



Karelia-ammattikorkeakoulu
Talotekniikan insinööri (AMK)

Wärtsilän C-osan TATE-mallintaminen ja sen käyttö Digital Twin-hankkeessa

Henri Häkkinen, Henri Tolvanen

Opinnäytetyö, Huhtikuu 2023

www.karelia.fi



OPINNÄYTETYÖ
Huhtikuu 2023
Talotekniikan koulutus

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
+358 13 260 600

Tekijä(t)
Henri Häkkinen, Henri Tolvanen

Nimeke
Wärtsilän C-osan TATE-mallintaminen ja sen käyttö Digital Twin-hankkeessa

Toimeksiantaja
Digital Twin -hanke

Tiivistelmä

Opinnäytetyön tarkoituksena oli mallintaa Wärtsilä rakennuksen C-osan vesi- ja viemäri-järjestelmä, lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmä sekä ilmanvaihtojärjestelmä, jonka jälkeen mallia voidaan käyttää rakennuksen digitaalisen kaksosen toteutuksessa. Työ tehtiin toimeksiantona, toimeksiantaja oli Karelian Digital Twin -hanke.

Käytössä oli arkkitehdin tekemä IFC-malli Wärtsilä-kampuksen rakennuksista, osittainen IFC-malli nykyisestä talotekniikasta sekä hajanaisia 2D-suunnitelmia kampuksen C-osan talotekniikasta. Mittauksia tehtiin laseretäisyysmittarilla putkistojen ja kanavistojen korkojen selvittämiseksi ja virtaamia mitattiin pistokokeilla eri venttiileistä sekä päätelaitteista. Vesivirrat mitattiin TA Scopella ja ilmavirrat Swema 3000md -monitoimimittarilla. Mittaukset dokumentoitiin osin valokuvaamalla ja osin saatuihin pohjakuviin merkitsemällä. Talotekniikka mallinnettiin uudelleen vanhojen suunnitelmien pohjalta MagiCad for Autocadia käyttäen ja mallia tutkittiin Solibri Officella.

Valmiista mallista voi tarkastella esimerkiksi eri järjestelmien virtaamia sekä komponenttien muutosten vaikutusta eri tilojen toimintaan. Mitattuja arvoja voi verrata suunniteltujen sekä toteutuneiden väliltä. Työstä saa myös käsitystä siitä, minkälaisia eri työvaiheita liittyy jo olemassa olevan rakennuksen talotekniikan mallintamiseen rakenteita rikkomatta. Hallitus on esittänyt eduskunnalle säädettäväksi uuden rakennuslain, jossa rakennuslu-paprosessia ollaan siirtämässä tietomallipohjaiseksi. Tiedot tulisi esityksen mukaan laatia yhteentoimivassa ja koneluettavassa muodossa sekä tietomallimuotoisena jo 2024 läh-tien ja viimeistään 2027.

Kieli
suomi

Sivuja 37

Asiasanat
talotekniikka, tietomalli, digitaalinen kaksonen



THESIS
April 2023
Degree Programme in Building Services Engineering

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
FINLAND
+ 358 13 260 600

Author (s)
Henri Häkkinen, Henri Tolvanen

Title
HVAC modelling of Wärtsilä Building's Section C and its use in the Digital Twin project

Commissioned by
Digital Twin project

Summary

The purpose of the thesis was to model the HVAC systems of section C of the Wärtsilä building, after which the model can be used in the Digital Twin project. The work was carried out as a commission, the client was the Karelian Digital Twin project.

The available data was an IFC model of Wärtsilä building by an architect, a partial IFC model of the existing HVAC system and partial 2D HVAC plans of the building's section C were in use. Measurements were made with a laser rangefinder to determine the height of pipelines and ductwork, and flows were measured with spot checks from different valves and terminals. Water flows were measured with the TA Scope and air flows with the Swema 3000md multifunction meter. The measurements were documented partly by photographing and partly by writing on the floor plans obtained. HVAC systems were remodeled on the basis of old plans using MagiCad for Autocad and the model was examined with Solibri Office.

From the finished model, you can examine, for example, the flows of different systems and the effect of changes in components on the operation of different spaces. The measured values can be compared between planned and actual system. This thesis also gives an idea of what kind of different stages of work are involved in modeling the HVAC system of an existing building without breaking the structures. The Government has proposed to the Parliament that a new building act be enacted, in which the building permit process is about to be moved to be BIM-based. According to the proposal, the data should be produced in interoperable and machine-readable form and in data model format as early as 2024 and no later than 2027.

Language
Finnish

Pages 37

Keywords
HVAC, data model, digital twin

Sisältö

1	Johdanto	5
2	Tietoperusta	5
2.1	Tietomallinnus - BIM (Building Information Modeling).....	5
2.2	Tietomallin tulevaisuus	7
2.3	Digital twin	8
2.4	Yleiset tietomallivaatimukset 2012 (YTV2012) ja mallinnusohjelmat ...	9
2.5	Standardit ja ohjeet.....	10
2.5.1	Lämmitysverkostojen vesivirtaaman mittaus.....	10
2.5.2	Ilmanvaihtojärjestelmän ilmavirtojen mittaus.....	11
2.6	Mittalaitteet	11
3	Mittaukset	16
4	TATE-mallintamisen työvaiheet	17
4.1	Alkutoimenpiteet	17
4.2	Dokumentointi ja tarkemittaukset.....	18
4.3	Mallintaminen.....	24
4.4	MagiCAD projekti.....	25
4.5	Mallin tarkastelu.....	29
5	Digital Twin -hanke	32
6	Pohdinta.....	33
	Lähteet.....	36

1 Johdanto

Opinnäytetyön toimeksiantajana on Karelian Digital Twin -hanke. Työn aiheena on Wärtsilä-kampuksen C-osan talotekniikan mallintaminen ja sen käyttö rakennuksen digitaalisen kaksosen toteutuksessa. Opinnäytetyön tarkoituksena on mallintaa Wärtsilä-kampuksen C-osan vesi- ja viemärijärjestelmä, lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmä sekä ilmanvaihtojärjestelmä.

