presented belong to our research program for the construction and building industry. The partners of our R&D program think that the FDM for buildings and the pilots utilizing the methods are interesting, bring added value to the design processes and so are definitely worth further studies. Exactly to this direction should the design of buildings according to their opinion be developed in the future.

The piloting program and the interviews related to it show that the Functional Learning Methods combined with multidisciplinary teams provide an excellent learning environment for students and professionals. When these presented and piloted analysis cases are combined with further analysis of other actions in the building we have a large number of analysis results from a complete toolset of analyses fulfilling the needs in structural design, simulation, building automation design, training and even lifetime measurement and control during the whole lifecycle. Our vision is to adapt and expand the methods to develop virtual user interfaces or digital twins to buildings for the whole lifetime, beginning from the design phase.

The method we developed can be used both for building design and infrastructure design (like city design). Design can also be crowdsourced and this way the users of the building can fit their process to the spatial design from the early stages of the project.

References

1. Selin, J.-P.: An action space defining object for computer aided design. Finnish Patent 125913 B, granted on 15 April 2016. Fourteen claims. Current owner. Xamk. Inventor, is the origin of the PCT patent application WO 2014/154942 A1(2016)
2. Selin, J.: An action space defining object for computer aided design. PCT patent application WO2014154942 (A1). Applicant Mikkeli University of Applied Sciences Ltd(2014)
3. Rossi, M.J., Bhargav, D.: Digitalization and quality enhancement initiatives in sw assisted design processes in building and construction in dustrie s. In: 9th International Conference on Computer Engineering and Applications, Dubai (2015). ISBN 978-1-61804-276-7
4. U. Lipsanen Oy Rakennusliike: A building information model of commercial center, saved in the IFC format. Construction Company U. Lipsanen Oy, Pieksiimiiki, Finland(2018)
5. Selin, J., Rossi, M.J.: Simulation of universal design by a functional design method and by gamification of building information modeling. In: 2016 Federated Conference on the Computer Science and Information Systems (FedCSIS), Gdansk , Poland. IEEE (2016). ISBN 178-8-3608-1090-3, ISBN 978-1-5090-0046-3
6. BuildingSMART International : The official website of the IFC-format (ISO 16739:2013). Accessed 18 Apr 2018. <http://www.building-smart-tech.org/specifications/ifc-releases>
7. The Open Source BIM Collective: The official website of the IfcOpenShell-project. Accessed 15 Apr 2018. <http://ifcopenshell.org/>
8. The National Research Council (CNR): The official website of the MeshLab software. Accessed 20 Apr 2018. <http://www.meshlab.net/>
9. Unity Inc.: The official website of the Unity game engine . Accessed 18 Apr 2018. <https://www.unity3d.com/>
10. Unity Inc.: The official website of Navigation System in Unity. Accessed 19 Apr 2018. <https://www.unity3d.com/Manual/nav-NavigationSystem.html>
11. Autodesk Inc.: The official website of the Autodesk 3DS MAX software. Accessed 16 Apr 2018. <http://www.autodesk.com/products/3ds-max/overview>
12. Trimble Inc.: The official website of the Sketch Up software. Accessed 16 Apr 2018. <https://www.sketchup.com>
13. Rakennustieto Oy. RT-kortisto. RTS 16:12. Ajoviivylit, hitaasti liikenni:itiviit. https://www.rakennustieto.fi/material/attachments/5f1PeDhrH/HMiOkjixB/Ajovaylat_hitaasti_liikenniivat_16_02.pdf. Accessed 22 Apr 2018
14. Tuomas, P., Jukka, M., Henry, W.: Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. Julkaisu. <http://www.vtt.fi/pdf/tiedotteet/2002/T2181.pdf>. ISBN 951-38-6114-7
15. Magnusson, S.-E., Frantzich, H., Harada, K.: Fire safety design based on calculations - Uncertainty analysis and safety verification. Lund University, Lund, SE (1995). 120 s. (Report 3078.) ISSN 1102-8246 k
16. Weckman, H.: Rakennuksista poistumisen laskennallinen arviointi. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 50 s. + liitt. 11 s. (VTT Tiedotteita - Meddelanden - Research Notes 1846) (1997). ISBN 951-38-5133-8 ISSN 1235--060



Julkaisu V

Letonsaari, M., & **Selin, J.** (2017). Modeling computational algorithms using nonlinear storytelling methods of computer game de-sign. *6th International Young Scientist Conference on Computational Science, YSC 2017, 01-03 November 2017, Kotka, Finland* (pp. 131-138). (Procedia Computer Science). Amsterdam: Elsevier Scientific Publ. Co. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.11.169>

Julkaisukanavan taso: **JUFO 1**

© Elsevier 2017, Reprinted with permission.



Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

Procedia Computer Science 119 (2017) 131–138

Procedia
Computer Science

www.elsevier.com/locate/procedia

6th International Young Scientists Conference in HPC and Simulation, YSC 2017,
1-3 November 2017, Kotka, Finland

Modeling computational algorithms using nonlinear storytelling methods of computer game design

Mika Letonsaari, Jukka Selin

South-Eastern Finland University of Applied Sciences, Patteristonkatu 3 D, 50100 Mikkeli, Finland

Abstract

Computational algorithms can be described in many methods and implemented in many languages. Here we present an approach using storytelling methods of computer game design in modeling some finite-state machine algorithms and applications requiring user interaction. An open source software Twine is used for the task. Interactive nonlinear stories created with Twine are applications that can be executed in a web browser. Storytelling approach provides an easy-to-understand view on computational algorithms allowing communication with people with no computer science education. It also allows rapid prototyping and testing in mixed background work teams.

© 2018 The Authors. Published by Elsevier B.V.

Peer-review under responsibility of the scientific committee of the 6th International Young Scientist conference in HPC and Simulation

Keywords: Twine; visual programming; rapid prototyping; algorithm design; digital storytelling

1. Introduction

Computer algorithms can be described in many methods such as flowcharts, pseudocode listings, state diagrams, illustrations, and universal modeling language (UML) models. While these models are understandable for those who have education in computer science, they can be too technical and unattractive for laymen.

Here we present an alternative way of presenting computational algorithms and computer programs using storytelling methods of computer game design. The method can also be used as a rapid prototyping tool as the model is an executable program.

Computer programs are sometimes depicted as stories in basic computer science education, especially for children and novices. The reason for this is twofold. Firstly humans are very good in understanding stories. Verbal stories

* Corresponding author. Tel.: +358-44-649-5186.

E-mail address: mika.letonsaari@xamk.fi

were the way to store and communicate information before the written language. This is made possible by the highly developed episodic memory of human brain.

Secondly, simple programming tasks implemented using procedural programming languages have a sequential structure that resembles much of natural language stories.

The relation of human language and computer programming is also evident from the viewpoint that computer programs are realizations of models in our minds. Alan J. Perlis writes in the forewords of the classic computer science textbook *Structure and Interpretation of Computer Programs* [1]:

Every computer program is a model, hatched in the mind, of a real or mental process. These processes, arising from human experience and thought, are huge in number, intricate in detail, and at any time only partially understood. They are modeled to our permanent satisfaction rarely by our computer programs.

And even though computer languages are very formal and their logic is strict in the mathematical sense, there is evidence that human brain understands programming tasks more like a linguistic task than a mathematical reasoning [2].

This close relationship of human language and programming can also be seen from how we speak about programming. For example we casually say that programs are written using language, not coded or created using formal syntax and logical rules of a certain system.

But there are also differences between computer programs and human storytelling. The main difference is that a story tells just a single linear chain of events. Contrary to that, computer algorithms are often characterized by conditional branching of the program execution flow. Traditional story can describe for example a sorting algorithm execution when a single predetermined list is given as an input. Or it can describe a single game of chess.

Whereas a computer program implementing a sorting algorithm can sort any list given to it. And it can use the input values given by players to realize any legal game of chess.

In this paper we will examine the use of storytelling as a method of describing computational algorithm and computer programs to provide an alternative approach to understanding computations.

2. Methods

In this article we study the relationship of computer game design principles and computational algorithms and computer programs. For this work we use an open source license software Twine originally developed by Chris Klimas [3]. Twine has a modern codebase and is developed in Node.js. It can be used in a web browser or as a standalone software.

Interactive nonlinear stories created with Twine are text based games playable in an internet browser. It provides a low learning curve approach into digital storytelling and simple application development. Twine has been used as a storytelling tool with children as young as ten years old [4].

Here we will describe how it compares to some of the relevant programming languages and describe its task domains. We will also describe the tasks used for evaluating the method including the reasoning for the selection requirements.

2.1. Programming language

There is no one correct solution for choosing a modeling language or a programming language. The choice depends on many things such as task domain, performance requirements, library compatibilities, language portability, and developers experience. In this research we aim to present an easy to understand method for understanding computer programs and computational algorithms.

The approach compares closely to many visual languages used in education, such as Scratch and Lego Mindstorms NXT-G, and in engineering and simulation, such as LabView and Simulink.

It is also related to hypertext based programming such as using hypertext markup language HTML with client side Javascript or server side programming such as PHP, Perl, Python or other common web programming languages and frameworks.

The nonlinear story writing software Twine used here is a very versatile software. Nonlinear stories generated with it can be exported in many formats. For example when creating a state of the art 3D game using one of the most popular game development software Unity 3D, Twine stories can be imported using UnityTwine plugin to be used in Unity 3D software [5, 6].

In Twine the stories are written as a hypertext flowchart in a very simple syntax. Links are marked in double brackets and new flowchart nodes are created and named automatically. A control language with many advanced features is used to control the story flow. The control language is somewhat similar to Javascript or PHP in HTML hypertext documents. In this article we use a minimal set of features of the control language, namely variables and conditional branching.

The selection of features is purposefully quite limited to maintain a low abstraction level. Features can seem limited if compared to other languages as most common procedural programming languages have often several sorts of looping structures (for, while, until, etc.), set of conditional branching of the program execution flow (if.. then.. else), and definition and calling of subroutines or functions.

But these features are of course not always necessary. For example loop instructions do not exist in machine languages of simple central processing units (CPUs) such as the MOS Technology 6502 [7]. Neither they exist as such in functional programming languages or in the fundamental universal Turing machine itself.

2.2. Computational models

Twine is first evaluated in implementing some finite-state machine (FSM) tasks. The finite-state machine is a theoretical model of computation where an abstract machine has a finite number of states and it can be in exactly one state at every moment. The change from one state to another (or back to itself) is called a transition.

FSM have limited computational capacity because it has no memory. In these tasks Twine can be used as a plain hypertext tool without variables and without using any programming control structures. This gives very easy to understand executable models.

Finite-state machines are used in simple automaton such as vending machines, elevators, traffic lights, and combination locks where they work as classified transducers, acceptors, classifiers, and sequencers [8]. Some memory can be simulated by creating more states, but this is not practical for complex applications.

More computationally powerful systems can be created by adding memory to the system. A single memory stack systems called pushdown automata can realize all context-free languages. Random access memory or two memory stacks allow system to simulate universal Turing machine and therefore all possible computer programs.

The standard way of proving Turing completeness of a system is to implement Turing machine or other system already known to be Turing complete with a given system. Turing completeness of Twine is not proved here but can be expected to hold when the default story format Harlowe with arrays, allowing random access memory, is used.[9]

Instead of that, some application examples are presented as an example of how Twine can be used. Twine is most useful in interactive applications and tasks requiring user interaction, such as human computer interfaces, control systems and games.

3. Results

Some sample applications and results in implementing them in Twine are presented here. A turnstile machine is a simple example of a finite-state machine. An implementation of 99 Bottles of Beer song is used for presenting a control structure of a program. Prisoner's Dilemma is used as an example of a slightly more complex problem.

3.1. Finite-state machine models

A turnstile (Figure 1, left) is a simple device which can be modeled as a finite-state machine [10]. At the starting position the gate of the machine is locked. If a coin is inserted into the machine (or keycard shown, or other form of opening signal is given), the gate opens. When the gate is used to enter, it lets one person to pass and then locks again.

The principle of the operation of a turnstile can be described using a state diagram presented in Figure 1 (right). It can be easily seen that this operation can be implemented by using bare hypertext markup language such as HTML as a state machine. For this first example we present HTML language code for comparison.

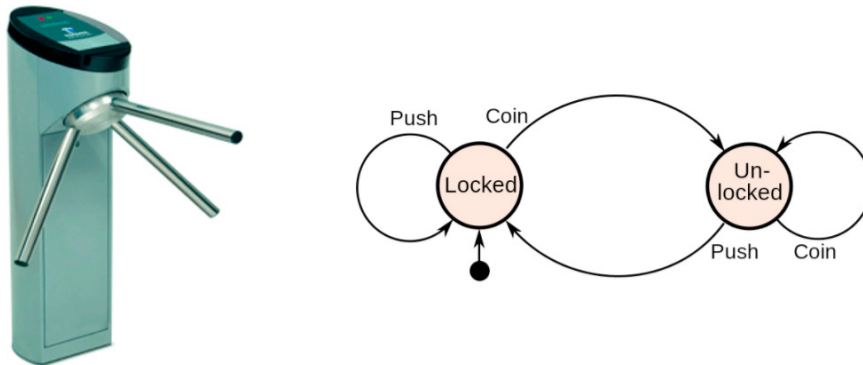


Fig. 1. Left: A turnstile machine (by Wikimedia Commons user Sebasgui, GFDL). Right: State diagram for a turnstile machine (by Wikimedia Commons user Chetvorno, CC0)

Listing 1. closed.html

```

<!DOCTYPE html>
<html lang="en">
<head>
<title>Closed </title>
</head>
<body>
<a href="open.html">Insert a coin </a><br/>
<a href="closed.html">Push </a><br/>
</body>
</html>
  
```

Listing 2. open.html

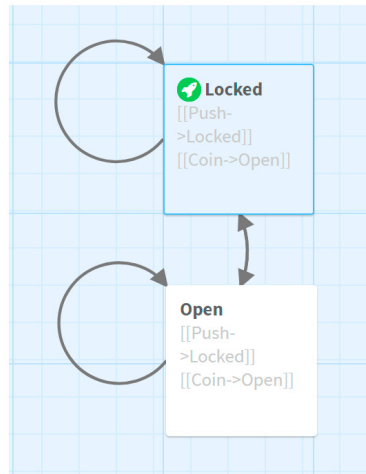
```

<!DOCTYPE html>
<html lang="en">
<head>
<title>Closed </title>
</head>
<body>
<a href="open.html">Insert a coin </a><br/>
<a href="closed.html">Push </a><br/>
</body>
</html>
  
```

The turnstile implemented in Twine is presented in Figure 2. Compared to HTML code we can see that the code in HTML is more verbose as it is designed for more general use cases. Especially if we write valid HTML document as described in standards, document type, head section, title, and closing tags are required even if not necessary for providing a result that works in most web browsers.

Twine is thus directed more for this kind of applications. Twine also provides a graphical presentation of the structure of the code or story which makes its use easy in this kind of application.

For a more complex example of using FSM, let us consider parsing for a legal numbers character by character. This task, commonly presented as a railroad diagram, is implemented in Twine in Figure 3. A number can start with a zero, a minus sign or a nonzero digit. For example, if the number starts with a zero, it must end or continue with a decimal dot. After decimal dot there must be at least one digit before the end.



Listing 3: locked

```
[[ Push->Locked ]]  
[[ Coin->Open ]]
```

Listing 4: open

```
[[ Push->Locked ]]  
[[ Coin->Open ]]
```

Fig. 2. A turnstile machine implemented in Twine

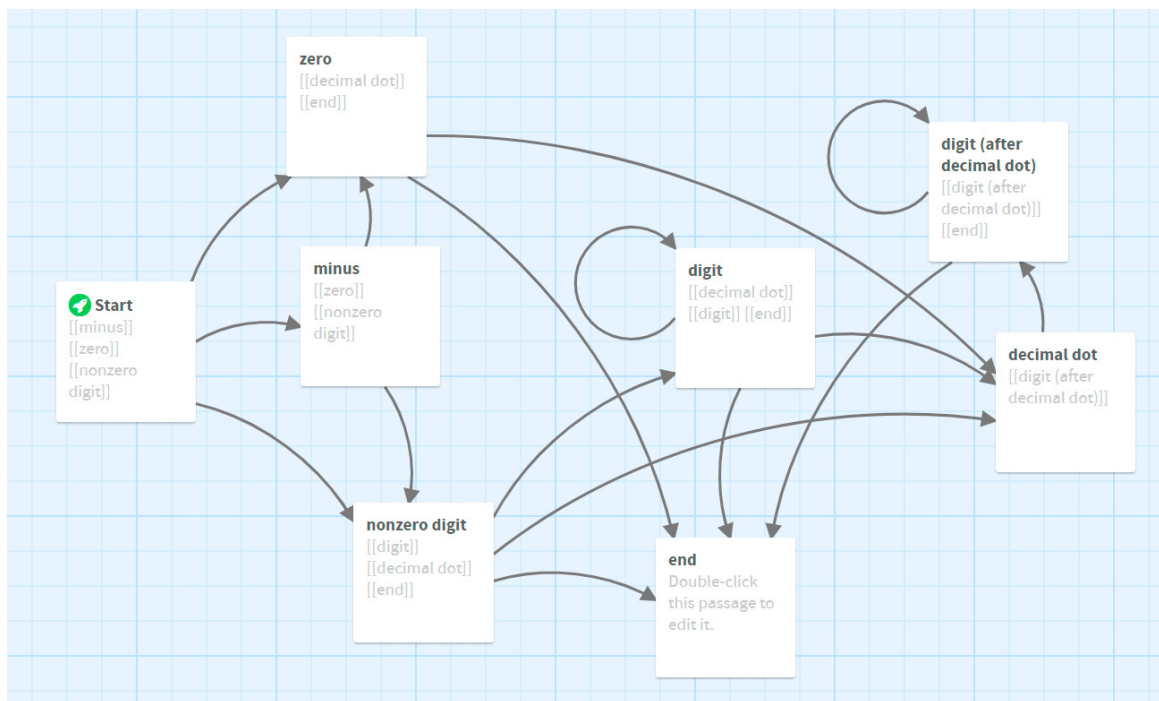


Fig. 3. Parser for legal numbers implemented in Twine

3.2. Example application implementation: 99 Bottles of Beer

As explained earlier, only basic features of the control language of Twine are used in these examples to maintain a low level of abstraction. A classic programming exercise is to implement the 99 Bottles of Beer song. This presents looping backwards from 99 to 0 and it is especially relevant here as we do not use built-in looping structures.

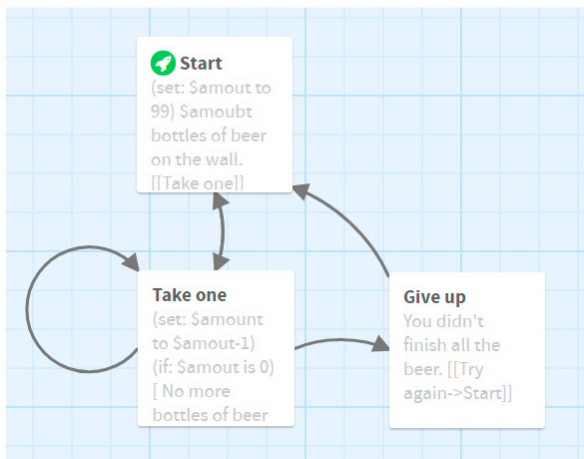


Fig. 4. "99 Bottles of Beer" implemented as an interactive game in Twine

Listing 5: Start

```
(set: $amount to 99)

$amount bottles of beer on the wall.

[[Take one]]

[[Take one]]
```

Listing 6: Take one

```
(set: $amount to $amount-1)

(if: $amount is 0)[
  No more bottles of beer on the wall.

  [[Go to the store and buy some more.->Start]]
](else:)[
  $amount bottles of beer on the wall.

  [[Take one]]
  [[Give up]]
]
```

Listing 7: Give up

```
You didn't finish all the beer.

[[Try again->Start]]
```

For a review of the problem, see <http://www.99-bottles-of-beer.net/> where the song lyrics are presented in over 1500 programming languages. The complexity aspects of the song in computer programming point of view are discussed by Knuth [11].

We implement an advanced version of the task in Twine where user can control the story and either keep taking bottles or quit the song at will. If the song is aborted, user can start it again. The implementation is shown in Figure 4 and listings 5-7.

3.3. Example application implementation: Prisoner's dilemma

As a final application example, let us consider the famous Prisoner's dilemma of game theory. The Prisoner's Dilemma is very widely studied in the mathematics of economy and many variations of it exist of course. We use here the original formulation of the problem.[12]

Two prisoners, A and B, can either stay silent or betray their partner. If both stay silent, they are given a small penalty, worth -1. If both betray each others, they are each given bigger penalties worth -2. But if another stays silent and the other betrays, the one who betrays get away without any penalty, and the one who got betrayed get a large penalty worth -3. The payoff matrix is show in Figure 5.

	B	B stays silent	B betrays
A			
A stays silent		-1	0
A betrays		-3	-2

Fig. 5. The payoff matrix of Prisoner's Dilemma

The implementation of the Prisoner’s Dilemma in Twine is presented in Figure 6. In graphical programming the code is divided into blocks. Code listings are available at author’s website and not presented here in detail.

What we can see from the graphical presentation is that the structure of the program is rather easily seen. From the Begin block there are two arrows, one to Silent and another to Betray. From these blocks there are again two arrows corresponding to the choice of the other player. And then the next round is played starting from the Begin block.

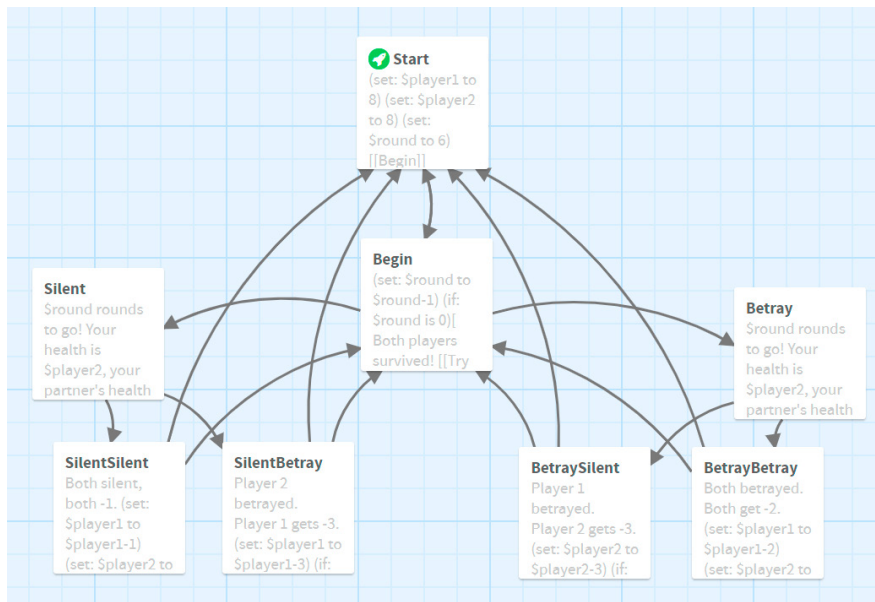


Fig. 6. Twine implementation of Prisoner’s Dilemma

Here the graphical presentation is chosen so that it is compact in size and arrows do not cross blocks on their way. The presentation can be chosen by other criteria as well of course. In Figure 7 the structure of the graphical presentation is chosen to resemble the payoff matrix show in Figure 5. This might be a useful property for some application although the complexity of the program doesn’t probably justify the use in most cases.

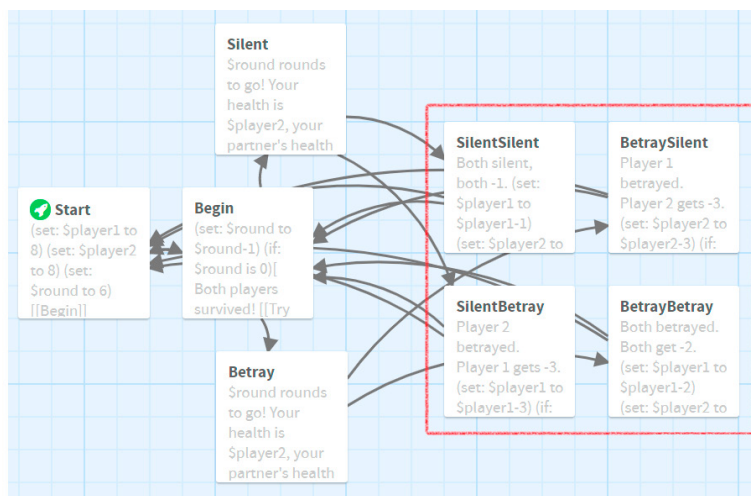


Fig. 7. The structure of the graphical presentation of the program set up to represent the payoff matrix (compare to Figure 5)

4. Conclusions

There is always a need to communicate about the ideas of computer science with people outside the field. For this purpose many simplified and often visual tools are used. In this paper a game design inspired method was presented.

Twine is most natural with simple applications such as finite-state machine implementations or interactive applications with simple logic. While its capabilities can be extended by using more complex features such as Javascript scripting, its main strength is in simplicity.

Martin Fowler, the author of UML Distilled textbook, describes three modes or uses of UML models. Models can be used as a sketch of an idea, where they are used to communicate and work out ideas. Models can be used as blueprints where the main idea is to check that the idea is complete and possible to realize. The third use is to use models as a programming language. This requires model to be complete enough to allow translation to executable code.[13]

These three modes can be recognized in Twine applications as well. The structure of the program can be sketched first. Its completeness can be checked so that there are no dead links in the visual graph. Details needed in the programming can be added in the same sketch and blueprint model. This creates an easy to use work flow.

The storytelling aspect of Twine software is shown in the structure of programs. They resemble web programming where interactive content is produced in the form of hypertext documents. They also resemble early procedural programming such as Basic language where user interface was created with print and input commands and code branching was done with Goto commands [14].

This paper demonstrated basic use of game development software in basic programming and rapid prototyping tasks. Authors have already used the nonlinear storytelling method as a tool for allowing people with very low computer skills to co-operate with computer game development

Future work will include research on using Twine as a tool for multidisciplinary teams to communicate structured ideas and work processes in non-information technology related fields. There will also be research on cognitive and pedagogical aspects of nonlinear storytelling in learning computational thinking.

References

- [1] Harold Abelson, Gerald Jay Sussman, and Julie Sussman. *Structure and interpretation of computer programs*. Justin Kelly, 1996.
- [2] Janet Siegmund, Christian Kästner, Sven Apel, Chris Parnin, Anja Bethmann, Thomas Leich, Gunter Saake, and André Brechmann. Understanding understanding source code with functional magnetic resonance imaging. In *Proceedings of the 36th International Conference on Software Engineering*, pages 378–389. ACM, 2014.
- [3] Twine is an open-source tool for telling interactive, nonlinear stories. url: <http://twinery.org/>. Accessed 2017-07-28.
- [4] Kelly M Tran. her story was complex: A twine workshop for ten-to twelve-year-old girls. *E-Learning and Digital Media*, 13(5-6):212–226, 2016.
- [5] Joonas Korhonen et al. Pelisuunnittelu ja pelin ensimmäisen prototyypin toteuttaminen. 2016.
- [6] Mika Letonsaari, Jukka Selin, and Mikko Lampi. Co-creative serious games design process using nonlinear storyline editing. In *Proceedings of the 9th International Conference on Computer Supported Education*, pages 582–588, 2017.
- [7] Inc. MOS Technology. 6501-6505 microprocessors, 1975. url: http://archive.6502.org/datasheets/mos.6501-6505-mpu_preliminary_aug_1975.pdf. Accessed: 2017-7-28.
- [8] Robert M Keller. Computer science: Abstraction to implementation. *Harvey Mudd College, Claremont, CA, United States*, 2001.
- [9] Leon Arnott. Harlowe 2.0.1 manual, 2017. url: <https://twine2.neocities.org/>. Accessed: 2017-7-28.
- [10] David R Wright. Finite state machines. *Carolina State University*, page 203, 2005.
- [11] Donald E Knuth. The complexity of songs. *Communications of the ACM*, 27(4):344–346, 1984.
- [12] Robert J Aumarm. Acceptable points in general cooperative n-person games. In *Contributions to the Theory of Games (AM-40)*, 4:pp. 287–324., 1959.
- [13] Martin Fowler. Uml mode, 2003. url: <http://www.martinfowler.com/bliki>. Accessed: 2017-7-28.
- [14] A Pal. Print 64: a user's guide to the commodore 64, 1988.



Julkaisu VI

Letonsaari, M., & **Selin, J.** (2018). Social Media Integration with Nonlinear Educational Storytelling Application. In *2018 17th International Conference on Information Technology Based Higher Education and Training (ITHET)* Danvers, MA: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ITHET.2018.8424793>

Julkaisukanavan taso: **JUFO 1**

© IEEE 2018, Reprinted with permission.

Social Media Integration with Nonlinear Educational Storytelling Application

Mika Letonsaari and Jukka Selin
South-Eastern Finland University of Applied Sciences
Mikkeli, Finland
Email: mika.letonsaari@xamk.fi

Abstract—An educational computer game was created in a research project where new teaching methods for information technology were developed. The game development project was a co-creative process involving both skilled information technology students and students with low information technology skills. Students with low information technology skills participated in the game development by writing gamified nonlinear stories that were integrated into the 3d game. Nonlinear stories are special type of stories where hyperlinks are used to connect parts of the story. Special software is often used to write nonlinear stories to make hyperlinking easier and to enable organizing the storyline structure. Here we use an open source storytelling software Twine. Nonlinear stories written with Twine were collected in a pilot study. These stories and the process of writing nonlinear stories were analyzed. It was noted that the software is more suitable for single users than collaborative work. Lack of easy-to-use options for sharing and remixing stories and difficulty in collaboration in story writing affected negatively to classroom activities. Social media integration tool for the story writing tool were designed and implemented to improve the potential for classroom adoption. Possible future use of the method is discussed.

I. INTRODUCTION

Digital storytelling is a popular educational method. It is a highly constructivist method as students use their content knowledge to develop a new understanding of the subject matter. Digital technology is used in a relevant, goal-oriented way to create stories. This creates motivation and engagement in learning.

Most stories used in education are linear. These stories tell one story and the reader of the story cannot affect the story. In contrast to these traditional stories, computer games often have non-linear plots. In our earlier research, an educational 3d game was developed [1]. Students with low information technology skills participated in the game creation by writing non-linear plots and narratives using an open source software Twine (twinery.org).

In this article, we describe how nonlinear storytelling has been used in collaborative game development. Game development is a form of digital storytelling where the theme of the game is about the subject matter or closely related to the subject matter. The nonlinear nature of the story enforces more detailed processing of the subject matter and requires careful consideration of several points of view.

Readily available tools for non-linear storytelling lack social media integration. The pedagogical reasoning for the need of sharing and remixing abilities are discussed. These functions

are implemented in an open source storytelling tool Twine. Practical aspects of social media integration are reviewed from the point of view of educational applications.

II. NON-LINEAR STORYTELLING

Nonlinear storytelling is a specific form of storytelling where story is not linear but can have branches. An example of a traditional linear storyline is presented in Figure 1. There is a certain fixed sequence of events in the story and the reader or the player cannot affect the order of events.

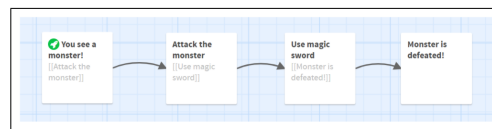


Fig. 1. A traditional linear story

An example of a nonlinear story is presented in Figure 2. The storyline has branches and forms a flowchart-like structure. The player can choose how the story goes.

Stories with nonlinear structure are often found in gamified stories and they are sometimes called interactive stories, or multiple choice games.

For the creator, nonlinearity requires a deeper understanding of the possible interactions. From the pedagogical point of view, this may have positive effect as student need to carefully consider different points of view.

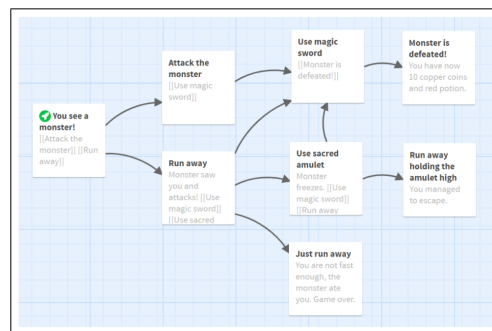


Fig. 2. An example of a nonlinear story

A. Tools for Nonlinear Storytelling

Nonlinear stories can be categorized as hypertext documents with document linking. As such the general Hypertext Markup Language (HTML) can be used for creating nonlinear stories. But using HTML language requires understanding the concept of a file system and skills in handling files. For students with low information technology skills, this is not viable.

Often nonlinear stories are created in specialized game-development software. These software usually have limitations in generalization as possibilities of uses is limited by specialization.

In this research, we use an open source nonlinear storytelling software Twine. Twine is a simple software for generating linked hypertext stories. The software can be used in any modern web browser. Stories are stored internally in the browser and no file handling is needed in the basic usage. The story structure is presented visually in a flowchart format. Finally, interactive stories can be tried out or played at any time. The software is very easy to use. It has been used in workshops for children between 10 to 12 years old [2].

In this project, an important required feature was the possibility of integration with Unity game development engine. For this purpose, stories generated with Twine software can be imported to Unity using Cradle (github.com/daterre/Cradle) tools, formerly known as UnityTwine plugin.

Another tool for good integration with Unity is Fungus (fungusgames.com). For this project, we preferred Twine, because it can be used with any modern web browser. In comparison, Fungus software is integrated into Unity and requires installing the whole Unity game development engine.

For a short history and review of other software used for nonlinear storytelling, see Vaneseltine [3]. Notice that terminology differs depending on the context. Nonlinear story is sometimes used synonymously to interactive fiction (IF) [3] or multiple-choice games (MSG) [4].

It should also be taken into account that nonlinearity has a different definition in literature and film studies compared to the definition presented here. In literature and film studies nonlinearity refers only to the presentation of events in a nonchronological order [5].

B. Co-creative game development

In this research, an educational computer game was created using a professional game development engine Unity. The game development project in this research was part of an educational course to enhance participants general working life competencies and especially to teach basic information technology skills.

The technical side of the game development was realized by information technology students who had taken computer game programming course at the university. They were fluent with Unity game programming and familiar with 3d modeling needed in creating a 3d game world for the game. A screenshot of the game is shown in Figure 3. The game is an open world game where player avatar can explore the game world and find educational tasks and carry out educational activities.



Fig. 3. A screenshot from the 3d game world

In addition to information technology students, we wanted students with very low information technology skills to have meaningful ways to participate in the game development process.

In many games, even with high-end AAA games, the storyline plot branching happens using multiple choice options provided to the player. We decided to let low information technology skilled people to participate by writing subplots to the story. These subplots are often dialogues such as presented in the Figure 4. Dialogues written with Twine can be imported automatically to Unity game development engine. Some design work and programming is still required to integrate stories into the game.

The subject of the stories was dialogues in working life situations and general human interaction. These stories written by many people with different writing styles enrich and provide depth to the game world by expressing experiences and views of a variety of people.

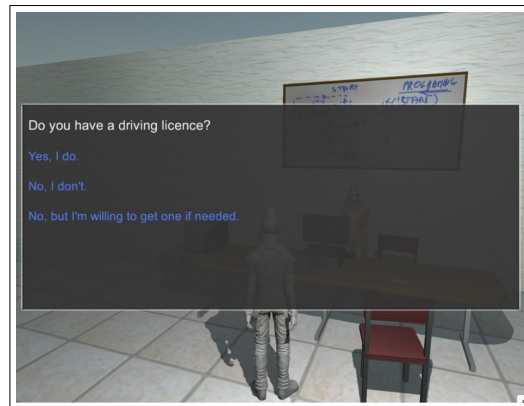


Fig. 4. A dialogue created using nonlinear storytelling tool and integrated into the game

C. Results from Pilot Study

Three groups of students studying basic information technology skills were introduced with nonlinear storytelling using

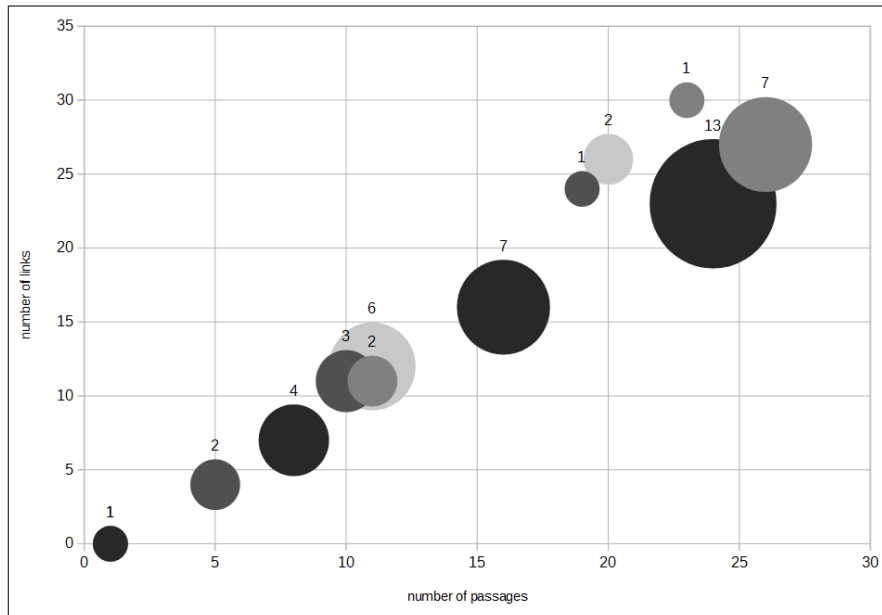


Fig. 5. The number of passages in a story versus the number of links between passages. Size of a bubble represents the number of alternative endings of the story, ranging from 1 to 13. Gray scale colors are used only to make bubbles visually distinctive in the graph.