Wärtsilä-kampuksen C-osaa on remontoitu ajan saatossa ja viimeisin iso toteutunut remontti oli vuonna 2019, jolloin koulun ruokala uusittiin. Tämän remontin suunnitelmista ei ole käytössä korjattuja versioita, joten työn onnistumiseksi kerrokset ja tilat täytyy käydä läpi fyysisesti paikan päällä sekä dokumentoida muutokset saatuihin pohjakuviin. Kaikkia muutoksia ei ole mahdollista selvittää rakenteita rikkomatta, joten täyttä varmuutta muutoksista ei joissain kohdin ole. Vesi- ja ilmavirtaamat täytyi mitata, jolloin näitä tietoja voi verrata alkuperäisen suunnitelman, tehdyn mallin ja toteutuneiden virtaamien arvojen välillä. Käytössä oleva tietomalli rakennuksesta ei joiltain osin vastaa todellisuutta, mikä tuottaa hankaluuksia talotekniikan sovittamisesta malliin. Tavoitteena on tehdä käytössä olevien suunnitelmien sekä tutkimusten pohjalta ajantasaiset versiot, joita voidaan käyttää Digital Twin -hankkeessa.

2 Tietoperusta

2.1 Tietomallinnus - BIM (Building Information Modeling)

Tietomalli tarkoittaa rakennuksen kolmiulotteista mallia, johon on lisätty käytännössä kaikki tiedot, jotka rakennus tulee sisältämään. Tietomalli sisältää esimerkiksi kappalemäärät, mitat sekä massat. Tietomallintaminen on prosessi, jossa hyödynnetään yhtä tietoympäristöä kaikkien rakennushankkeissa työskentelevien osapuolien kesken. (Solibri 2022.)

Tietomallia voidaan hyödyntää koko rakennuksen elinkaaren ajan aina rakentamisvaiheesta kiinteistönhallintaan sekä korjaussuunnitelmien tekemiseen. Tärkein hyöty tietomallintamisessa on rakentamisaikaisten virheiden minimointi sekä niiden kokonaisvaltainen poistaminen sekä välttäminen. Kun rakennus rakennetaan tietomallin mukaisesti, siitä saadaan suurin hyöty. (Solibri 2022.)

Projektien aikana voidaan saavuttaa erilaisia BIM-tasoja. Tasot alkavat nollasta ja menevät jopa 6D BIM-tasoon asti. Tasojen tarkoituksena on kertoa kuinka tehokkaasti tai kuinka paljon tietoa jaetaan ja hallinnoidaan prosessin aikana. (Trimble 2022.)

Pienimmällä tasolla eli 0-tasolla käytetään paperisia suunnitelmia. Tasoon 0 kuuluu myös 2D CAD (Computer-aided Design) ja digitaalisten piirustusten ja/tai tulosteiden kanssa työskentely. Tasolla 1 käytetään 3D-konsepteja, mutta 2D-suunnitelmia. Monet yritykset ovat tasolla 1, jossa ei tehdä paljoa yhteistyötä muiden kanssa ja jokainen sidosryhmä julkaisee ja hallitsee omaa dataansa. (Trimble 2022.)

Tasolla 2 yhteistyö alkaa lisääntyä ja kaikki osapuolet käyttävät 3D CAD-mallia, mutta eivät välttämättä samaa mallia. Kun yritykset yhdistävät tiedot keskenään, niin silloin säästyy aikaa, kustannukset pienenevät ja muutosten tekemisen tarve vähenee. Tietoja vaihdetaan yhteisen tiedostomuodon avulla, joka erottaa tason 2 muista tasoista. Yhteinen tiedostomuoto täytyy olla sellainen, jonka CAD-ohjelmisto kykenee viemään, eli esimerkiksi IFC (Industry Foundation Classes) tai COBie (Construction Operations Building Information Exchange). (Trimble 2022.)

Tasolla 3 osapuolet työskentelevät saman 3D-mallin kanssa. Tällä tasolla yhteistyö on entistäkin tiiviimpää. Projektimalli sijaitsee keskitetyssä ympäristössä, johon jokainen pääsee käsiksi ja voi muokata sitä. Tätä kutsutaan Open BIM:iksi. Tämän tason suurimmat hyödyt ovat: koko projektin parempi 3D-visualisointi, helpottaa yhteistyötä alojen kesken, viestintä on yksinkertaista ja projektin muutostarpeet vähenevät entisestään. (Trimble 2022.)

Neljännellä tasolla tulee tietomalliin mukaan myös aika. Tämä tieto sisältää aikataulutietoja, joka auttaa hahmottamaan kuinka paljon projektin eri vaiheet kestävät. Viidennellä tasolla tietomalliin lisätään kustannusarvioita, budjetti-analyysijä ja budjettiseuranta. Tämä auttaa projektin omistajia seuraamaan mitä kustannuksia hankkeesta tulee. (Trimble 2022.)

Tason 6 BIM-tietoja hyödynnetään rakennuksen energiankulutuksen laskemiseen jo ennen sen rakentamista. Tällä varmistetaan, että suunnittelijat ottavat huomioon myös rakennuksen energiankulutuksen eikä pelkästään rakentamisen aiheuttamat kustannukset. Taso takaa myös tarkat ennusteet energiankulutusvaatimuksista, joka rohkaisee sidosryhmiä rakentamaan energiatehokkaita ja kestäviä rakennuksia. (Trimble 2022.)