Twine storytelling software. An introduction class of about one hour was used to learn the basic usage of the software. Only the use of passage linking was used, no advanced macro features were presented to students.

After the introduction, students were asked to write a story related to working life situations or social everyday situations. Stories were written not only during the training, but students could continue working on them at home. Stories were created with an online version of Twine software so only a web browser was needed to work with stories.

Submitting stories for the game project was voluntary with no extra study credit. Fourteen stories (n = 14) were submitted by students.

Stories consist of passages linked by hyperlinks. The number of passages versus the number of hyperlinks of submitted stories is presented in Figure 5 as a bubble graph.

The size of a bubble presents the number of possible endings in the story. For example story with two possible endings, success and failure, has a bubble of size two. Size one means that story ends always in the same way, for example, the customer can leave the shop. The most complex story has 13 different endings. This is a story where the player can choose what kind of leisure time activity they would like to do.

Three stories have only one passage, no hyperlinks and thus only one ending by definition. These stories have problems in hyperlink syntax usage and storyline structure is therefore not correctly built.

The color of the bubble has no meaning other than to make bubbles visually distinctive from each other.

As can be seen, there is a high correlation between the number of passages and the number of links used in the story. On the other hand, the number of endings does not have a strong correlation on the number of passages.

In general, stories can have a highly branching and low depth storyline, such as presented in Figure 6, or low branching and high depth storyline, such as presented in Figure 7. The story presented in Figure 6 has 23 passages, 30 hyperlinks between passages and only one possible end. Passages to hyperlinks ratio is 0.77. The story presented in Figure 7 has 26 passages, 27 links and 7 possible endings (only the beginning of the story is presented in the figure). Passages to hyperlinks ratio is 0.96.

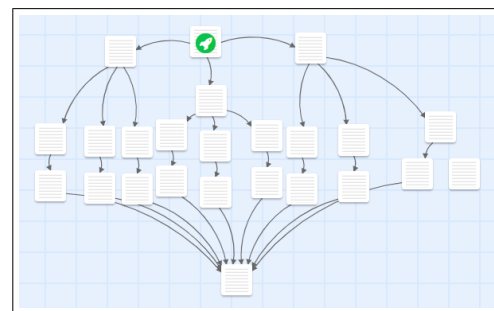


Fig. 6. An example of highly branching story

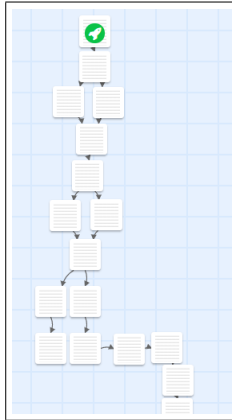


Fig. 7. An example of a story with low branching

III. CO-CREATIVE STORY WRITING

In the pilot study story writing was an individual task. Students were allowed to talk to each other and ask for help or ideas, but each student had their own computer and story to work with.

Here we discuss why co-creative learning should be encouraged and how we have integrated social media into the storytelling software.

A. Sharing and Remixing in Education

Sharing, remixing and collaboration are fundamental features in digital storytelling [6]. Sharing expands the learning into a social effort and creates a learning community. Remixing is a form of collaboration where new content is created by utilizing existing works [7].

Liu et. al [8] have compared linear and non-linear storytelling in collaborative educational tasks. They propose a four-step pedagogical framework for Web 2.0 storytelling. The framework has roots in the Creativity Support Tools presented by Shneiderman [9]. Shneiderman underlines collaboration and open interchange in work aimed at utilizing creative thinking.

The framework proposed by Liu et. al emphasizes sharing ideas, remixing work during the process and publishing finished work publicly for comments and feedback [8]. They construct their research on concepts of derivation, remixing, story ownership, and positive independence. These qualities measure especially the motivation and engagement in the task. In all categories, nonlinear storytelling displayed positive outcome compared to linear stories.

B. Implementation of Social Media Integration

In this research project, open source storytelling application Twine was used. The standard method of sharing stories in Twine is to save stories in HTML files. Files can be shared by hosting them on a web server or sending them as email attachments. People who have low information technology

TABLE I
COMPARISON OF ORIGINAL AND MODIFIED STORYTELLING SOFTWARE

	Original	Modified
Saving a story	Download HTML file	Save to cloud server
Sharing a story	Send HTML file as email attachment	Share link to the hosted story in cloud server
Remixing a story	Upload HTML file	Edit hosted story

skills do not often have experience with handling files. The concept of a file can be abstract and understanding file system and file operations is a complex task. Therefore we wanted a simpler way for collaboration.

We implemented a direct sharing and remixing via social media in our customized version of Twine software. Stories are automatically hosted on the server when sharing option is selected. The Internet address of the hosted story can be shared manually by copying the Internet address or automatically via common social media services.

Simple sharing add-on is shown in Figure 8. In the story list view, a new option Share is added. Using the share function the story is saved in a cloud server to be hosted. Sharing the story then reduces to sharing the hosted link address.

Support for remixing of shared stories was implemented by creating a direct method of opening shared stories in edit mode of the software. See Table I for comparison of steps needed to share and remix stories in the original and the customized versions of the software.

In the table it should be noted that Twine saves the story automatically to the web browser memory. The saving of the story mentioned in the table refers to saving the story outside the browser.

These modifications make sharing stories and remixing stories much easier. Sharing can be used for sequential collaboration. But these modifications do not allow real-time collaboration. This maybe implemented later.

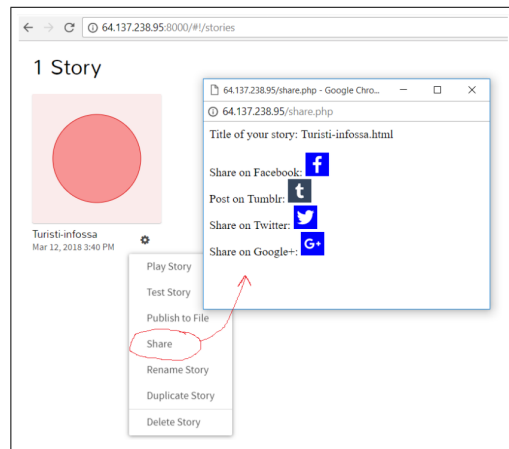


Fig. 8. A screenshot of the customized version of Twine storytelling software with social media sharing functionality

IV. CONCLUSIONS

In this pilot study, a nonlinear storytelling software and a process for co-creating game were studied.

The assignment for creating stories was not specified strictly but was a more open-ended task. This shows in the resulting stories in that they have a large variety in the number of passages included in the stories, as well as in a diverse selection of story structures provided.

This freedom was intentional and part of our research to survey the possibilities of storytelling. Some of the stories were included in our educational 3d game world. If the target was to implement all stories in the game, a more guided process of story writing should be realized to distribute topics story plots to match the requirements of the game world.

In this pilot study, the official version of the storytelling software was used. The software saves stories automatically to the memory of web browser. Taking a backup or sharing the story requires downloading an HTML file which is not a trivial task for students with very low information technology skills. Sharing a story requires sending the HTML file for example as an email attachment. Remixing stories requires uploading the received HTML file.

File handling can be seen as a basic information technology skill, but it can cause a threshold for software adoption for people who are not used to handling files and file systems. It is likely that skills and understanding regarding file systems may stay low as mobile services and improving networks allow using cloud services more and more.

For this purpose, and to enable pedagogically important working methods involving sharing, remixing and collaboration, social media integration was developed and implemented into the storytelling software.

In the implementation, stories are stored in a cloud server operated by us. This requires maintenance and administrative tasks but is a necessary compromise to enable the functional properties needed.

In our implementation of social media integration, sharing and remixing of stories were realized. On the other hand solutions for collaborative or co-creative story writing were not investigated or solved.

Remixing provides a sequential method for collaborative writing but technologically real-time solutions for collaboration are possible. These will be researched in more detail later.

From the pedagogical point of view, we have studied how the structure of nonlinear stories resembles computer algorithms, especially finite state machines [10]. This may enable learning computational thinking skills related to computer programming.

In this study only basic hyperlinking functionality of Twine was used. Twine, as well as most of the other nonlinear storytelling tools, have also the possibility of using more abstract control structures such as variables and conditional branching. These features are not needed for nonlinear storytelling, but can be utilized in gamification and in learning computational thinking skills.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by European Union Regional Development Fund and the Leverage from the EU 2014-2020 programme.

REFERENCES

- [1] Letonsaari, M., Selin, J., Lampi, M. 2017. Co-creative serious games design process using nonlinear storyline editing. Proceedings of the 9th International Conference on Computer Supported Education. Porto, Portugal: SciTePress, Vol. Volume 1, p. 582-588 7 p.
- [2] Tran, K.M., 2016. Her story was complex: A Twine workshop for ten-to twelve-year-old girls. *E-Learning and Digital Media*, 13(5-6), pp.212-226.
- [3] Vaneseltine, C., 2017. When to Write Your Own Interactive Fiction Engine. Sibyl Moon Games blog, <https://www.sibylmoon.com/when-to-write-your-own-interactive-fiction-engine/>. Visited 4/9/2018.
- [4] Introduction to ChoiceScript. Choice of Games. <https://www.choiceofgames.com/make-your-own-games/choicescript-intro/>. Visited 4/9/2018.
- [5] Morgan, K. 2017. The Literary Term 'Nonlinear Narrative'. Visited 8/3/2017. <http://penandthepad.com/literary-term-nonlinear-narrative-1816.html>
- [6] Di Blas, N., Paolini, P. and Sabiescu, A.G., 2012. Collective digital storytelling at school: a whole-class interaction. *International Journal of Arts and Technology*, 5(2-4), pp.271-292.
- [7] Lamb, B., 2007. Dr. Mashup or, Why Educators Should Learn to Stop Worrying and Love the Remix. *Educause review*, 42(4), p.13.
- [8] Liu, C.C., Liu, K.P., Chen, G.D. and Liu, B.J., 2010. Children's collaborative storytelling with linear and nonlinear approaches. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2(2), pp.4787-4792.
- [9] Shneiderman, B., Fischer, G., Czerwinski, M., Resnick, M., Myers, B., Candy, L., Edmonds, E., Eisenberg, M., Giaccardi, E., Hewett, T. and Jennings, P., 2006. Creativity support tools: Report from a US National Science Foundation sponsored workshop. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 20(2), pp.61-77.
- [10] Letonsaari, M. and Selin, J., 2017. Modeling computational algorithms using nonlinear storytelling methods of computer game design. *Procedia Computer Science*, 119, pp.131-138.





Julkaisu VII

Letonsaari, M., & Selin, J. (2019). Nonlinear storytelling method for interdisciplinary and cross expertise-level communication of knowledge. *International Conference on Interdisciplinarity of Knowledge, Education and Research, IKER 2019, At Pilani, India.*

Julkaisukanavan taso: **JUFO 0**

© IKER 2019, Reprinted with permission.

Nonlinear storytelling method for interdisciplinary and cross expertise-level communication of knowledge

Mika Letonsaari ^(a,b), Jukka Selin ^(a)

^(a) South-Eastern Finland University of Applied Sciences (XAMK), Mikkeli, Finland

^(b) University of Helsinki, Faculty of Educational Sciences, Helsinki, Finland

Abstract:

People transfer knowledge by communicating. Communicating information is not always a simple task because people have different frames of references. This is especially true with interdisciplinary projects and projects where participants of different expertise-level need to communicate. We have experimented with the use of nonlinear storytelling in our research projects to solve the barriers of communication. Nonlinearity in storytelling means that story has a branching storyline which enables gamification of the story. This makes nonlinear storytelling fundamentally different from traditional linear storytelling. In this article, we report our experience of using the nonlinear storytelling method from the viewpoint of challenges in interdisciplinary and cross expertise-level communication. We review our experiences of our earlier project where information technology students cooperated with other participants with low information technology skills using nonlinear storytelling method in serious game development. We find that nonlinearity, gamification and the usability of tools promote all for an intuitive approach to the deeper processing of the subject matter and enable a good basis for communicating complex ideas. The first pilot study of our current research project is presented. In the study, first-year upper secondary education vocational college students were given an introductory course on computer science concepts, computational thinking skills, and basic computer programming. Nonlinear storytelling was used as a tool for communicating these topics. The study was a small-scale feasibility study for a single class of 12 students ($n = 12$). Feasibility of the method was assessed with a questionnaire of situational interest and self-evaluation. Students' assessment for the interest, meaningfulness, and learning development was good (average 3.72 to 4.0 on scale 1 to 5).

Keywords: storytelling, communication, computational thinking, nonlinearity.

1. Introduction

People transfer knowledge by communicating. But communicating information is not always a simple task because people have different frames of references. In education, the background of students can vary a lot. Students may have completed preliminary courses with varying success. Students may come from families where they have already learned relevant skills and trades. Some may have participated in instructive hobbies which can help them to learn advanced topics.

In our earlier project *Competent Workers for the Digitalizing Work*, a serious game was developed. The technical development of the game was executed by information technology students who had studied 3d modeling and computer game development. Unity 3d game development environment was used to create a modern high-quality game. Technical details of the project are given in our earlier article. (Letonsaari et al., 2017)

In addition to information technology students, people with no information technology training participated in the project. These people contributed by creating subject matter content of working life practices to the game. The question was how to enable structured communication of information technology professionals and people with no information technology experience but expertise from other fields.

The analysis of this project revealed some interesting properties of nonlinear storytelling method in communicating ideas:

- Nonlinearity encourages and even forces in deeper processing of the subject matter. Possibilities and options of the idea must be explored and reasoned. This has a close resemblance to using XML use cases in creating software requirements specifications. (Schneider et al., 2001) But arguably nonlinear storytelling approach is more intuitive.
- Gamification, including rapid development and low threshold testing ability, make the task more interesting and can create meaningfulness for the process. The reason for this is interactivity and social aspect of gaming. (Eklund, 2012)
- The storytelling software used in the project gives a good combination of freedom to create complex stories and tools for controlling complexity.

These positive experiences in interdisciplinary co-creation and cooperation in this project provided us with a rationale to develop the method beyond the scope of this single project.

In this research, we report a pilot study where computer science concepts, computational thinking skills, and basic computer programming is introduced to students without previous knowledge in programming. Nonlinear storytelling method is used to communicate these ideas to students during a short course.

2. Review of Literature

The storytelling method presented in this paper utilizes a serious form of storytelling. Lugmayr et al. define serious storytelling as “Storytelling outside the context of entertainment, where the narration progresses as a sequence of patterns impressive in quality, relates to a serious context, and is a matter of thoughtful process.” (Lugmayr et al., 2017)

As a learning method, storytelling is a highly constructivist method (Yang et al. 2012). Storytelling has many positive cognitive, social, and emotional benefits including improvement in language skills, concentration, imagination, comprehension, and critical thinking (Boltman 2001, pp. 17-19).

Nonlinear storytelling is the form of storytelling where the storyline is not linear but has branches (Liu et al., 2010). There are not many studies on serious nonlinear storytelling. Liu et al. presented a computer system for interactive nonlinear storytelling and compared it to linear storytelling. The performance was measured in four factors: derivation, remix, ownership, and positive interdependence. In all four factors, the nonlinear group performed superior to the linear group. (Liu et al. 2010)

There is much literature for building and transferring knowledge between actors in different contexts such as business organizations, professional practices, and education. In the context of interdisciplinary and cross expertise-level communication, Carlile has an integrative framework for managing knowledge across boundaries. According to the framework, knowledge may be transferred between boundaries directly, or it may need a translation or a transformation if a direct transfer is not possible (Carlile, 2004). This framework is discussed later.

The process is assessed by situational interest questionnaire as described by Tapola et al. (Tapola et al., 2013). Situational interest is considered an influential property in affective engagement and learning. It should be contrasted with personal interest which is less spontaneous and less context-specific than situational interest (Schraw et al., 2001). In this study, the assessment is done using a questionnaire after every lesson. Modern technology allows more continuous methods of measurement such as presented by Loukomies et al. (Loukomies et al., 2015) but due to practical reasons, these were not utilized in this research.

3. Methodology

A short course for teaching introductory computer science concepts, computational thinking skills, and basic computer programming was given to first-year vocational college students in Eastern Finland.

First, the sample is described in more detail. Students were given a questionnaire to examine their background knowledge of the subject matter. Results of the questionnaire are presented and rationale for the questions is explained.

Secondly, the procedure of the main study process is described. The study uses a customized software that is described. Performance is measured using a situational interest questionnaire that is based on research literature.

3.1. Sample

A single class of first-year business information technology students at a vocational college participated in this study. This short course was implemented as a part of their introduction to information technology in the very beginning of their studies. Participation was voluntary for students. This is required by the code of ethics in academic research (Finnish Advisory Board, 2012). Not everybody in the class participated in this study. The number of students participating in the study was twelve ($n = 12$).

A questionnaire was presented to participating students to assess their background knowledge in information technology and technologies relevant to this study. Results of the questionnaire are presented in Table 1.

First three questions were about some common modeling languages. HTML (Hypertext Modeling Language) was most familiar to students, but still, one third did not recognize the abbreviation, and one third had never tried writing HTML by themselves. XML (Extensible Markup Language) and UML (Universal Modeling Language) were unknown to almost all students which is understandable. This reveals that students did not have advanced programming hobbies since both are common techniques in software engineering.

Table 1. Background knowledge of participating students.

	not familiar	recognize	have tried	have used	knows well
HTML	33%	33%	17%	17%	0%
XML	83%	17%	0%	0%	0%
UML	92%	8%	0%	0%	0%
Scratch	75%	8%	0%	8%	8%
programming	25%	33%	42%	0%	0%
spreadsheet	8%	25%	25%	42%	0%
drawing software	8%	17%	17%	50%	8%
sound editing	25%	33%	25%	17%	0%
video editing	27%	27%	9%	27%	9%
3d modelling	25%	42%	33%	0%	0%
Arduino	92%	0%	0%	8%	0%

The relevance of modeling languages to this study is that they are used for representing hyperdocuments, linked data, and abstract data structures. In this research, we aim to teach the creation of nonlinear stories and make them intuitive for students. This is expected to make learning modeling languages and other abstract concepts an easier task. Therefore students with no previous knowledge of modeling languages are the target group for the study.

Programming knowledge was inquired directly and by mentioning the programming language name Scratch. Scratch is often used in elementary school education but 75 percent did not recognize the programming language. One-quarter of students were not familiar with computer programming and 42 percent of students told they had tried programming. No one answered that they had used programming (indicating more than trying) or that they know programming well. This is a bit conflicting with the fact that 8 percent said they had used Scratch and 8 percent said they knew Scratch well. This could be misunderstanding, for example confusing the name Scratch with something else than the programming language.

Next, some categories of computer application were asked. Spreadsheet software was tried or used by 67 percent of students, drawing software by also 67 percent, sound editing software by 42 percent, video editing by 36 percent and 3d modeling by 33 percent. Using these questions we wanted to map the skill profile taught at earlier levels of education. Before formal information technology education, it depends much on the interests of their individual teachers on what kind skills are emphasized.

Lastly, the robot used in the short course is based on Arduino electronics. Arduino by itself is not often taught in elementary schools, but it is used in some educational robot kits and it is the most popular hobbyist platform for building robots and other advanced programmable electronics. We, therefore, used this specific name instead of the general term robotics. Students were not familiar with this system as 92% of students did not even recognize the name.

3.2. Procedure

In this study, an open source software Twine was used for writing nonlinear stories. Twine is a storytelling software with a very low learning curve. It has been used for story writing workshops for children as young as ten years old. (Tran, 2016) Its basic function is to create linked hyperdocuments with a very simple markup language. The story structure is visualized in an easy to understand graph format. The created story is readily testable and playable in an HTML format. For a review of the software, see Friedhoff (Friedhoff, 2013).

The software has been slightly modified to meet the requirements of our educational use. Most importantly we have added features for sharing stories in social media. This allows co-creation of stories and remixing content. The importance of remixing in educational applications is discussed

for example by Lamb (Lamb, 2007). The rationale for educational use modifications and technical details are presented in more detail in our earlier publication. (Letonsaari et al., 2018)

The questionnaire for the assessment of situational interest was designed after Tapola et al. (Tapola et al., 2013) who have adopted the design from Ainley et al. (Ainley et al., 2002). An example of the form is presented in Figure 1.

A noticeable design feature is that assessment is not done using a numerical scale but it is based on face icons or emoticons. In the form there was an explanation that leftmost face means “not at all” and rightmost face means “very”. These results were transferred to a scale from one to five, but students were not knowledgeable of the numerical scale.

Figure 1. Assessment form for students. Translation from Finnish language: “Oliko työskentely tänään?” -> “How was working today?”, “kiinnostavaa” -> “interesting”, “mielekästä” -> “meaningful”, “helppoa” -> “easy”, and “kehittävää” -> “self-improving”.

Oliko työskentely tänään?

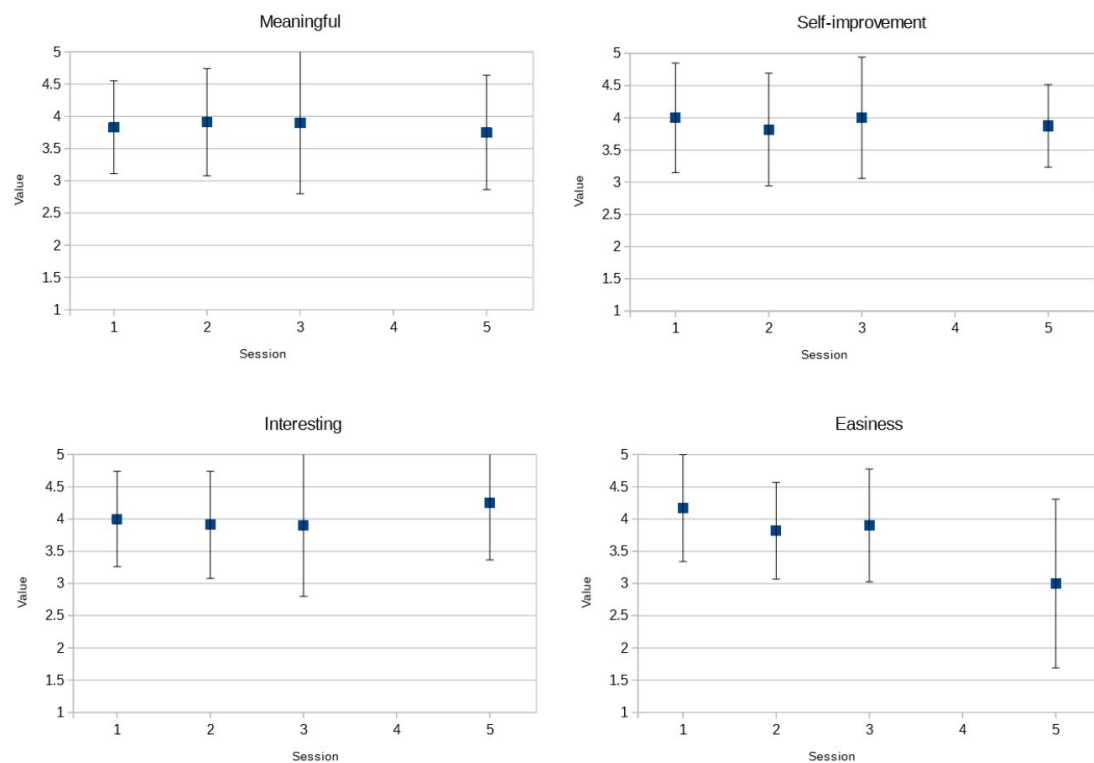
					
kiinnostavaa					
mielekästä					
helppoa					
kehittävää					

4. Results

Results of the situational interest questionnaire are presented in Figure 2. In the short course, there were five sessions. During session number four there were some unforeseen technical difficulties which might affect the assessment. Therefore session number four is left out of results.

The value range for questions was from one to five. Average of answer values are presented as the data point. The distribution of answers is presented as standard deviation by error bars.

Figure 2. Results of the situational interest questionnaire.



Generally, a low score can be considered an undesirable result and a good score can be considered to be the favorable result. The only exception for this is Easiness, which could be named Challenge with a reversed scale. Here we wanted the variable to have a more positive feeling and felt that easiness is, in this case, a more appropriate term. It can be argued that it is easier to assess how easy a task was than the other way around.

Based on this it can be seen that lessons were seen quite easy (first three lessons average 3.97), but still interesting (first three lessons average 3.94), meaningful (3.88) and good from the perspective of self-improvement (3.94).

The most notable change was seen in the easiness of tasks during the fifth session where the assessed value of easiness dropped from 3.97 to 3.11. Also, the standard deviation of the results increased from 0.86 to 1.27. This means that results contained much more variation. The change is statistically significant even in this small sample size (unpaired t-test, $p = 0.0155$).

The result is not surprising as it is commonly seen in many communicative tasks: when decoding information becomes more challenging, the differences in receivers' competencies become more emphasized as some may not be able to process the task.

In this case, the fifth session included simple electronics and Arduino programming, whereas the first three sessions were about game development and learning basic programming concepts. Based on the survey of initial knowledge (Table 1), Arduino programming was a novel concept for many students. This can explain the result in some degree. On the other hand, it is not unusual that early lessons appear to be easier. When course proceeds, learning is cumulative and difficulties in any issues can affect the new learning. Cumulation of difficulties can make later lessons appear to be more cognitively challenging.

Generally, the increasing feeling of a challenge during a course is also often a favorable effect. In this case, the average easiness of the last lesson was 3.11 in the scale from one to five, and the variation was about 1.84 to 4.37. This is clearly still not too challenging a task. Only very few students see the easiness of over four where motivation can be difficult to maintain.

It is also possible to see a slight increase in interest between the first three sessions and the last session. The change is not statistically significant (unpaired t-test, $p = 0.3531$).

5. Discussion

A method for communicating knowledge between people of different expertise levels was introduced. The method is based on nonlinear storytelling where active knowledge creation is used. In this study, the communication task was to teach basic computer programming concepts and simple understanding of electronics to first-year college students.

The sample of this study was very small ($n = 12$). The study was intended to examine the feasibility of the storytelling method in translating and transforming knowledge in a learning task. The method performed well in situational interest assessment.

All indicators were close to four in the scale of one to five where the bigger value is better. This result is very desirable. The only statistical change was the decrease in task easiness in the last session. This is a very natural result as difficulties often cumulate during a course. Also, more difficult issues are often discussed during the last sessions.

There was a small but statistically insignificant increase in the interest between early sessions and the last session. This can be cautiously interpreted as a possible small positive sign that interest was not only sustained but maybe also slightly increasing.

6. Implications

According to Carlile, knowledge can be transferred directly through boundaries, or it may need to be translated or transformed (Carlile 2004). In the case of interdisciplinary participants or participants with noticeably different levels of expertise, direct a transfer is not possible but the translation or transformation of the knowledge is needed.

Storytelling can function in both roles, as a translator or as a tool for transformation on knowledge. Translation means that the subject matter is communicated with such terms that are meaningful for

creates a meaningful interaction based on the best potential of available circumstances. The same is true in communication generally.

Storytelling is a highly constructivist method of communication and learning (Yang et al. 2012). Participants construct a meaningful representation of the subject matter through the creation of stories, especially in the nonlinear form of storytelling. There is much literature on the benefits of both storytelling and constructivist learning methods.

While it is difficult to compare communication methods objectively, nonlinear storytelling is one viable option based on the results of this study. It is especially potent if participants are interested in finding a deeper understanding of common interests or wish to try alternative methods of communication.

References

Ainley, M., & Hidi, S. (2002). *Dynamic measures for studying interest and learning*. In P. R. Pintrich & M. L. Maehr (Eds.), *Advances in motivation and achievement: New directions in measures and methods* (Vol. 12, pp. 43–76). Amsterdam: JAI.

Boltman, A. (2001). *Children's Storytelling Technologies: Differences in Elaboration and Recall*. Dissertation, Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, 2001.

Bryson, D. (2016). *Professional language: understanding and being understood*. *Journal of visual communication in medicine*, 39(3-4), 158-159.

Bucchi, M., & Trench, B. (Eds.). (2008). *Handbook of public communication of science and technology*. Routledge.

Carlile, P. R. (2004). *Transferring, translating, and transforming: An integrative framework for managing knowledge across boundaries*. *Organization science*, 15(5), 555-568.

Eklund, L. (2012). *The Sociality of Gaming: A mixed methods approach to understanding digital gaming as a social leisure activity*. Doctoral dissertation, Acta Universitatis Stockholmiensis.

Finnish Advisory Board on Research Integrity. (2012). *Responsible conduct of research and procedures for handling allegations of misconduct in Finland*.

Friedhoff, J. (2013). *Untangling Twine: A Platform Study*. In DiGRA conference.

Friedow, A. J., Blankenship, E. E., Green, J. L., & Stroup, W. W. (2012). *Learning interdisciplinary pedagogies*. *Pedagogy*, 12(3), 405-424.

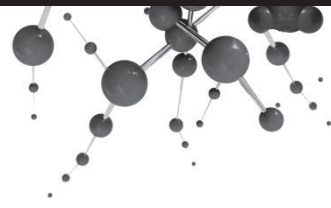
Hammersley, M. (1997). *Educational Research and Teaching: a response to David Hargreaves' TTA lecture*. *British Educational Research Journal* 23 (2) 141-161.

Ko, D. G., Kirsch, L. J., & King, W. R. (2005). *Antecedents of knowledge transfer from consultants to clients in enterprise system implementations*. *MIS quarterly*, 59-85.

Lamb, B. (2007). *Dr. Mashup or, why educators should learn to stop worrying and love the remix*. *Educause review*, 42(4), 13-14.

Letonsaari, M., Selin, J., & Lampi, M. (2017). *Co-creative serious games design process using nonlinear storyline editing*. In *International Conference on Computer Supported Education (Vol. 2, pp. 582-588)*. SCITEPRESS.

Letonsaari, M., & Selin, J. (2018). *Social Media Integration with Nonlinear Educational Storytelling Application*. In *2018 17th International Conference on Information Technology Based Higher Education and Training (ITHET)* (pp. 1-5). IEEE.



Julkaisu VIII

Letonsaari, M., **Selin, J.**, & Lampi, M. (2017). Co-creative serious games design process using nonlinear storyline editing. *The 9th International Conference on Computer Supported Education* (Vol. Volume 1, pp. 582-588). Porto, Portugal: SCITEPRESS Science And Technology Publications. <https://doi.org/10.5220/0006320305820588>

Julkaisukanavan taso: **JUFO 1**

© SCITEPRESS 2017, Reprinted with permission.

Co-creative Serious Games Design Process using Nonlinear Storyline Editing

Mika Letonsaari, Jukka Selin and Mikko Lampi

South-Eastern Finland University of Applied Sciences, Patteristonkatu 3, Mikkeli, Finland

Keywords: Serious Game, Virtual Learning Environments, Game Development, Collaborative Development, Unity, Twine.

Abstract: Here we present a serious game development process. The process is characterized by the collaboration in the development by contributors of wide range of skills, including end-users with no special skills in information technology. The aim of the game is to teach a broad range of information and communication technology skills as well as general practices required in the working life. For this purpose a rich content open world multiplayer game has been developed. The game design is highly modular allowing concurrent and continuous development process. Modular tasks are learning experiences crafted by experts in certain aspect of target skills. But tasks themselves can be customized easily without special skills. Especially, interactive non-linear dialogues between user and computer controlled characters inside the tasks can be created by end-users.

1 INTRODUCTION

This paper is based on work and research done in an on-going project Competent Employees for Digitalizing Work carried out by the Workers' Educational Association of Finland (WEA) with the South-Eastern Finland University of Applied Sciences (XAMK) and the University of Eastern Finland (UEF). The aim of the project is to enhance ICT-skills and working life skills of people who have no or a very low level on ICT-skills accordingly to the demands required in working life today.

The target group is people over the age of 30 years who are either unemployed or in transition of losing their jobs, who have no vocational qualification, or whose vocational qualification is no longer coherent with the requirements of work. Participants with low qualification are at risk of social exclusion, which can lead to staying completely outside the labor market. With its objectives the project will raise the skills, competences and courage to search for jobs or further learning possibilities.

The project will create a comprehensive training which ensures all participants with basic ICT-competencies and additional learning possibilities in areas of digital storytelling, digital media, social

skills at work, knowledge of employee rights, social media, and mobile games. Traditional classroom teaching is mainly used in teaching, but it is complemented by an online multiplayer learning game described in this paper. The game provides alternative methods of learning and improving information and communications technology skills as well as other skills required in today's work life such as work ethics, interaction in the workplace and maintaining learned skills by self-learning.

In this paper we present the methodology of developing a serious game with high level collaboration between experts and end-users. The game is developed with agile and user-centered methods. End-users are involved throughout the complete development process.

Collaboration is an important feature because the end-users often know best the environment where they will apply the knowledge in practise. In classroom situation students can ask teacher questions and clarify their view of the subject. This is not possible in educational games, unless teacher assistant is specifically provided. Therefore taking the end-users as participants already in the development phase of the game is important. Furthermore, participation improves motivation and self-confidence of the target audience as well as empowers them.

information technology department computer game development courses which allows us to enable participation of more advanced students to the project. Permissive licensing allows anyone to install and use fully usable software on any computer. License will restrict only notable commercial development.

The game will be released with an open source license, as is appropriate for a publicly funded software development project. This allows us to utilize resources with open licenses.

An extensive study of suitable open license 3d world models was carried out (Letonsaari, 2016). There is significant amount of open license 3d models, including real buildings and even sizeable parts of real cities. However many of these models are not suitable to be used in game engines without modifications. For example models for city planning often do not have textures. Automatically generated 3d models on the other hand often do not scale well but loose detail.

The user interface of the game utilises an open licence 3d city model from the centre of the city of Mikkeli, Finland. This was largest available textured 3d city model. It is constructed with 3d primary objects with photographed textures attached to them and is highly compatible with 3d game engines. An overview of the city model is presented in figure 1.



Figure 1: The Open 3D City Model from the centre of the city of Mikkeli, Finland (in Unity editor).

The city model works in the game as the framework of the UI. The players walk to different educational events in the gamified city model. As an example they can enter an interactive job interview by opening a door of a building in the city model. The user interface to the city with player character and minimap is presented in Figure 2.

For the 3d character customization we use open source Unity add-on Unity Multipurpose Avatar, UMA (UMA 2 Website, 2016). UMA is a platform for dynamically modifiable avatars and allows users to create a playing character they enjoy to play. This



Figure 2: The user interface (UI) of the game.

increases the engagement of the game and makes characters distinguishable for multiplayer purposes.

The open 3d game world allows multiplayer participation to the game. Players can see each others and communicate in the game world. For multiplayer functionality we use Unity Networking (UNET) technology which is an integrated part of Unity game engine.

2.3 Collaboration with End-Users in the Game Development

End-users in this project are people with low level information technology skills attending to a course on basic training on using computers. Therefore collaboration should require minimal amount of technical knowledge from the end users.

A non-integrated method of collaboration with end-users and experts is to collect stories, use-cases and ideas before the development process and integrate the knowledge to the development process (All et al, 2013). Experts and end-users can also operate in software testing and validation and provide feedback to developers (Bossavit & Parsons, 2016; Cosma et al, 2015).

Simple integrated method for co-operation with low skill level participants in the game development is often implemented by enabling editing visual components of the game. Users may be able to modify characters by customizing physical attributes and for example by choosing the clothing and accessories. There may be possibility to edit the game world with graphical editors such as level editors. Graphical editing of characters and the game world is an engaging activity as the results are easily recognizable in the game. Graphics are easily separated from the game logic and require very little understanding of the game design.