2.2 Tietomallin tulevaisuus

Hallitus on esittänyt eduskunnalle säädettäväksi uuden rakennuslain HE 139/2022 vp, jossa rakennuslupaprosessia ollaan siirtämässä tietomallipohjaiseksi.

Valtakunnallisen rakennetun ympäristön digitaalisen tietojärjestelmän aikaansaamiseksi lupaprosessi perustuisi tietomalleihin. Suunnitteluvaiheen suunnitelmamalli mahdollistaisi myös lisätyn todellisuuden käyttämisen rakentamislupien yhteydessä. Loppukatselmuksen yhteydessä luovutettava toteumamalli antaisi perustan luotettavalle digitaaliselle tallennukselle sekä rakennetun ympäristön ajantasaiselle tietojärjestelmälle, jota voitaisiin hyödyntää rakennuksen korjaus- ja muutostöissä. (Eduskunta 2022.)

esityksen mukaan uuden lain yksi keskeisiä tavoitteita on valtakunnallinen digitaalinen rekisteri ja tietoaalusta rakennetulle ympäristölle. Digitaalisuus on yksi keskeinen väline hiilineutraaliustavoitteen sekä kiertotalouden kanssa. Rakennusten suunnittelussa käytetään tietomallintamista jo nyt suurelta osin eri alojen toimesta. (Eduskunta 2022.)

Suunnittelussa ja toteutuksessa kertyvä tieto kerättäisiin kansalliselle alustalle. Näitä tietoja tarvitseva voisi hakea ne alustalta, mutta se vaatisi tietojen yhteensopivuutta sekä määrämuotoisuutta toimiakseen. Ehdotuksen yhtenä tavoitteena on saada aikaan rakennetusta ympäristöstä ”digitaalinen kaksonen” eli ”digital twin”. Vaatimuksena on, että tietojen pitää olla yksilöitävissä ja tunnistettavissa, jotta niitä voidaan käyttää ja tiedostomuotojen tulisi olla koneluettavia. BIM-tietomallit täyttävät koneluettavuuden vaatimukset. Koneluettavaksi tietorakenteeksi hyväksytään myös pdf-tuloste, jos sen yhteydessä toimitetaan tarvittavat lisätiedot sisältävä taulukkotiedosto. (Eduskunta 2022.)

Esityksessä mainitaan ajankohta, jolloin kuntien tulisi viimeistään julkaista rakennetun ympäristön tiedot tietojärjestelmään lain voimaantulon jälkeen. Esityksen mukaan tiedot tulisi laatia tietomallimuotoisena sekä yhteensopivassa ja koneluettavassa muodossa 1.1.2024 lähtien sekä tiedot tulisi tallentaa tietojärjestelmään 1.1.2027. (Eduskunta 2022.)

Koska rakennuksien vaatimukset kasvavat tulevaisuudessa sekä eri suunnittelualojen yhteistyö tiivistyy rakennushankkeissa, on tietomallinnus vakiinnuttanut paikkansa rakennusten sekä talotekniikan suunnittelussa selkeiden etujensa vuoksi. (Solibri 2022.)

2.3 Digital twin

Digital twin eli digitaalinen kaksonen on olemassa olevien järjestelmien ja hyödykkeiden virtuaalinen malli. Näitä malleja voidaan hyödyntää esimerkiksi suunniteltaessa ympäristöä ja rakennuksia. Malleista on mahdollista kerätä lähes reaaliaikaista tietoja sekä analysoida näitä saatuja tietoja. Esimerkiksi rakennuksesta tehdyssä mallissa voidaan testata erilaisia muutoksia ja seurata mitä rakennuksessa tapahtuu, ennen kuin se toteutetaan fyysisessä rakennuksessa. (Maanmittauslaitos 2023.)

Digitaalisesta kaksosesta on monia määritelmiä. Eri toimialat voi määrittellä digitaalisen kaksosen eri tavalla, mutta määritelmiä voi olla erilaisia myös saman toimialan sisällä. Rakentamisalalle digitaalinen kaksonen antaa paljon erilaisia mahdollisuuksia tehokkuuden, kestävyuden ja kannattavuuden parantamiseen. Rakennus- ja kiinteistöalalla digitaalinen kaksonen on fyysisen rakennuksen, paikan, esineen, ihmisen tai järjestelmän digitaalinen kopio. Rakennuksesta luodaan digitaalinen kaksonen tietomallintamalla. Pelkkä tietomallintaminen ei kuitenkaan riitä, jotta rakennusta voitaisiin kutsua digitaalseksi kaksosiksi. Digitaalisessa kaksosessa päätoimintoja on kaksi: sen täytyy olla linkitettävissä fyysiseen oikeaan vastineeseen sekä näiden kahden välillä pitää kulkea reaaliaikaista tietoa. (Nordicbim 2023.)

Digitaalisen kaksosen avulla voi hallita kiinteistöön liittyvää tietoa sekä ylläpitoa. Dataa kerätään jo suunnittelun aikana tehdyistä tietomalleista ja automaatio- sekä IoT (Internet Of Things) -järjestelmistä. Myös kiinteistöä käyttäviltä saadaan dataa. Digital twinin sisältämän datan avulla voidaan seurata rakennuksien eri tilojen olosuhteita. Mallista voi nähdä myös, mitä talotekniikkaa rakennus pitää sisällään sekä missä ne sijaitsevat. (Granlund 2023.)