Here we wanted deeper and more conceptual involvement of end-users. To this end, a participation method for creating dialogs between player and computer controlled characters was

developed. Dialogs between player and computer controlled characters are important plot devices. Interactive computer controlled characters create another, social dimension to the game world, even if computer controlled characters work with seemingly simple logic. By letting end-users to create dialogs we let them to retell the story with their own voice. This is not only an engaging activity, but lets user to understand game logic more deeply.

The idea here is to let end-users to create dialogs for several different types of interaction: how to communicate with a random encounter person, in job interview with the interviewer, or with your boss, coworker or customer in different working life situations. The player can choose good or bad ways to interact and feedback is given accordingly. Planning these interactions makes the end-user to consider different aspects of the situations. Subject of the dialogs can of course be changed to accommodate the target user needs.

To create dialog for a game, it must be coded into computer understandable format. Writing can be done with free form, and coding can be done manually. There also exists automated tools for writing dialogs which provide speed for the workflow and save manual work. In this project we use open source software Twine, which is a tool for writing interactive non-linear stories (Klimas, 2016). Stories or dialogs generated with Twine can be easily integrated into Unity game engine using UnityTwine addon.

Writing a passage or single part of the dialog with Twine is not different than filling a form in web browser. Passage window is shown in Figure 3. Each passage has title and passage text. It is also possible to add tags to the passage.

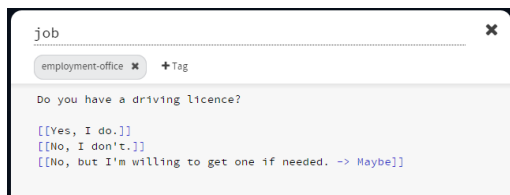


Figure 3: Editing a passage of a nonlinear story in Twine.

Links to other passages are marked with double brackets. These work quite similar as HTML links. When text, as shown in Figure 3, is written, Twine automatically creates new passages using the names of the links text, here “Yes, I do.”, “No, I don’t” and “Maybe”. The link name can also be changed to something more convenient using an arrow notation as shown in the last link.

Linked passages are shown as a directed graph in

the story editing mode of Twine, as shown in the Figure 4. The story or dialog structure is clearly visible. User can move passage boxes and edit them by using doubleclick. User interface is very intuitive and Twine has been used for a writing workshop for children (Davis, 2013).

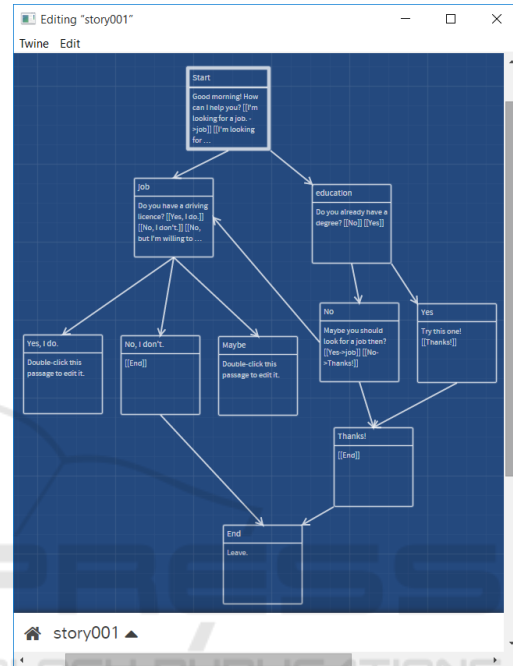


Figure 4: The story structure in Twine. Interactive passages and possible transitions create an easy to understand visual representation of the story structure.

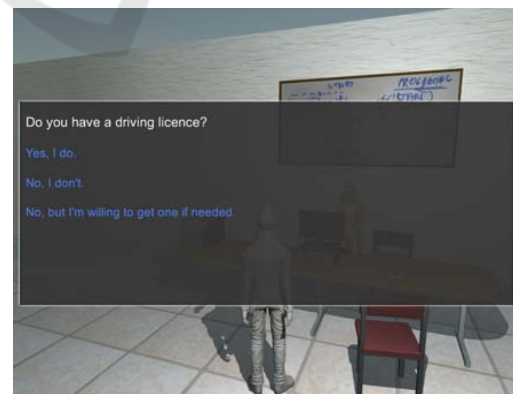


Figure 5: User generated game content inside the game.

The story file must then be imported to Unity using the UnityTwine addon, which generates a C# script from the Twine code. When generated script is

connected to a Unity scene, the dialog script can be played in 3D game world as seen in Figure 5.

3 VALIDATION, USER PROFILING AND RESULTS

A process for developing a serious game was developed in this project. The project is interesting in that the game is created by many contributors of diverse fields. It takes the learning subjects and ideas from the experts in information technology and

working life. These are implemented in a game world with latest gaming technology by university students supervised by computer game programming experts.

Open source materials and components are used to create a rich game world. Depth is created to the game by enabling the end-users to collaborate with game development in creating interactive dialogs between the player and computer controlled characters. The complex process is summarized in Figure 6.

The game and development participation has been piloted with a group of students attending to

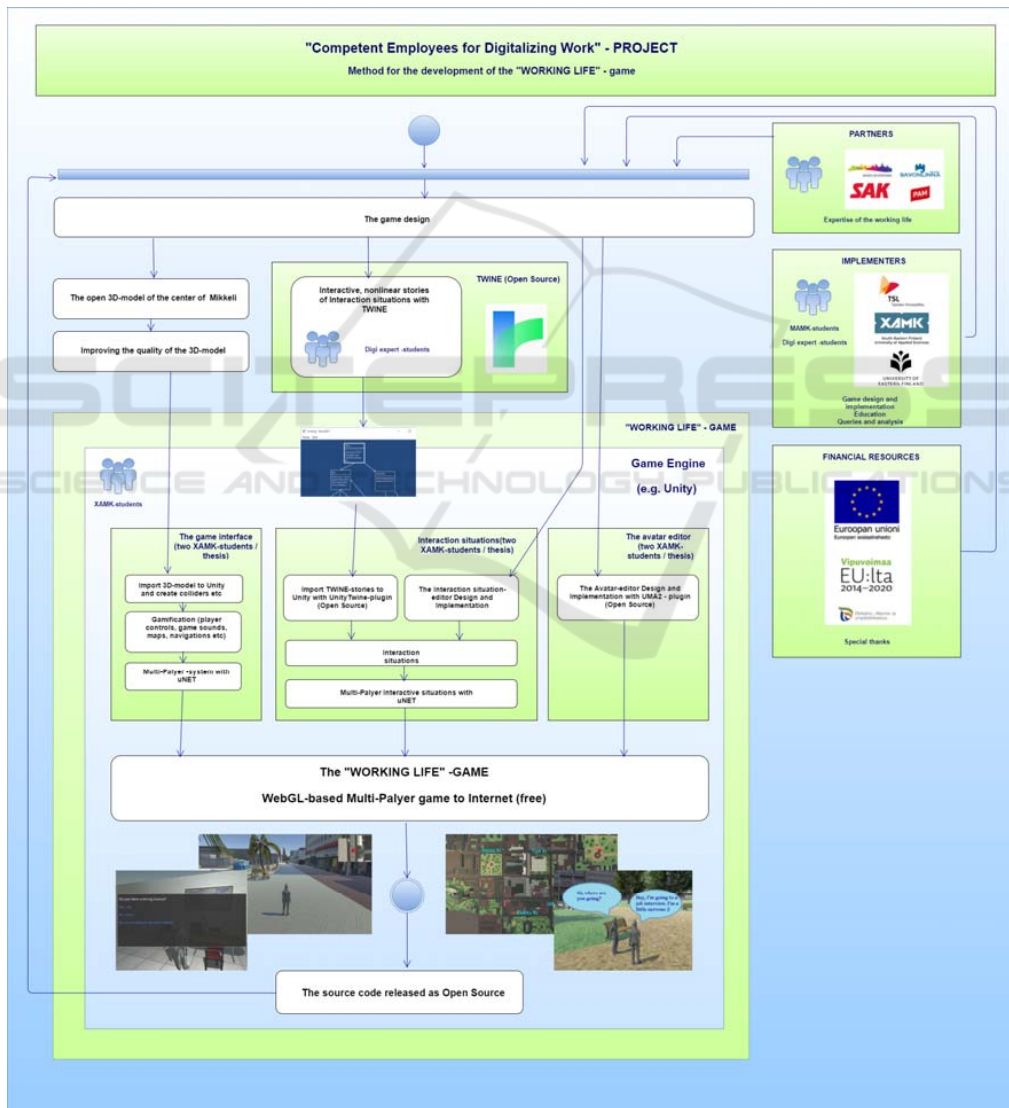


Figure 6: Flowchart of the process for developing a serious game used in this project.

the basic information technology and working life skills course. The target group for the course was people over the age of 30 years who were either unemployed or in transition of losing their jobs, who had no vocational qualification or whose vocational qualification were no longer coherent with the requirements of work.

The course had 14 participants in this group and their age distribution in ten year cohorts is given in Table 1.

Table 1: Test group age distribution.

Age group (years)	Percentage of participants
from 36 to 45	23 %
from 46 to 55	31 %
from 56 to 65	46 %

For each participant, a questionnaire was sent before the start of the course. Out of 14 participants, 13 answered the questionnaire (n = 13).

All of the participants did have an access either to a computer, a tablet computer, or a mobile phone. And almost all had access to an Internet connection. All participants had mobile phones and 69% had Internet connectivity on their phone. 85% of the participants had a computer with Internet connection. 61% of the participants had a tablet computer, but only 64% of the tablet computers had Internet connection.

Relevant to the development of the learning game, participants' previous experience with electronic games was surveyed. None of the participants had any experience with console gaming, including hand held consoles, downloaded games, or multiplayer online games. Participants did have some experience with single player computer games with 42% of the participants, mobile gaming with 34% of the participants, Facebook games 20% and other games played with Internet browser 25%.

At this phase, only qualitative testing was performed. Participants with little experience with gaming were given opportunity to try the game. The game did not have any tasks, but was a open world city, where player could learn character control (walking, running, jumping) and explore the world.

It was recorded by observation and interviews that the game was user friendly and had low learning curve due to responsiveness and logical operation. All participants quickly learned how to move around in the game using the keyboard. Participants were fascinated with the possibility of exploring the city they already knew in real life.

Participation to the game development generated excitement amongst the participants.



Figure 7: Testing the game in a classroom environment.

4 CONCLUSIONS

Games are used in many kinds of learning tasks and in education. They provide an engaging activity which can be directed into learning activities. Usually these games have a certain well defined domain and they are created using traditional software development methods.

In this project our goal was to develop a computer game to teach some basic information technology and working life skills to adult students. The topic is informal and not well defined. We have therefore developed a flexible method for game creation. In this method participants of very different skill levels can contribute to the development process: minigames or tasks can be created by advanced users who can use Unity game engine. Anyone without specific skills can participate by creating dialogs to interaction between players and computer controlled characters.

Co-creation in the game development is a way to create rich content. It is not one or few developers who create the game content, but expertise of end-users is taken into account. This expertise can be surprisingly important as end-users have often the best knowledge on what working environment the skills will be applied in practise.

The game development process is also educational itself. In this project some participants are information technology students and some students learning basic computer skills. For both the game creation process is an integral part of the learning. Analyzing and designing the learning subject in game development gives new insights and provides deeper understanding of the subject.

The end-product is richer in the sense that it is less conventional than when produced with traditional methods. This is an alternative method of game development and can be considered to have similarities with crowdsourcing. Several fields such as open source software or Wikipedia we can see

that crowdsourced content can sometimes as desirable as, or even superior to professional or commercial efforts. These differences may not be clearly quantifiable but qualitatively accounting for a wider range of use-cases.

The next step after this pilot study is to explore further possibilities of co-creative game development. We have seen lately a great success in popularity of serious games. This has happened due to more advanced tools for computer game development, more accessible playing platforms such as laptops, tablet computers and smartphones, and raise of the popularity in online gaming.

As more online learning possibilities, and wider range of serious games is required, serious game development processes will gain more importance. Methods of co-operative development for non information technology professionals should therefore be developed and tested.

The computer game developed in this project will be released as an open source software later in 2017.

REFERENCES

- All, A., Van Looy, J. and Castellar, E.P.N., 2013. An evaluation of the added value of co-design in the development of an educational game for road safety. *International Journal of Game-Based Learning (IJGBL)*, 3(1), pp.1-17.
- Baranowski, T., Buday, R., Thompson, D.I. and Baranowski, J., 2008. Playing for real: video games and stories for health-related behavior change. *American journal of preventive medicine*, 34(1), pp.74-82.
- Bossavit, B. and Parsons, S., 2016, May. This is how I want to learn: High Functioning Autistic Teens Co-Designing a Serious Game. In Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (pp. 1294-1299). ACM.
- De Jong, T. and Ferguson-Hessler, M.G., 1996. Types and qualities of knowledge. *Educational psychologist*, 31(2), pp.105-113.
- Cosma, G., Shopland, N., Battersby, S., Seymour-Smith, S., Pockley, A.G., Archer, M., Thompson, R., Khan, M. and Brown, D., 2015, October. Co-design of a Prostate Cancer Serious Game for African Caribbean Men. In *2015 International Conference on Interactive Technologies and Games* (pp. 71-75). IEEE.
- Davis, G., 2013. *Teaching Twine to Ten Year Olds >> re/Action | Zine*. [ONLINE] Available at: <http://www.reactionzine.com/teaching-twine-to-ten-year-olds/>. [Accessed 19 December 2016].
- Juul, J., 2002, June. The Open and the Closed: Games of Emergence and Games of Progression. In *CGDC Conf.*
- Klimas, C., 2016. *Twine / An open-source tool for telling interactive, nonlinear stories*. [ONLINE] Available at: <http://twinery.org/>. [Accessed 19 December 2016].
- Letonsaari, M., 2016. *Digiosaajaksi työelämään: Kaupunkien avoimet 3d-mallit*. [ONLINE] Available at: <https://tkiblogi.wordpress.com/2016/05/17/digiosaajaksi-tyoelamaan-kaupunkien-avoimet-3d-mallit/> [Accessed 8 February 2017].
- Mayes, T. and de Freitas, S., 2004. *Review of e-learning theories, frameworks and models*. JISC e-learning models desk study, (1).
- Olson, M. H., Hergenhahn, B. R., 2016. *Introduction to the Theories of Learning*, Psychology Press. London, 9th edition.
- Shulman, L.S., 1986. Those who understand: Knowledge growth in teaching. *Educational researcher*, 15(2), pp.4-14.
- UMA 2 Website. 2016. *UMA 2 - Unity Multipurpose Avatar - Asset Store*. [ONLINE] Available at: <https://www.assetstore.unity3d.com/en#!/content/35611>. [Accessed 19 December 2016].
- Unity 3d Website. 2016. *Unity - Game engine, tools and multiplatform*. [ONLINE] Available at: <https://unity3d.com/unity>. [Accessed 19 December 2016].
- Van Geit, K., Cauberghe, V., Hudders, L. and De Veirman, M., 2015, October. Using Games to Raise Awareness. How to Co-Design Serious Mini-Games?. In *European Conference on Games Based Learning* (p. 532). Academic Conferences International Limited.

.....



Julkaisu IX

Letonsaari, M., Karjalainen, L., & **Selin, J.** (2019). Nonlinear Storytelling Method and Tools for Low-Threshold Game Development. *Seminar.Net*, 15(1), 1-17.

Julkaisukanavan taso: **JUFO 1**

© Seminar.Net 2019, Reprinted with permission.

Nonlinear Storytelling Method and Tools for Low-Threshold Game Development

Mika Letonsaari, Leena Karjalainen and Jukka Selin

South-Eastern Finland University of Applied Sciences

Email: mika.letonsaari@xamk.fi

Abstract

Nonlinear storytelling is a method in digital storytelling where the storyline is not linear but has branches. This is typical for interactive stories such as computer game plots. In this study we present a review of nonlinear storytelling tools and educational computer game development software. Special attention is paid to usability, software licensing models, and integration with modern game engines. We present a pilot study where nonlinear stories (n = 14) were collected during a game development project. Participants were adults with low information technology skills and who were participating in an information technology training course intended for enhancing their employment opportunities. Collected stories are analyzed to show an example of what kind of content can be expected when nonlinear storytelling is used. In particular some common errors and misconceptions in nonlinear storytelling are explored. Usability of the collected stories in the context of game development is examined. These observations and findings can be used to develop storytelling process more meaningful to students and to harness the nonlinear storytelling method more effectively in education and educational game development.

Keywords: digital storytelling, nonlinear storytelling, educational game, storytelling software

Introduction

Storytelling has become a very popular method of education. In storytelling, the learner creates or tells a story that is related to the subject matter. Learner's personal point of view

©2019 (author name/s). This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), allowing third parties to copy and redistribute the material in any medium or format and to remix, transform, and build upon the material for any purpose, even commercially, provided the original work is properly cited and states its license.

connects the subject matter to a larger context. Storytelling as a learning method has many positive cognitive, social, and emotional benefits including improvement in language skills, concentration, imagination, comprehension, and critical thinking (Boltman 2001, pp. 17-18).

Due to the arrival of computers in school classrooms, digital storytelling has become a widely used and studied form of educational storytelling. Digital storytelling, sometimes called multimedia storytelling, is storytelling using methods of digital multimedia such as images, sound, and video. Often computers are used to compose the story. Digital storytelling is a method to learn digital information processing and multimedia production using modern digital tools. It also provides engagement to the learning process and encourages students in multimedia literacy (Viitanen et al. 2014, Çıralı et al. 2015). Most of the educational storytelling, including digital storytelling, is linear in structure. Stories present only one predetermined sequence of events. The reader of the story has no control of the story. An example of such a story is presented in Figure 1.



Figure 1. A story with a linear structure.

Gamified stories or interactive stories provide the user of the story, a reader or a player, a possibility to affect the storyline. Such a storyline has branches and the structure is not linear but nonlinear. An example of a nonlinear gamified story is presented in Figure 2. The story starts from the left. The player is given two options which provide the player with more options. This creates a complex structure for the story with several possible outcomes.

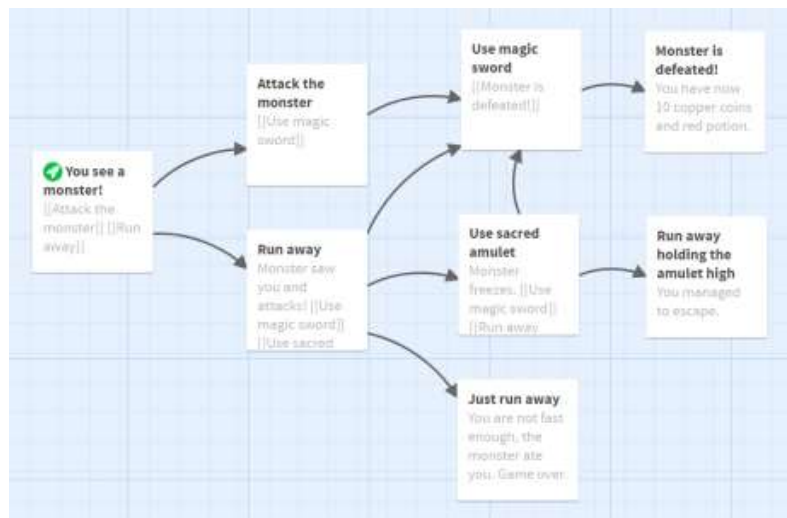


Figure 2. A gamified story with nonlinear structure.

There is little research focused on the nonlinear nature of gamified stories in education. Computer game development as a form of nonlinear storytelling is most often just a tool for teaching computer programming (for example Leutenegger et al. 2007, Topalli et al. 2018, Kalelioğlu 2015). Sometimes game development or interactivity of the story is used as a way to engage students but nonlinear nature of stories is not considered as a special feature (Tran 2016).

A notable exception is a study by Liu et al. (2010) where linear and nonlinear storytelling interfaces were compared. They measured co-creative performance in four factors: derivation, remix, ownership, and positive interdependence. In all four factors, the nonlinear group performed superior to the linear group. Researchers reported a positive outcome for the nonlinear storytelling.

In our earlier work, we have shown that nonlinear stories have similarity to computational algorithms (Letonsaari & Selin, 2017a). Based on this, we speculate that practicing nonlinear storytelling may have positive synergy with learning computational thinking skills.

In this article, we review some available types of nonlinear storytelling tools and software. These include general software that is not intended for writing nonlinear stories, as well as specialized nonlinear storytelling software. We present their features regarding the requirements of an educational game development.

We also present an analysis of stories collected in our earlier study to give an example of what kinds of results can be expected when nonlinear stories are collected from novice

computer users.

In the research project an educational computer game was developed by information technology students and professionals. We wanted also to enable the participation of another group of adults who had very low information technology skills. The aim was to engage them in a computer game development, to empower them regarding the use of information technology, and to provide their non-information technology related expertise to the game development process (Letonsaari, Selin & Lampi, 2017b).

In this article the collected stories are analyzed in detail. We are interested in common technical problems that novice users have. Participant in this project had only a short introduction to nonlinear storytelling and limited help from their teacher as they continued their work after school hours. This method of study tries to uncover the critical learning challenges and possible misconceptions in nonlinear storytelling.

Nonlinear storytelling software

Game plots can be understood as nonlinear stories or hypertext documents. There are many tools to produce such documents with internal hyperlinking. There also exists many types of game development processes from simple experimentations to complex professional projects. Therefore both the requirements of game development processes and the features available in tools must be considered when storytelling tools are chosen.

In our example game development project we chose the following key features for consideration when choosing the solution:

1. easy to use for people with no special information technology skills,
2. possibility to export stories in a simple form, or an integration with advanced game engines, and
3. open source licensing.

The first requirement is given because the idea is to enable a low-threshold participation for everyone. The second requirement is important for us because the stories are used in another professional game engine. It is also generally good to prevent vendor-locking by using software with full export functionality.

The third requirement was chosen because we develop an educational software in an academic research project and it is important to be able to share the results. We also wanted to use external open source licensed resources and therefore open source licensing was a natural choice to avoid licensing problems and enable wide adoption.

In the following, some of the basic types of nonlinear storytelling software are introduced. Different types of hyperlinking methods are explained and the software's selected key features regarding game development are discussed.

Text editing

The simplest way to write nonlinear stories is to add references to a text file for internal linking. For this purpose, any text editor can be used. Notable examples of texts produced in this manner are encyclopedias with internal linking. There also exist gamified storybooks, for example, Choose Your Own Adventure book series (Friedman, 1995) which have numbered chapters. At the end of each chapter, there are usually choices given to the reader. For example, the text might say *“If you want to fight, jump to chapter number 13. If you want to run away, jump to chapter 85.”*

A more advanced option is to use bookmarking and cross-referencing features in word processing or presentation software such as Microsoft Word, Microsoft PowerPoint, OpenOffice Writer, or OpenOffice Impress. This can be a good method in nonlinear storytelling for people who are familiar with word processing and presentation software. In addition gamification can also be used as an engaging method to teach the advanced features of office software.

Hypertext and Wiki Software

For hypertext documents, Hypertext Markup Language (HTML) is the standard markup language, especially used in Internet WWW pages (Berners-Lee, 2001). Basic hyperlinking of documents with HTML language requires only a small subset of HTML language (W3C, 2017). Hyperlinking is created with A HREF attributes and some additional attributes are required for forming valid HTML documents. The biggest drawback for utilizing HTML language with novice users is the need for understanding files and file systems. Each passage in the nonlinear story must be stored in its own file. For example, in our project, students did not have the required skills in file handling, and this makes the task of using HTML difficult.

Wiki software is an improvement in this matter as documents are stored in a database and the users do not need to manually manage them. Also, the markup language is simplified from HTML and users do not need to define document structure.

There are several different Wiki software and also many open source options exist. Documents are computer readable and can be exported in simple formats. This makes Wiki documents a very simple and efficient tool for writing nonlinear stories. Using Wiki

for writing also teaches Wiki markup to students so that they become familiar with how the online encyclopedia Wikipedia and other online Wiki resources work.

Game-oriented software

There exist some game oriented software for nonlinear storytelling. These software have the advantage that they are designed for the purpose of writing game plots. They often have some means to control the story structure and maybe to visualize the story structure in a form of a flowchart. They often have features for a more complex game mechanics such as variables and scripting programming option. Let us review some of the most popular game oriented nonlinear writing tools.

Twine is described on its website (twinery.org) as a tool for telling interactive, nonlinear stories. Its user interface is a flowchart-based. Nodes of the flowchart are known as passages. They contain the text presented to the player as well as hyperlinks and possible macros for controlling the plot. An example of Twine flowchart is presented in Figure 3.

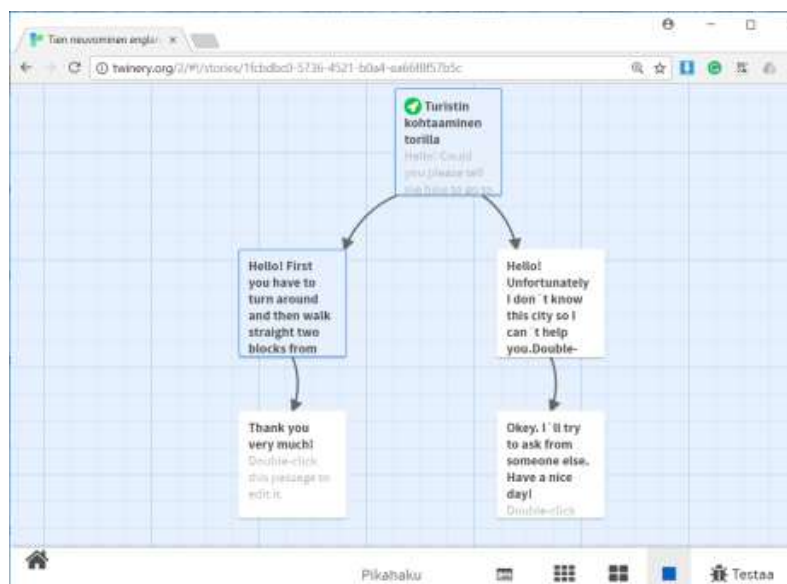


Figure 3. Twine flowchart with five passages and one branching.

There are two methods for creating hyperlinks in Twine. The basic syntax is double brackets around the link text. This creates a link to the passage with the same title as the link text. If no passage exists with the same name, a new passage with the name is created. The second method has separate link text and target passage title. There are three syntaxes for this in Twine and its default Harlowe story format:

- `[[linktext|title]]`
- `[[linktext->title]]`
- `[[title<-linktext]]`

RenPy (renpy.org) is a tool for creating visual novels. It has many options designed to integrate visual images into nonlinear storytelling. A story is written in a text file and story structure is created with menus, jumps, and labels. An example of a RenPy code, where two options are provided to the player, is presented in Figure 4. RenPy is a popular and mature software. It is at its best when the story is strongly visual.

```
s "Sure, but what's a \"visual novel?\""  
menu:  
    "It's a videogame.":  
        jump game  
    "It's an interactive book.":  
        jump book  
label game:  
    m "It's a kind of videogame you can play on your computer or a console."
```

Figure 4. Story structure control mechanisms for RenPy visual novel engine. Menu item gives options to the player. The Jump attribute moves to the given label in the storyline. This example is taken from RenPy website renpy.org.

Inkle is a software for combining visual art with nonlinear stories. It uses a scripting language *Ink*. Ink website (github.com/inkle/ink) describes it as “scripting language for writing interactive narrative, both for text-centric games as well as more graphical games that contain highly branching stories.” An example of Ink scripting is presented in Figure 5.

Another scripting type of software is *ChoiceScript* (github.com/dfabulich/choicescript). Both Inkle and ChoiceScript are open source software. Inkle also has Unity 3d integration option by a plugin. As scripting languages, these are both textual in nature. This

emphasizes the story logic and the story script is very concise. Both of these languages have clear syntaxes and are good for text-based game design when no structure visualization is required.

```
=== paragraph_1 ===  
You stand by the wall of Analand, sword in hand.  
* [Open the gate] -> paragraph_2  
* [Smash down the gate] -> paragraph_3  
* [Turn back and go home] -> paragraph_4  
=== paragraph_2 ===  
You open the gate, and step out onto the path.
```

Figure 5. An example of branching in Ink scripting language.

Fungus (fungusgames.com) is an open source software for writing stories inside Unity 3d development environment. It is a flowchart-based tool and usability of the tool has been highly paid attention to. The usability is especially good in using variables and conditional branching but these advanced features were not used in our pilot project.

The drawback of Fungus is that it requires Unity 3d installation. While Unity 3d is free for personal use, it is a significantly more complex software. The native Unity 3d integration can make the user interface difficult to use for people with low information technology experience. An example view of the user interface is presented in Figure 6.

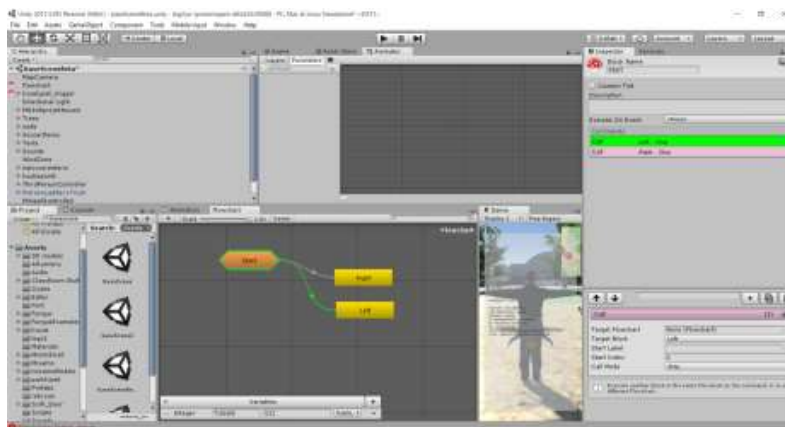


Figure 6. An example view of Fungus user interface inside Unity 3d environment.

Alice (alice.org) is a storytelling tool that is designed to be used in education. It is developed by Carnegie Mellon University and its aim is to provide an introduction to computer science concepts and computer programming in an engaging way of telling

stories and creating games. Alice is a rather comprehensive storytelling tool. A 3d scene view of Alice is shown in Figure 7. As an educational tool, it is designed to be easy to use even if it has many advanced features. As an independent storytelling tool Alice is an engaging and compact tool. But it has many internal features in addition to the storytelling features and it cannot be easily integrated into external processes such as general game development processes. Alice has extensive learning resources. For example there is material for designing nonlinear narrative (<https://www.alice.org/resources/lessons/design-interactive-narrative/>).

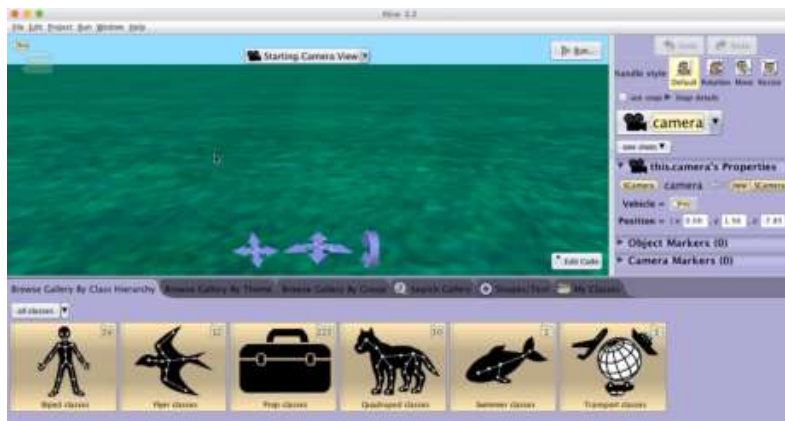


Figure 7. The Scene view of Alice storytelling tool.

Methods

An educational computer game was developed by university information technology students and professionals. To acquire content for the game, nonlinear stories were collected from a group of novice computer users. The group of adults (age 30-64 years) participated in a basic information technology training course intended for enhancing their employment opportunities.

During one learning session the serious game development project was introduced to the students and students tried the game. The game is an open world 3d game where the player's avatar can walk around and complete educational tasks.

During a second learning session, the basic usage of nonlinear storytelling tool Twine was introduced to the students. Twine was selected for the project because it is an open source software and because it's good integration with Unity 3d game engine.

After the introduction, students were instructed to write a sample story on personal computers at the computer laboratory of the school. Students were able to continue their

stories at home after the session. Submitting their story for the game development research project was voluntary and not everybody wanted to include their work in the game.

Results

Fourteen stories ($n = 14$) were submitted to the project. The default visualization of Story List view by Twine is presented in Figure 8. In this visualization, each circle presents one passage in the story. Size of the circles correlates with the amount of text in a passage. Colors are only for visual purposes. The overall structure of the story is also visually presented by positions of circles.

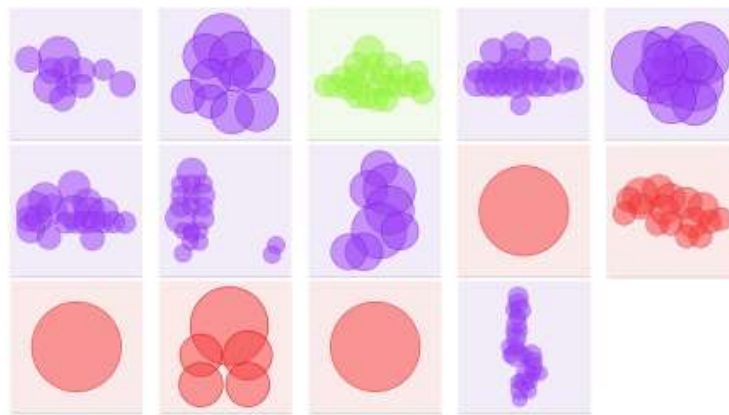


Figure 8. Visual presentation of the collected stories in Twine.

It can be seen from the visualization that there are three stories with only one passage (just a single sphere in the visualization). These stories have obviously some technical problems. Other stories seem structurally good. So the default visualization of the Story List view presented in Figure 8 can be used as a simple inspector of story structure.

A more detailed view of two of the stories, as presented by the Story Edit view of Twine, is presented in Figure 9 for comparison. As can be seen, the visualization in Figure 8 gives an approximate structure of the story. But the Story Edit view also presents the story flow and transitions between passages.

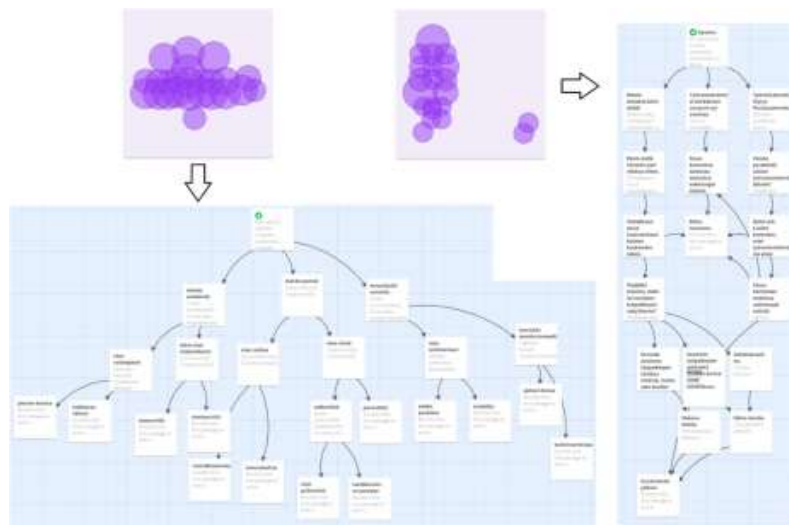


Figure 9. A more detailed view of two stories in Figure 8. Two extra passages on the lower right corner are omitted from the latter story.

It is possible to collect certain metrics from the stories to describe the story structure in analytical means. The number of passages and the number of links between passages in each story is presented in Figure 10. Here we can see again the three stories with only a single passage and no links.

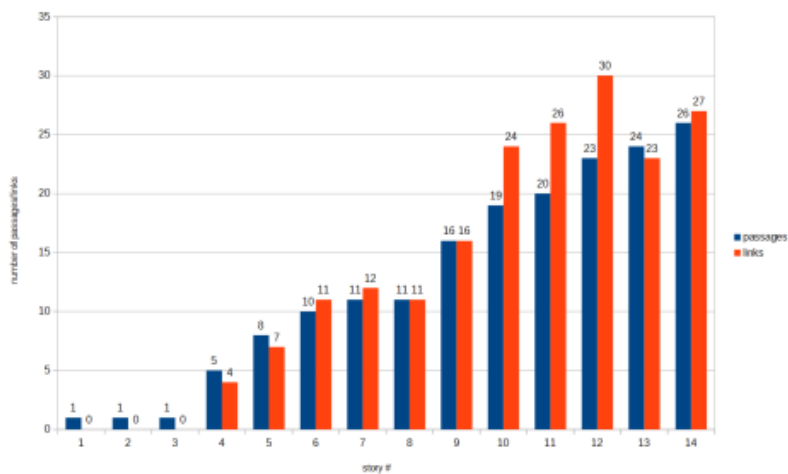


Figure 10. The number of passages and the number of links between passages in collected stories.