2.4 Yleiset tietomallivaatimukset 2012 (YTV2012) ja mallinnusohjelmat

YTV 2012 eli Yleiset tietomallivaatimukset 2012 on julkaisusarja, joka sisältää ohjeita ja standardeja sekä vähimmäisvaatimukset mallien tietosisällölle ja mallintamiselle. Se on 14-osainen sarja, joka on laajapohjaisen COBIM-kehittämissankkeen tulos. (RT 10-11066, 2012.)

Julkaisusarjasta löytyy omat osionsa aina lähtötilanteen mallintamisesta tietomallien hyödyntämiseen rakennusvalvonnassa. Jokaisessa osiossa on selitetty tarkasti mitä jokainen vaihe pitää sisällään ja vaatimukset näille. Julkaisusarja on vapaasti luettavissa buildingSMART Finlandin Wiki -osiosta. (buildingSMART Finland 2022.)

MagiCAD on Ivia (lämpö, vesi, ilmanvaihto ja automaatio) - ja sähkösuunnitteluun tehty suunnitteluohjelmisto. Sitä käytetään 80 eri maassa ympäri maailmaa. MagiCAD sisältää standardien mukaiset laskentatoiminnot sekä sen käyttämät BIM-objektit vastaavat oikeita fyysisiä tuotteita. Se sisältää myös laajan kirjaston eri laitevalmistajien tuotteita. MagiCAD on integroitu kokonaan Autodeskin AutoCAD- sekä Revit- alustoihin. (MagiCAD 2023.)

Solibri Office on tietomallien laadunvarmistussovellus. Suunnitteluvaiheessa suunnitelmista voidaan luoda mallit, jotka yhdistetään yhdeksi yhdistelmämalliksi Solibrissa. Yhdistelmämallille voidaan tehdä laaduntarkistus, jonka avulla pystytään kommunikoimaan mahdollisesti löytyneistä ongelmakohtista ja järjestelmien törmäilyistä. Sovellus sisältää laadunvarmistukseen määritellyt säännöt, joita voi muokata ja räätälöidä omiin tarpeisiin. (Solibri 2023.)

2.5 Standardit ja ohjeet

RT-kortisto on ammattilaisten tarpeisiin tehty laajin ja jatkuvasti päivittyvä tietopalvelu. Kortistosta löytyy lait ja määräykset, ohjeita ja tuotetietoja sekä yleisiä laatuvaatimuksia. (Rakennustieto 2023.)

LVI-kortistosta löytää ohjeita suunnitteluun, asennukseen ja huoltoon. Se sisältää myös tietoa LVI-mittauksista sekä sieltä löytää tehtäväluettelot, sopimusmallit ja kiinteistönpitokirjan. Ohjeita päivitetään jatkuvasti, joten se on erittäin pätevä työkalu asentajille, suunnittelijoille ja valvojille. (Rakennustieto 2023.)

Päästäkseen käyttämään LVI-kortistoa se vaatii käyttäjältään lisenssin.

2.5.1 Lämmitysverkostojen vesivirtaaman mittaus

Mitattaessa virtaamia paine-eroon perustuvalla menetelmällä vesivirta määritetään epäsuorasti mittaamalla paine-ero säätöventtiilin yli ja sen perusteella määritetään vesivirta. Mittarina voi käyttää paine-eromittaria, jonka letkut voidaan liittää venttiilissä oleviin mittausyhteisiin. Jos käytetään pelkkää painemittaria, täytyy paine-erolukema muuntaa ominaiskäyrästä avulla, josta saadaan

selville virtaustiedot. Mittausten teko helpottuu, jos käytettävissä on ohjelmoitu digitaalinen mittari, joka tekee laskelmat automaattisesti. (RT LVI 014-10291, 1999, 1.)

Verkoston tasapainotuksessa ja mitattaessa vesivirtoja käytetään ohjelmoitua digitaalista mittalaitetta. Mittalaite mittaa veden virtaukset, paine-erot ja lämpötilat. Digitaalinen mittalaite hyödyntää mitattua paine-eroa ja laitteeseen tallennettuja venttiilikäyrästöjä tai käsin syötettyä k_v arvoa laskettaessa veden virtaamaa. (RT LVI 014-10291, 1999, 2.) ”Mittauksia voidaan tehdä paine-eroille välillä 0,5 ... 200 kPa lämpötilojen ollessa alueella -20 °C ... +120 °C.” (RT LVI 014-10291, 1999, 2)

2.5.2 Ilmanvaihtojärjestelmän ilmavirtojen mittaus

Ilmastointijärjestelmissä paine-eromittauksia tehdään kanavistojen tasapainotuksen yhteydessä, pääte-elimien ilmavirtoja määriteltäessä tai huoneiden ilmanvaihtoa määriteltäessä. Ilmavirtoja ja ilman nopeuksia mitataan pääte-elimistä ja kanavistoista silloin, kun halutaan selvittää, täyttyykö ilmanvaihdolle asetetut vaatimukset. Huonetiloissa ilman virtauksia tutkitaan silloin, kun pyritään selvittämään mikä aiheuttaa vetoa tai kun halutaan selvittää rakennuksen painesuhteita. (RT LVI 014-10290, 1999, 7-8.)

2.6 Mittalaitteet

Trotec BD21 laseretäisyysmittari on käsimittari, jolla voi mitata aloja, etäisyyksiä ja tilavuuksia (Kuva 1). (Trotec 2023.)