We analyzed the three stories with only one passage and found that they all had the same problem: students had not correctly understood the syntax for creating hyperlinks. An example of the contents of one story is presented in Figure 11. It can be seen that the dialog

has been written as a linear manuscript without any interaction with the player.

In all of these three cases, students had put double brackets over the whole dialog. Double brackets are used for creating hyperlinks, but they should include only the link text provided to the player or a link text and a link title. Double bracket notation works only with single line text so no hyperlink is created in this case.

```
[[BARTENDER1  
What would you like to have?  
CUSTOMER1/1  
A large dark beer  
BARTENDER2  
Would you like to have German or Belgian, sir?  
CUSTOMER1/2  
German, please.  
BARTENDER3  
And you, sir?  
CUSTOMER2/1.  
A Scotch and a small beer.  
BARTENDER4  
Okay. Here you are!]]
```

Figure 11. An example of a story with only one passage. The student has not understood the idea of nonlinear and hyperlinks properly but has written the dialog in a traditional format. The text has been translated into English from the original Finnish language used in the project.

By default, Twine generates new passages using the link text as a new title. This was a somewhat difficult concept to learn in the introduction phase. The problem is that given two similar link texts, same continuation passage is assumed. This is not always the case and simple hyperlink syntax cannot be used.

In collected stories, only one story had this problem. A part of the story is presented in Figure 12. In this story, there are several questions with Yes and No answers. Questions are very different, “Do you need a bank?” and “Do you need a map?”, so the story should not continue in the same passage.

In the case of negative answer, the student has solved the problem by using “No” and “No.” which are interpreted as two different texts by Twine. But in the positive case both answers lead to the same passage. The problematic passage has been selected in Twine user interface so it is shown as light blue instead of regular white color in Figure 12. This passage has even a further Yes and No question which leads back to the passage itself in the positive answer case leading to a possible infinite loop in the story.

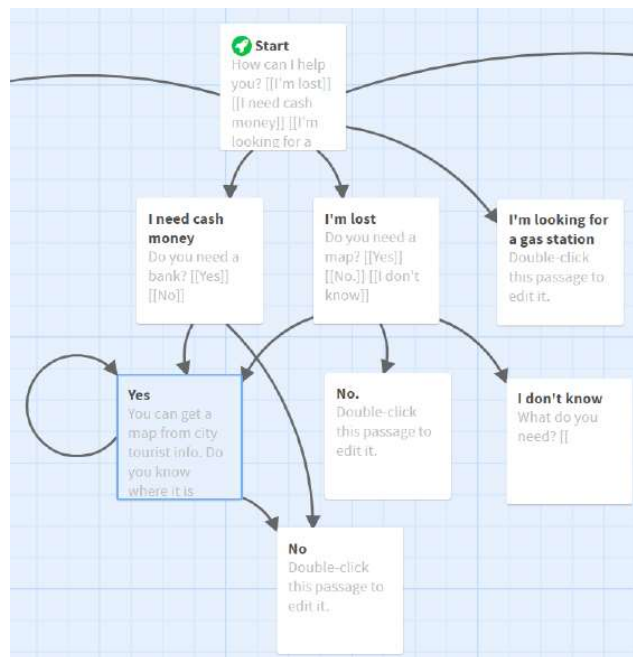


Figure 12. An example of a part of a story where the concepts of link text and link target were not fully understood and this has caused a problem with the story structure.

There are several questions to the player with Yes and No answers and automatically incorrectly generated hyperlinks cause an illogical structure. The text has been translated into English from the original Finnish language used in the project.

It is worth noting that most of the stories were not finished completely. Out of the eleven stories that had more than one passage, only two had no unfinished passages. Some of the unfinished passages were story branches that were not written, but some were missing just the closure or the ending for the story.

Three stories had extra passages that were not connected to the story. This is not an error or a problem but can tell something about the creative process of the story. Unconnected passages can tell for example about the editing of the story or experimentation with the story structure.

Discussion and conclusions

In this article, nonlinear storytelling was introduced as a low-threshold method for co-creative educational game development. Some of the most important characteristic features of nonlinear stories were presented. Nonlinear stories can be seen as hypertext documents, interactive stories or game plots. These are all used in education in different

contexts but there does not exist much research literature on the specific topic of creation of stories with nonlinear structure.

We presented several methods for writing nonlinear stories. Stories can be written with very commonplace tools such as HTML editors, wikis, word processors or presentation software. There also exist several tools for specifically writing nonlinear interactive stories. These tools often have features that make writing nonlinear stories easier such as flowchart visualization and integration with more advanced game engines. They often also have an easy use of scripting, such as using variables and conditional branching, although these advanced features were not utilized in this pilot project and were not introduced in detail in this article.

In our pilot study, 14 stories were collected from adult students with low information technology skills. Students were given only a short introduction to nonlinear storytelling and Twine software used for writing stories. The teacher was only limitedly available to supervise and help in technical problems because students continued their work unsupervised after school hours. This experimental setup was used to reveal common learning challenges and possible misconceptions in nonlinear storytelling.

Out of the 14 stories collected, three stories had some fundamental flaws so that stories contained no hyperlinks. Creating a nonlinear story with hyperlinks was introduced to students beforehand but based on these observations, more emphasis should be put on explaining the user interaction and the concept of branching in nonlinear stories.

The difference between the link text and the target passage title was emphasized during the introduction of the tool as it is maybe the most difficult concept in using hyperlinks. Making efficient passage titles should be considered an important subject in storytelling as it can cause confusion. In this study, only one student had technical problems with the independent link text and the target passage title.

Submitted stories had many unfinished passages. The process of writing a nonlinear story differs from traditional linear story as nonlinear story can have several branches and all of them must be finished. There are several techniques for this. For example, there can be several different endings or branches can be pieced together in a single ending. This idea could be made clear by practicing with small gamified stories first.

We did not include computer programming concepts such as variables and conditional branching in this study. Still, hyperlinks and complexity of the story structure presented challenges for the students. This is something that we are interested in our future research: how do these challenges, recognizing them, learning to solve them and gaining fluency in dealing with them, develop their thinking skills generally.

These skills are also very close to so-called computational thinking skills which are considered to be of great importance in computer science education. It would be therefore interesting to know if useful transferable skills are accumulated during the activity of nonlinear storytelling.

Most of the collected stories were of good quality and ready to be implemented in our game. The chosen software tool was found functional and students were able to use it very independently, although it would be better to give more support during the writing process especially in the early phases of learning.

Students' views were not inquired formally but computer game development embedded in a regular information technology basic training was considered as a refreshing change for their study routines.

This study was a small scale pilot study to better understand nonlinear storytelling process and to increase understanding of how to implement nonlinear storytelling in education. In our future work we will develop teaching methods and materials for nonlinear storytelling in education based on the findings of this study. More research is needed to identify the special features and possible applications of nonlinear storytelling in education. This study will provide some guidance for designing these studies.

Most of the storytelling tools reviewed were open source licensed software. This allows the modification of software. In our future work, we plan to further modify some of the software features to answer the requirements of educational use. These modifications will include features such as enabling better co-creative processes through sharing and remixing stories.

Acknowledgment

This work was supported by European Union Regional Development Fund and the Leverage from the EU 2014-2020 programme.

References

- Berners-Lee, T., Hendler, J., & Lassila, O. (2001). The Semantic Web. *Scientific American*, 284(5), 34–43. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0501-34>
- Boltman, A. (2001). *Children's Storytelling Technologies: Differences in Elaboration and Recall*. Dissertation. Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, Maryland.
- Çıralı, H., & Usluel, Y. K. (2015). *A Descriptive Review Study about Digital Storytelling in Educational Context*. Presented at the 7th International Conference on Education and New Learning Technologies (EDULEARN15), Barcelona, Spain. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Hatice_Cirali_Sarica/publication/284177441
- Friedman, T. (1995). Making sense of software: Computer games and interactive textuality. In *Cybersociety; Computer-Mediated Communication and Community*. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Ted_Friedman/publication/277013129
- Kalelioğlu, F. (2015). A new way of teaching programming skills to K-12 students: Code.org. *Computers in Human Behavior*, 52, 200–210. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2015.05.047>
- Letonsaari, M., & Selin, J. (2017a). Modeling computational algorithms using nonlinear storytelling methods of computer game design. *Procedia Computer Science*, 119, 131–138. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.11.169>
- Letonsaari, M., Selin, J., & Lampi, M. (2017b). *Co-creative Serious Games Design Process using Nonlinear Storyline Editing*. 582–588. <https://doi.org/10.5220/0006320305820588>
- Leutenegger, S., & Edgington, J. (2007). A games first approach to teaching introductory programming. *ACM SIGCSE Bulletin*, 39(1), 115–118.
- Liu, C.-C., Liu, K.-P., Chen, G.-D., & Liu, B.-J. (2010). Children's collaborative storytelling with linear and nonlinear approaches. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2(2), 4787–4792. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2010.03.771>
- Tedre, M., & Denning, P. J. (2016). The long quest for computational thinking. *Proceedings of the 16th Koli Calling International Conference on Computing Education Research*. <https://doi.org/10.1145/2999541.2999542>
- Topalli, D., & Cagiltay, N. E. (2018). Improving programming skills in engineering education through problem-based game projects with Scratch. *Computers & Education*, 120, 64–74. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2018.01.011>

Nonlinear Storytelling Method and Tools for Low-Threshold Game Development

- Tran, K. M. (2016). “Her story was complex”: A Twine workshop for ten- to twelve-year-old girls. *E-Learning and Digital Media*, 13(5–6), 212–226.
<https://doi.org/10.1177/2042753016689635>
- Viitanen, K., Harju, V., Niemi, H., & Multisilta, J. (2014). Digitaalisen tarinankerronnan monet mahdollisuudet. In *Rajaton luokkahuone. Opetus 2000* (pp. 187–211). Jyväskylä: PSkustannus.
- W3C. (2017). HTML 5.2, W3C Recommendation, 14 December 2017. Retrieved May 14, 2019, from <https://www.w3.org/TR/html/>
- Wing, J. M. (2006). Computational Thinking. *Commun. ACM*, 49(3), 33–35.
<https://doi.org/10.1145/1118178.1118215>



Julkaisu X

Ojala, J., **Selin, J.**, Partala, T. & Rossi, M. (2020). Virtual Construction: Interactive Tools for Collaboration in Virtual Reality. *Advances in Intelligent Systems and Computing (FICC 2020)*, vol 1130. Springer, Cham. In book: *Advances in Information and Communication*, pp. 341-351. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39442-4_26

Julkaisukanavan taso: **JUFO 1**

© Springer 2020, Reprinted with permission.

Virtual Construction: Interactive Tools for Collaboration in Virtual Reality

Juha Ojala, Jukka Selin, Timo Partala^(✉), and Markku Rossi

South-Eastern Finland University of Applied Sciences,
Patteristonkatu 3, FI-50100 Mikkeli, Finland
{juha.ojala, jukka.selin, timo.partala,
markku.rossi}@xamk.fi

Abstract. Virtual technologies and game engines provide new possibilities for collaborative virtual design within digital building models. The current paper describes an approach, in which computer-aided design (CAD) models of buildings are transferred into a game engine based environment, where they can be reviewed and further designed collaboratively. Following a user-centered design (UCD) process based on interviews and iterative interactions with designers and architects, the prototype of Virtual Construction—a game engine based platform for collaborative virtual design meetings—was designed and implemented using Unreal Engine 4. The interactive tools developed can be used both in full immersive virtual reality and using traditional devices (e.g. laptop or desktop computers). Based on identified user needs, interaction techniques were implemented for moving, rotating, and aligning objects, adding and resizing shapes and objects, as well as moving and measuring distances in the three-dimensional (3D) building model. In addition, the communication techniques implemented based on user needs included synchronous features such as voice communication, text chat, pointing, and drawing, and asynchronous features such as leaving messages and feedback augmented with screenshots to exact virtual locations. Other implemented scenarios included different lighting scenarios, an evacuation scenario and crowdsourced voting between different designs.

Keywords: Virtual Construction · Collaborative design · User needs · Game engine

1 Introduction

Historically, building designs were visualized by producing two-dimensional architectural and technical drawings. They were followed by CAD tools, which enabled the creation of interactive 3D visualizations of buildings. The currently prevailing trend, Building Information Modelling (BIM), extends 3D building models by adding dimensions such as time (schedules), quantities, costs, and sustainability and risk analyses. BIM allows following the principles of Virtual Design and Construction (VDC), which among other things emphasizes the importance of visualization and collaboration during the building design phase [1, 2].

According to existing research, presenting building 3D models visually is a crucial part of planning, construction and maintenance phases in terms of collaboration and understanding [3]. Especially in complex or largescale models, immersion is one of the major key factors for being able to intuitively perceive all aspects of the scene. Detailed walk-in virtual models can quite accurately simulate the user experience of real, completed buildings after they have been taken into use [4]. While the visualization features in CAD and BIM software have improved, they still have some drawbacks, when it comes to collaborative visual building design.

For example, Kosmadoudi et al. [5] reviewed existing literature on design in CAD environments and presented examples of limitations associated with using CAD software including limited efficiency, limited creativity, potential lack of motivation, and limited possibilities for interaction. They suggested that these issues may be enhanced using game mechanics to provide more engaging and intuitive environments, which may also result in reduced task times and improved design-making. Lee et al. [6] explored 3D architectural and engineering design tools from a usability point of view and concluded that CAD systems have become overly complex since they are composed of several hundred menu items, which causes too much cognitive load on the users. The best practices they suggested for 3D design environments included maximization of workspace, graphical richness, direct manipulation, familiarity, and minimalistic design.

Game engines seem to offer solutions for minimizing the above-mentioned limitations and promoting best practices in building design. For example, games have been shown to generate cognitive engagement in engineering design due to their inherent interactivity, and they may even inculcate confidence [5]. Game engines allow for the development of real-time walk-through applications, using which different users can freely inspect different versions of building designs. This can add to the realism and immersion. Buildings can also be displayed under different lighting conditions, which is important, as there is evidence that buildings can be difficult to even recognize under different lighting conditions and methods of presentation [7, 8]. Game engines also have built-in multiplayer features with avatars and collision detection, which can be utilized in developing real-time collaborative systems for building design with communication and object manipulation features.

Game engines also offer advanced possibilities for creating virtual reality (VR) applications. Despite their potential in diverse tasks, VR systems have been used in construction mostly to explore finished designs rather than to create new ideas [9]. However, Moloney and Amor [10] suggested that game engine-based collaborative virtual environments are suitable to supporting the early stages of design where teams can collaborate and evaluate iterations at a relatively low level of detail. They emphasized the possibility for both, synchronous and asynchronous communication, supporting participatory and iterative design, as well as making intuitive of design decisions as the main motivators of using a collaborative virtual environment for building design. Recently, Lin et al. [11] studied VR-based design in practice and demonstrated that a BIM/VR based solution could increase communication efficiency, facilitate visual interactions, and ease decision-making in hospital design. Systems for collaborative multi-user VR such Glue [12] and Fake [13] have entered markets, but the related user needs in the context of construction remain largely unexplored in the literature.

The current paper contributes by presenting a user needs based approach for designing tools for interaction and virtual design and review meetings for the construction industry. A process for utilizing a game engine (Unreal Engine) in design and review of buildings is suggested. Based on the approach and a user-centered design process, a prototype platform and a set of tools for collaboration in building design were developed based on interviews and regular discussions with architects and designers.

2 An Approach for Bringing Building Information Models to Game Engines

We have developed a process and methods for bringing building information models to game engines in order to be able to view and manipulate them in virtual reality. In our process, there are two ways to bring the building information model with its metadata (e.g. manufacturer, material, and price for each component) into a game engine. If the Unreal Engine is used, the Datasmith add-on for Unreal Engine can be used to import a building information model or its parts. Datasmith is a collection of tools and plugins, which directly supports bringing content from more than 20 modeling formats into Unreal Engine 4. For example, if a model or a part of it has been created with Autodesk’s Revit software, it can be imported into the Unreal Engine with metadata directly in Revit’s native format. Figure 1 below illustrates the proposed process for bringing building models into game engines.

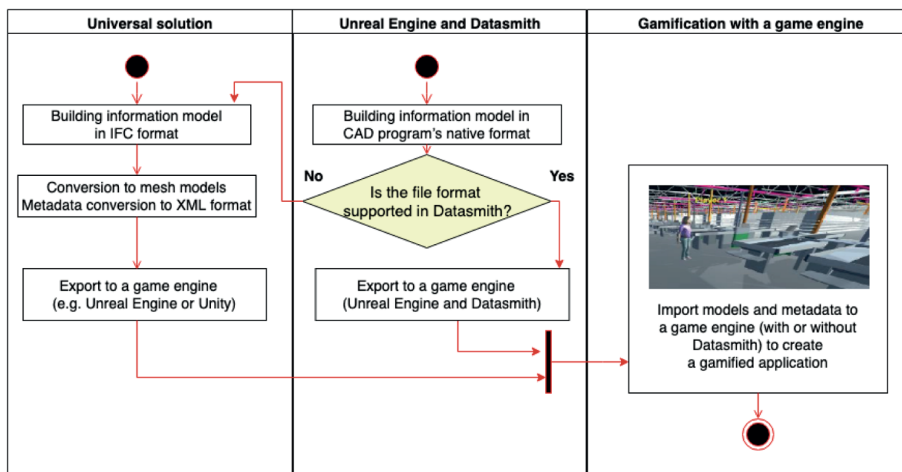


Fig. 1. A process for bringing building information models into game engines.

For a universal solution working with all the game engines and CAD software, the Industry Foundation Classes (IFC) format is the only possible option. The IFC format is the standard data storage and data transfer format for BIM. The IFC format is not

Table 1. (continued)

Need category	Needs
Access control and crowdsourcing	Default user group of all project members and private groups Involving end users of the building, “design your own work room” Crowdsourcing the design of public buildings Access control with high information security Easy versioning and version control
Special needs	Supporting design for accessibility Scenario and simulations for building evacuation

First, a design meeting focusing on the requirements of each company for collaborative virtual technology was arranged. Next, four in-depth user interviews were conducted. The interviewed persons were: a senior architect, a junior architect, a senior building designer, and a designer of industrial structures. The semi-structured interviews concentrated on understanding their work processes, communication during the processes, current use of tools and technology, and ideas for improved or new tools. The identified requirements and ideas were listed and categorized. The most central need categories and needs are summarized in Table 1 above. Interactive tools were designed based on the requirements. The designs were refined iteratively in the context of monthly meetings and special events (e.g. live demonstrations) over the course of more than one year.