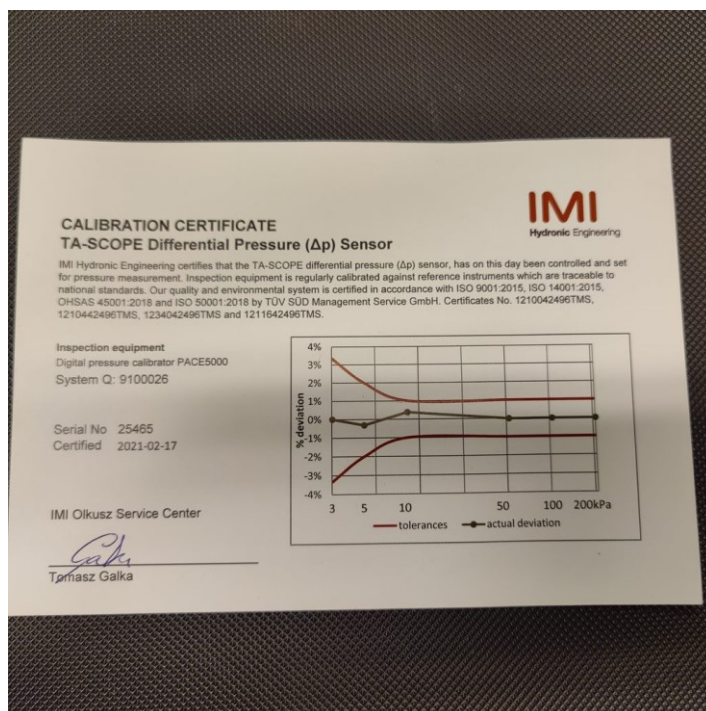
Kuva 1. Trotec BD21.

TA-Scope on lämmitys- ja jäähdytysverkostojen paine-erojen, virtausten, lämpötilojen ja tehojen mittaus- ja dokumentointilaitte (Kuva 2). (IMI-Hydronic 2023.)

Mittarissa on voimassa oleva kalibrointitodistus (Kuva 3).



Kuva 2. TA-Scope.

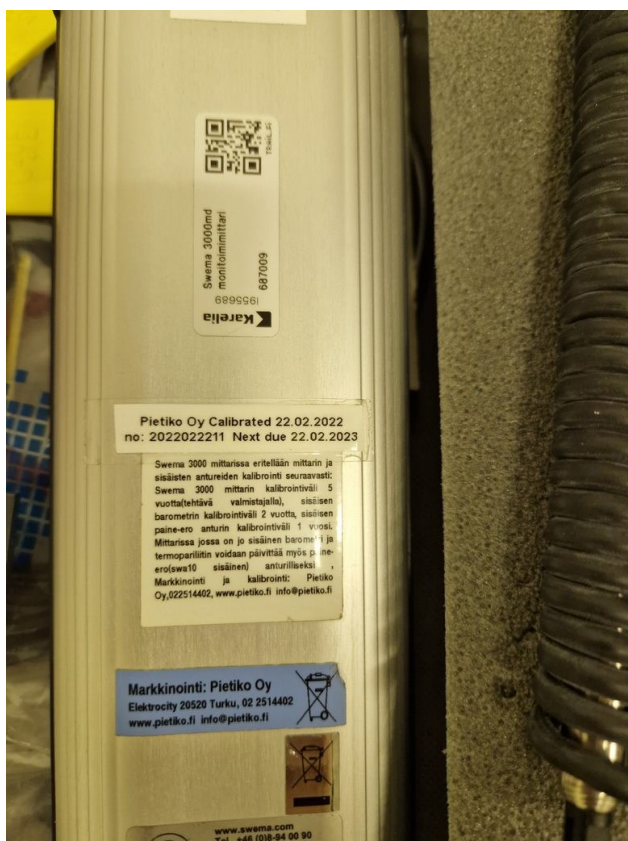


Kuva 3. TA-Scopen kalibrointitodistus.

Swema 3000md on monitoimimittari (Kuva 4), jota käytetään ilmanvaihtojärjestelmien säätöön, tarkistukseen ja analysointiin. Mittaria voidaan käyttää ilmavirtojen nopeuden, ilmanpaineen, lämpötilan sekä ilmavirran mittaukseen. (Pietiko Oy 2023.) Mittarissa on voimassa oleva kalibrointimerkintä (Kuva 5). Mittauksen yhteydessä käytetään mittaustyökaluja (Kuva 6) ja ilmavirtojen mittaus- ja säätöopasta (Kuva 7).



Kuva 4. Swema 3000md monitoimimittari.



Kuva 5. Swema 3000md kalibrointimerkintä.



Kuva 6. Swema 3000md kanssa käytetyt mittausväkalut. Mittauskoukku, silikoniletku sekä rakotulkki.



Kuva 7. FläktWoodsin Ilmavirtojen mittaus- ja säätöopas.

3 Mittaukset

Vesivirtojen mittaus tehtiin ohjekortin LVI 014-10291 sekä mittarin valmistajan ohjeiden mukaan. Mittaus aloitettiin poistamalla venttiilin mittausyhteiden suojakannet, jonka jälkeen mittausletkut työnnettiin mittausyhteiden sisään. Venttiilit olivat samalta valmistajalta kuin mittari, joten venttiilin mallin ja koon pystyi valitsemaan suoraan mittarista. Venttiiliasetuksien valitsemisen jälkeen piti syöttää venttiilin käsipyörän asento, josta mittari saa venttiilin k_v -arvon. Tämän jälkeen määritettiin putkistossa kulkeva neste ja aloitettiin mittaus.

Ilmanvaihdon päätelaitteista mittaus tehtiin ohjekortin LVI 014-10290 sekä mittarin valmistajan ohjeiden mukaisesti. Mittaus aloitettiin asettamalla mittariin oikea mittaustapa, jonka jälkeen laitettiin aikavakioksi 2s. Aikavakion asettamisen

jälkeen määritettiin mittarin k_2 - kerroin. Tässä mittarissa on 20 eri muistipaikkaa k_2 -kertoimelle, joka helpottaa mittaamista siinä vaiheessa, kun venttiilin eri asennoille on eri k_2 -kertoimet. Seuraavaksi valittiin yksiköksi l/s, mittariin voi valita yksiköksi myös m^3/h . Tämän jälkeen asetettiin vielä ilmanpaine sekä lämpötila, jonka jälkeen kaikki parametrit oli asetettu. Kun mittaus oli käynnissä, painettiin ENTER-näppäintä, jolloin laite kerää mittaustulokset. Kerätyissä mittaustuloksista laite näyttää minimi-, keski- ja maksimiarvon sekä mitattujen pisteiden määrän.

4 TATE-mallintamisen työvaiheet

4.1 Alkutoimenpiteet

Toimeksianto saatiin Digital Twin -hankkeelta ja aloituspalaveri pidettiin hankkeen vetäjän kanssa. Seuraavaksi selvitettiin lähtökohdat projektiin sekä mitä haluttiin tuoda malliin ja kuinka tietoja voitaisiin käyttää hyväksi Digital twin -hankkeessa. Kolmikantasopimukset ja oikeuksiensiiirtosopimukset allekirjoitettiin Karelia-ammattikorkeakoulun kanssa sähköisesti, jonka jälkeen meillä oli oikeus tutustua Wärtsilän C-osan LVIS-pohjakuviin ja arkkitehdin tekemään IFC-malliin.

Mittausvälineet saatiin lainattua koulun Karelia.trail.fi-varausjärjestelmän kautta. Työvälineitä ei aluksi saatu vuokrattua, koska järjestelmän käyttöoikeudet puuttuivat. Kun käyttöoikeudet saatiin kuntoon, työvälineiden varaukset onnistuivat. Laitteet näkyvät mittalaitteet-osiossa.

Seuraavaksi yritettiin selvittää urakoitsijoiden aikataulut toimitilainsinööritä, mutta hän ei antanut urakoitsijoiden tietoja. Jos olisi saatu aikataulut, se olisi helpottanut tarkemittauksien suunnittelua. Tehtiin tarkemittaukset nopealla aikataululla ennen remontin alkua, jolloin urakoitsijat eivät olleet töissä. Kun urakoitsijat aloittivat remontin, tiloihin ei päässyt enää. Mallintamista varten tarvittavat

tietokoneet sekä tuplanäytöt varattiin koulun 048-tilasta. Solibri Office-ohjelman lisenssit saatiin voimaan koulun IT-tuen avulla.

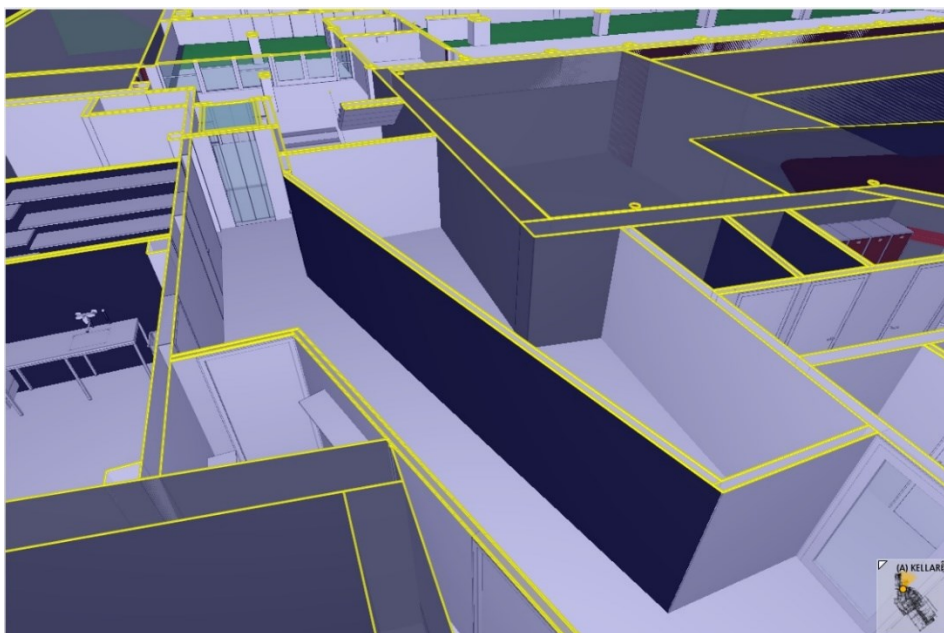
4.2 Dokumentointi ja tarkemittaukset

Dokumentointi ja mittaukset aloitettiin tutustumalla pohjakuviin, LVI-kortistoihin ja SFS-ohjeisiin. Kun mittauspaikat, mittaus- ja raportointistandardit olivat tiedossa, pystyttiin aloittamaan varsinaiset mittaukset. Paperiset LVI-kuvat saatiin A3-kokoisena, minkä jälkeen dokumentointi aloitettiin kellarikerroksesta.

Kellarikerroksessa oli tehty muutoksia tiloihin, laitteisiin ja putkirunkoihin, joten kaikkia saaduissa pohjakuviissa esitettyjä laitteita ei ollut tai niitä oltiin siirretty tilojen muutoksien yhteydessä eri paikkoihin. Samalla verrattiin pohjakuviin ja arkkitehdin IFC-mallin paikkansapitävyyttä ja sitä, minkälaisia virheitä niissä oli. Kun verrattiin kellarikerroksen pohjakuvaa (Kuva 8) ja arkkitehdin mallia (Kuva 9) huomattiin, että käytävän seinät eivät olleet esimerkiksi samassa linjassa.