3.2 Technology

The frontend application of the Virtual Construction platform was implemented using Unreal Engine 4 due to its superior visualization capabilities and more straightforward compatibility with CAD software. The server side backend was programmed using Node.js. HTTP calls and web sockets are used for communication between the frontend application and the backend. The system uses Vivox voice services for voice chat. The system has been tested with both HTC Vive Pro and Oculus Rift virtual reality headsets.

3.3 Interactive Tools

In virtual reality, the Virtual Construction application is optimized for the HTC Vive headset and its two motion-tracked handheld controllers (HTC Vive Wands). The viewpoint is changed by head movements, and basic pointing and selecting is carried out with the dominant hand controller using raycasting. The user points the ray from a virtual raygun towards the object to be selected and presses the primary button (HTC Vive Wand trigger) with the index finger. If an action with the selected tool can be performed on the object, its outlines are shown when pointed at, allowing the user to rapidly browse objects. Dragging objects is possible by pointing and selecting the object, holding the trigger down, moving the controller and releasing the trigger. In the default mode, virtual hands for moving objects are displayed.

The different tools implemented can be accessed from a radial menu activated by pressing the menu button of controller. The menus and dialogs are operated using two hands so that the 2D menu or dialog can be moved with the non-dominant hand, and pointing and selecting items is carried out with raycasting as in interaction with the 3D objects. The default method for moving both shorter and longer distances in virtual reality is to teleport to visible locations. This is achieved by pressing the controller touchpad button, moving the controller so that the ray ends at a desired position on ground or floor, and releasing the touchpad button. Thus, the technique used for moving is a type of specified coordinate movement [14].

Interaction and Communication Techniques. The different interaction and communication techniques designed and implemented for VR are displayed in Figs. 2 and 3 below. Fairly detailed descriptions are given for each technique to give the readers the possibility to adopt the techniques in their VR developments.

Floor Plan and Guidance. Using the map tool, a 2D architectural floor plan of the premises appears on a sign on the user's non-dominant hand (Fig. 4, left). The architectural plan can help in understanding the overall design of the building. It also acts as a map, in which the user's current location is indicated, and the user can point and select a destination on the plan with the raygun and the trigger. The user gets guidance to the selected location. The user can also see the locations of other users in the same virtual model. The guidance is drawn as arrows on the floor on walkable routes (Fig. 4, right). If the user points the map with the raygun and selects a location with the touchpad button, he/she is directly teleported to that location.

Crowdsourcing and Voting. Opinions and votes can be gathered from the end users of the building or the general public in the case of public buildings. After completing a registration, end users can inspect the model freely, leave location-specific feedback (see Fig. 3), and participate in voting. Voting buttons can be added to rooms (Fig. 5). After selecting the voting button, the user can toggle between predefined alternatives for, for example, furniture, layouts, materials and colors, or lighting by selecting the number of the option in the voting dialog, and give her/his vote after inspection.

Scenarios for Visualization. The developed platform allows the selection of one of the (currently eight) available visualization scenarios to display 3D models of buildings under different lighting conditions from the menu. An example of visualizing a building under normal lighting conditions and in an evacuation mode is presented in Fig. 6.



Fig. 2. Descriptions and illustrations of the developed interaction techniques.

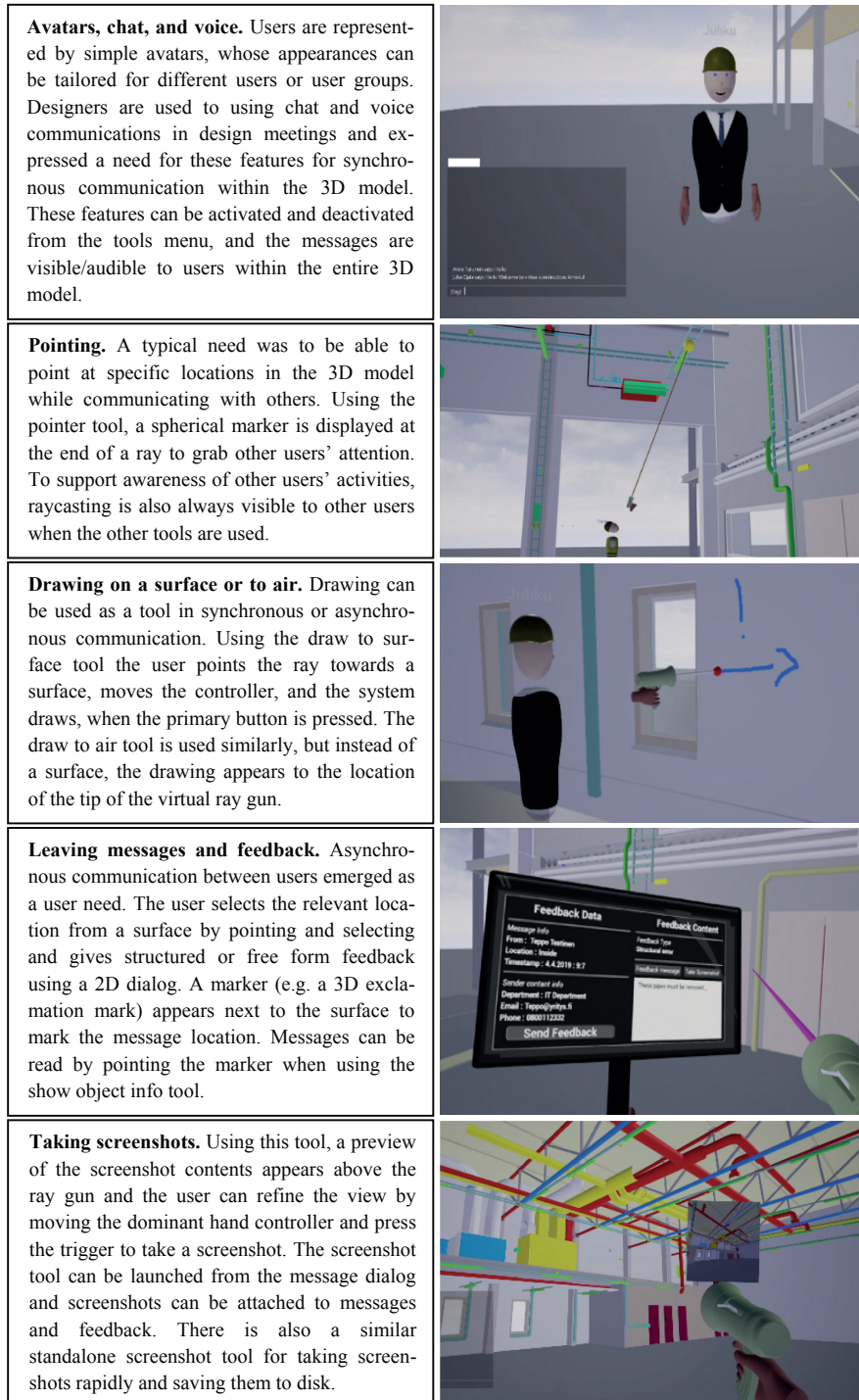


Fig. 3. Descriptions and illustrations of the developed communication techniques.

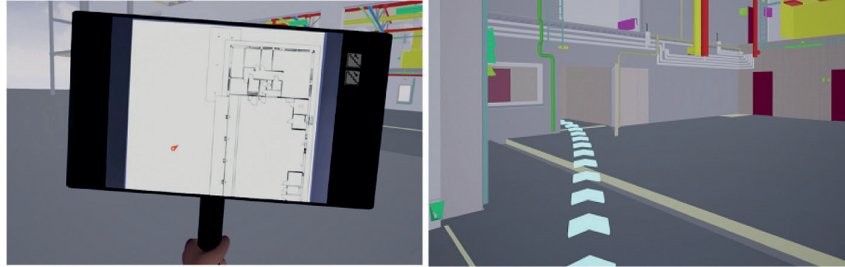


Fig. 4. The floor plan (left) and route instructions to a destination (right)



Fig. 5. Buttons can be added to rooms for toggling between alternatives and voting.



Fig. 6. A building interior in normal lighting and in an evacuation scenario

4 Conclusion

The introduction of virtual design meetings and asynchronous communication within 3D models has potential for significantly improving visual design and communication during construction projects, resulting in more desirable buildings. This article described our approach for bringing building information models to game engines and utilizing the advanced features of the Unreal 4 game engine to develop a platform with tools for collaboration and visualization of buildings.

The Virtual Construction platform was developed based on the principles of user-centered design, which ensured that the platform was developed based on real needs of

companies operating in construction industry. It was noticed early that different stakeholders in the construction industry have different user needs for a virtual collaboration platform. The user needs were found out by involving 10 senior and junior members of staff from the participating companies in an iterative development process with monthly group discussions and four in-depth interviews.

The identified user needs for a virtual platform for construction can be roughly categorized to needs for advanced immersive visualizations, needs for advanced virtual tools for both synchronous and asynchronous communication, needs for access control and crowdsourcing, and special needs including designing for accessibility and evacuation, which are obligatory design issues in construction projects. The participants also expressed the general need for an integrated solution for communication, visualization and modification of plans collaboratively in real time.

The current solution already implements many features based on the most important needs expressed by the participants of the current study. The tools for virtual reality were designed from scratch based on the user needs and capabilities made possible by Unreal Engine 4, and they are reported in this article in detail. Naturally, existing ideas have also been utilized. For example, drawing and annotations have been previously found to enhance collaboration in design review meetings [15]. We suggest that the current approach and tools developed based on matching user needs to features of a game engine offer a noteworthy alternative to existing systems and developments.

The logical next step is to test the developed tools in a study involving real construction projects. In the future, the current platform can be extended into a more holistic system for managing digital twins of buildings. In addition to the design phase, game engine based visual solutions bring potential benefits in the construction and maintenance phases. For example, the current platform could also support augmented reality based viewing of building 3D models in the construction phase and visualizing measurement data from completed buildings in the maintenance phase.

Acknowledgments. The authors would like to thank everybody who participated in the current study. This research was funded by Business Finland from the European Regional Development Fund (project A73293) and by the participating companies.

References

1. Kunz, J., Fischer, M.: Virtual design and construction: themes, case studies and implementation suggestions. Working Paper #097, Center for Integrated Facility Engineering (CIFE), Stanford University (2012)
2. Waly, A.F., Thabet, W.Y.: A virtual construction environment for preconstruction planning. *Autom. Constr.* **12**(2), 139–154 (2003)
3. Hilfert, T., König, M.: Low-cost virtual reality environment for engineering and construction. *Vis. Eng.* **4**(2), 1–18 (2016)
4. Kuliga, S.F., Thrash, T., Dalton, R.C., Hölscher, C.: Virtual reality as an empirical research tool—exploring user experience in a real building and a corresponding virtual model. *Comput. Environ. Urban Syst.* **54**, 363–375 (2015)

5. Kosmadoudi, Z., Lim, T., Ritchie, J., Louchart, S., Liu, Y., Sung, R.: Engineering design using game-enhanced CAD: the potential to augment the user experience with game elements. *Comput. Aided Des.* **45**(3), 777–795 (2013)
6. Lee, G., Eastman, C.M., Taunk, T., Ho, C.H.: Usability principles and best practices for the user interface design of complex 3D architectural design and engineering tools. *Int. J. Hum Comput Stud.* **68**(1–2), 90–104 (2010)
7. Partala, T., Nurminen, A., Vainio, T., Laaksonen, J., Laine, M., Väänänen, J.: Saliency of visual cues in 3D city maps. In: *Proceedings of the 24th BCS Interaction Specialist Group Conference*, pp. 428–432 (2010)
8. Partala, T., Salminen, M.: User experience of photorealistic urban pedestrian navigation. In: *Proceedings of the International Working Conference on Advanced Visual Interfaces, AVI 2012*, pp. 204–207 (2012)
9. de Klerk, R., Duarte, A.M., Medeiros, D.P., Duarte, J.P., Jorge, J., Lopes, D.S.: Usability studies on building early stage architectural models in virtual reality. *Autom. Constr.* **103**, 104–116 (2019)
10. Moloney, J., Amor, R.: StringCVE: Advances in a game engine-based collaborative virtual environment for architectural design. In: *Proceedings of CONVR 2003 Conference on Construction Applications of Virtual Reality*, pp. 156–168 (2003)
11. Lin, Y.C., Chen, Y.P., Yien, H.W., Huang, C.Y., Su, Y.C.: Integrated BIM, game engine and VR technologies for healthcare design: a case study in cancer hospital. *Adv. Eng. Inform.* **36**, 130–145 (2018)
12. Glue – Universal Collaboration Platform. <https://glue.work/>. Accessed 30 Aug 2019
13. Fake multi-user VR/AR – Next level meetings and collaboration. <http://www.fake.fi/multiuser>. Accessed 30 Aug 2019
14. Mackinlay, J.D., Card, S.K., Robertson, G.G.: Rapid controlled movement through a virtual 3D workspace. *Comput. Graph.* **24**(4), 171–176 (1990)
15. Bassanino, M., Fernando, T., Wu, K.C.: Can virtual workspaces enhance team communication and collaboration in design review meetings? *Archit. Eng. Des. Manag.* **10**(3–4), 200–217 (2014)

Details of the dissertations are available at
<https://research.tuni.fi/tauchi/dissertations/>

1. **Timo Partala:** Affective Information in Human-Computer Interaction
2. **Mika Käki:** Enhancing Web Search Result Access with Automatic Categorization
3. **Anne Aula:** Studying User Strategies and Characteristics for Developing Web Search Interfaces
4. **Aulikki Hyrskykari:** Eyes in Attentive Interfaces: Experiences from Creating iDict, a Gaze-Aware Reading Aid
5. **Johanna Höysniemi:** Design and Evaluation of Physically Interactive Games
6. **Jaakko Hakulinen:** Software Tutoring in Speech User Interfaces
7. **Harri Siirtola:** Interactive Visualization of Multidimensional Data
8. **Erno Mäkinen:** Face Analysis Techniques for Human-Computer Interaction
9. **Oleg Špakov:** iComponent – Device-Independent Platform for Analyzing Eye Movement Data and Developing Eye-Based Applications
10. **Yulia Gizatdinova:** Automatic Detection of Face and Facial Features from Images of Neutral and Expressive Faces
11. **Päivi Majaranta:** Text Entry by Eye Gaze
12. **Ying Liu:** Chinese Text Entry with Mobile Phones
13. **Toni Vanhala:** Towards Computer-Assisted Regulation of Emotions
14. **Tomi Heimonen:** Design and Evaluation of User Interfaces for Mobile Web Search
15. **Mirja Ilves:** Human Responses to Machine-Generated Speech with Emotional Content
16. **Outi Tuisku:** Face Interface
17. **Juha Leino:** User Factors in Recommender Systems: Case Studies in e-Commerce, News Recommending, and e-Learning
18. **Joel S. Mtebe:** Acceptance and Use of eLearning Solutions in Higher Education in East Africa
19. **Jussi Rantala:** Spatial Touch in Presenting Information with Mobile Devices
20. **Katri Salminen:** Emotional Responses to Friction-based, Vibrotactile, and Thermal Stimuli
21. **Selina Sharmin:** Eye Movements in Reading of Dynamic On-screen Text in Various Presentation Formats and Contexts
22. **Tuuli Keskinen:** Evaluating the User Experience of Interactive Systems in Challenging Circumstances
23. **Adewunmi Obafemi Ogunbase:** Pedagogical Design and Pedagogical Usability of Web-Based Learning Environments: Comparative Cultural Implications from Africa and Europe
24. **Hannu Korhonen:** Evaluating Playability of Mobile Games with the Expert Review Method
25. **Jani Lylykangas:** Regulating Human Behavior with Vibrotactile Stimulation
26. **Ahmed Farooq:** Developing Technologies to provide haptic feedback for surface based interaction in mobile devices
27. **Ville Mäkelä:** Design, Deployment, and Evaluation of Gesture-Controlled Displays in Ubiquitous Environments
28. **Pekka Kallioniemi:** Collaborative Wayfinding in Virtual Environments

29. **Sumita Sharma:** Collaborative Educational Applications for Underserved Children: Experiences from India
30. **Tomi Nukarinen:** Assisting Navigation and Object Selection with Vibrotactile Cues
31. **Akkil, Deepak:** Gaze Awareness in Computer-Mediated Collaborative Physical Tasks
32. **Toni Pakkanen:** Supporting Eyes-Free User Interaction with Vibrotactile Haptification of User Interfaces
33. **Antti Sand:** On Adding Haptic Feedback to Interaction with Unconventional Display Devices
34. **Jukka Selin:** Tietomallin pelillistäminen ja toiminnallisen suunnittelun menetelmä rakennusten suunnittelun apuna

Nykyisin rakennussuunnittelussa on laajalti siirrytty kolmiulotteiseen suunnitteluun ja tietomallinnukseen. Tietomallinnusta kutsutaan yleisesti nimellä BIM (Building Information Modeling). Tietomallin pelillistäminen avaa uudenlaisia mahdollisuuksia rakennusten suunnittelulle. Tässä väitöskirjassa esitetään ideoita ja menetelmiä, sekä niiden testaamiseksi toteutettuja pilotointeja tietomallin pelillistämiseksi ja pelillistetyn tietomallin hyödyntämiseksi rakennuksen elinkaaren eri vaiheissa suunnittelusta aina rakennuksen ylläpitoon asti. Merkittävimmät aihealueet ovat tilantarpeiden mitoitus, esteettömyys, turvallisuus ja suunnittelun joukkoistaminen.

Tavoitteena oli rakennuksessa tapahtuvan toiminnallisuuden parempi huomioiminen rakennussuunnittelussa. Lisäksi tavoitteena oli rakennuksen tietomallin pelillistämismenetelmien, sekä rakennussuunnittelun joukkoistamisen menetelmien kehittäminen. Väitöskirjaan liittyen toteutettiin joukko pilotointeja yhdessä yhteistyökumppaneinamme toimineiden rakennusalan yritysten kanssa. Tuloksia kerättiin pääasiassa osallistuvan havainnoinnin ja haastattelututkimusten avulla. Saadut tulokset osoittivat, että väitöskirjassa esitettävät ideat ja menetelmät tuovat lisäarvoa tilojen mitoitukseen, tietomallin pelillistämiseen ja pelillistetyn tietomallin erilaiseen hyödyntämiseen.