Kuva 8. Kellarikerroksen käytävän pohjakuva.



Kuva 9. Kellarikerroksen käytävän ARK IFC-malli.

Kampuksen keittiöremontin aikana tehtyjä viemärimuutoksia ei ollut dokumentoitu pohjakuviin, mikä hankaloitti niiden sijainnin tarkastamista. Käytävillä oli huoltoluukkuja, jotka irrottamalla pystyi tekemään pistotarkistuksia runkojen sijainnista sekä koroista. Putkirunkojen korot mitattiin käyttämällä laseretäisyysmittaria.

Kellarikerroksen lämmitysverkoston linjasäätöventtiileitä mitattiin käyttäen TA-Scopea. Linjasäädöt mitattiin 018 R/Käytävä-, 013 Työhuone- ja 002 R/Tekn-tiloista (Kuva 10).



Kuva 10. Lämmityksen linjasäädön mittaus.

Ilmavirrat mitattiin kellarikerroksesta 008 ATK-luokasta sekä 002 R/TEKN- tilasta Sweman monitoimimittarilla (Kuva 11). Kellarikerroksesta ei mitattu ilmavirtoja muista tiloista, koska saaduissa pohjakuvissa ei ollut merkintöjä ilmavirroista, joihin niitä olisi voinut verrata.



Kuva 11. Teknisen tilan ilmamäärän mittaaminen.

Käyttöveden linjasäätöventtiileistä ei mitattu virtaamia, koska venttiilit olivat alkuperäisiä ja niissä oli vuotoriski (kuva 12).



Kuva 12. Käyttöveden vanha linjasäätöventtiili.

Seuraavaksi siirryttiin ensimmäiseen kerrokseen, jossa mitattiin enimmäkseen putkien korkoja käyttämällä laseretäisyysmittaria sekä valokuvaamalla tekniikkaa. Ensimmäisessä kerroksessa on moduulinen alakatto, joten putkien korko saatiin mitattua nostamalla kattolevy sivuun kannattimen päältä. Joiltain osin putkirungot olivat levyissä kiinni, joten niistä ei korkoja saatu mitattua koska levyä ei voinut siirtää sivuun. Tämän johdosta runkojen reittiä ei saatu tarkastettua ja piti tukeutua saatuihin pohjakuviin.

Ilmavirrat mitattiin keittiöstä osasta päätelaiteesta tehostuksen aikana, joten ne poikkeavat suunnitellusta arvosta merkittävästi (Kuva 13). Tehostus on käytössä arkisin kello 8–16 aikana.



Kuva 13. Keittiön ilmamäärän mittaus.

Toisesta kerroksesta oli täydellisenä saatavilla vain lämmitysjärjestelmän pohjakuvat sekä osittaisia kuvia vesi- ja viemärijärjestelmästä, joista selvisi keittiöremontin yhteydessä uusitut viemärit. Vesijohdot sijaitsivat eri paikassa kuin mitä pohjakuviin oli suunniteltu. Ilmanvaihtojärjestelmästä ei pohjakuvien perusteella selvinnyt kuin kahden päätelaitteen ilmavirrat sekä näiden rungot. Ilmavirrat näissä kahdessa päätelaitteessa pitivät paikkansa.

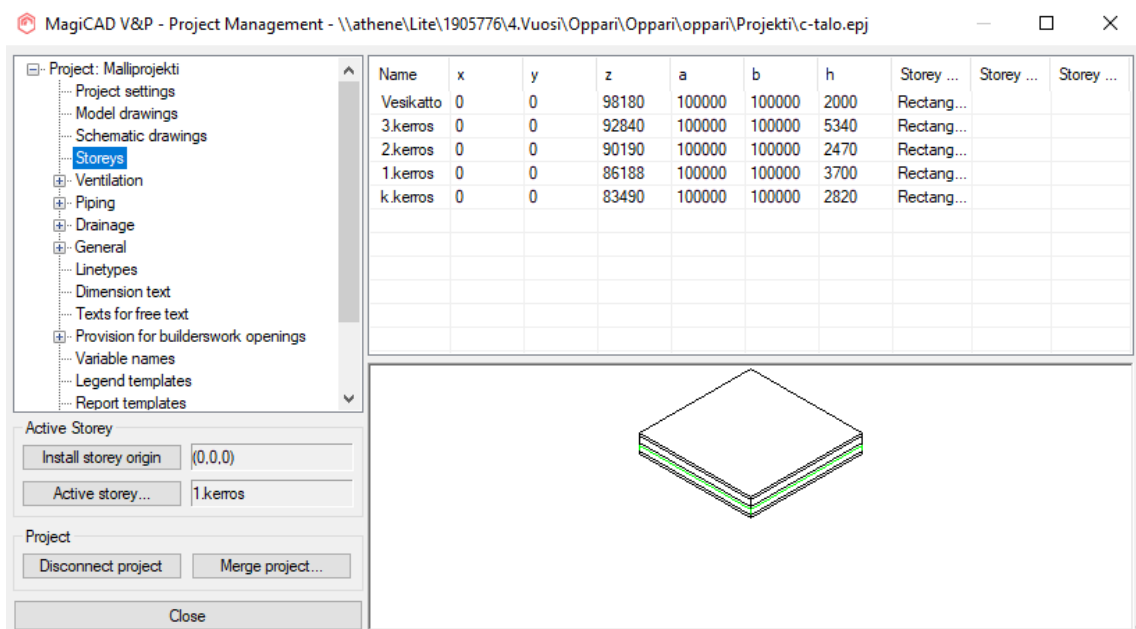
Kolmannessa kerroksessa eli ilmanvaihtokonehuoneesta oli saatavilla pohjakuvat kaikista järjestelmistä. Pohjakuvat erosivat toteutuksesta tuuletusviemäreiden ja käyttöveden läpivientien osalta, jäähdytysputkiston reitti menee hieman eri kohdalta sekä ilmanvaihtokanaviston rungot oli viety ilmanvaihtokoneelle eri kautta. Korot mitattiin kanavistosta ja putkistosta niiltä osin kuin se oli mahdollista. Osittain rungot kulkivat toistensa päällä, joten näiden reitistä ei ole

varmuutta. Lämmitysjärjestelmän TK14-ilmanvaihtokoneen linjasäätöventtiilin arvo erosi suunnitellusta arvosta.

Kaikissa kerroksissa näkyvillä olevat laitteet ja rungot dokumentoitiin valokuvamalla sekä korot mitattiin laseretäisyysmittarilla. Virtaamat kirjattiin ylös tulostettuihin pohjakuviin.

4.3 Mallintaminen

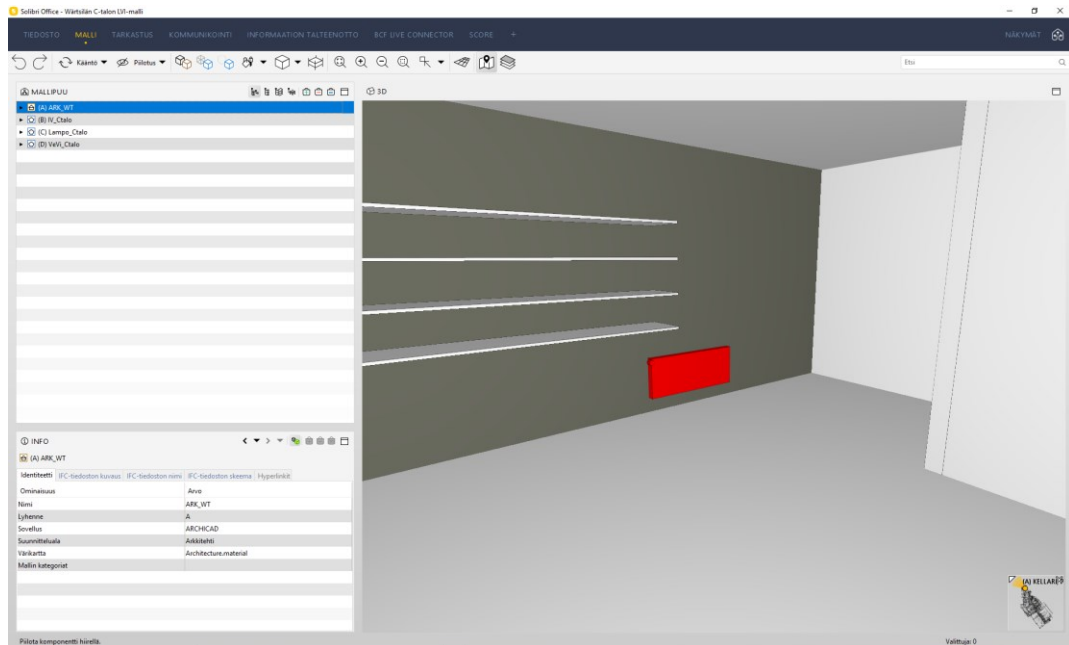
Ensin täytyi kohdistaa arkkitehdin IFC-malli ja LVI-pohjakuvat YTV2012:n mukaisesti, jotta tekniikka on oikeassa korossa. Kerroskohtaiset korot katsottiin arkkitehdin leikkauskuvista (Kuva 14). (YTV2012 osa 2, 2022, 8.)



Kuva 14. Projektin korkeusjärjestelmä.

Mallintamiseen piti valita käytettävät ohjelmat, jotka ovat IFC-yhteensopivat keskenään (YTV2012 osa 4, 2022, 8). Ohjelmina käytettiin MagiCAD for AutoCAD ja Solibri Officea. Kellarikerroksen lämmityspohjakuviin lisättiin yksi patteri käyttäen MagiCAD-ohjelmaa. Lämmityspohjakuvesta luotiin IFC-malli (Kuva 15), minkä jälkeen IFC-malli yhdistettiin arkkitehdin IFC-mallin kanssa Solibrilla. Kun koordinaatisto ja kerrosasetukset olivat kunnossa, jokaisen talotekniikan

pääjärjestelmistä luotiin omat pohjakuvat. Tarkoituksena oli saada jokaisesta pääjärjestelmästä toimiva ja ehjä malli. Pääjärjestelmien IFC-malleja päivitettiin arkkitehdin luomaan malliin piirtämisen edetessä. Pääjärjestelmien IFC-mallit nimettiin seuraavasti: Lampo_Ctalo, VeVi_Ctalo ja IV_Ctalo. Tarkoituksena oli tehdä yksinkertaiset mallit, jotka ovat helposti luettavissa.



Kuva 15. Solibri-näkymä patterin sijoituksen jälkeen.

4.4 MagiCAD projekti

Dokumentoitujen ja saatujen suunnitelmien perusteella aloitettiin rakennuksen talotekniikan mallinnus MagiCAD for AutoCAD -ohjelmalla. Käytössä oli vajanaiset dwg-suunnitelmat rakennuksesta. MagiCADiin luotiin projekti, jossa koordinaatisto oli sama kuin arkkitehdin IFC-mallissa. Jokainen LVI-pääjärjestelmä piirrettiin omaan.

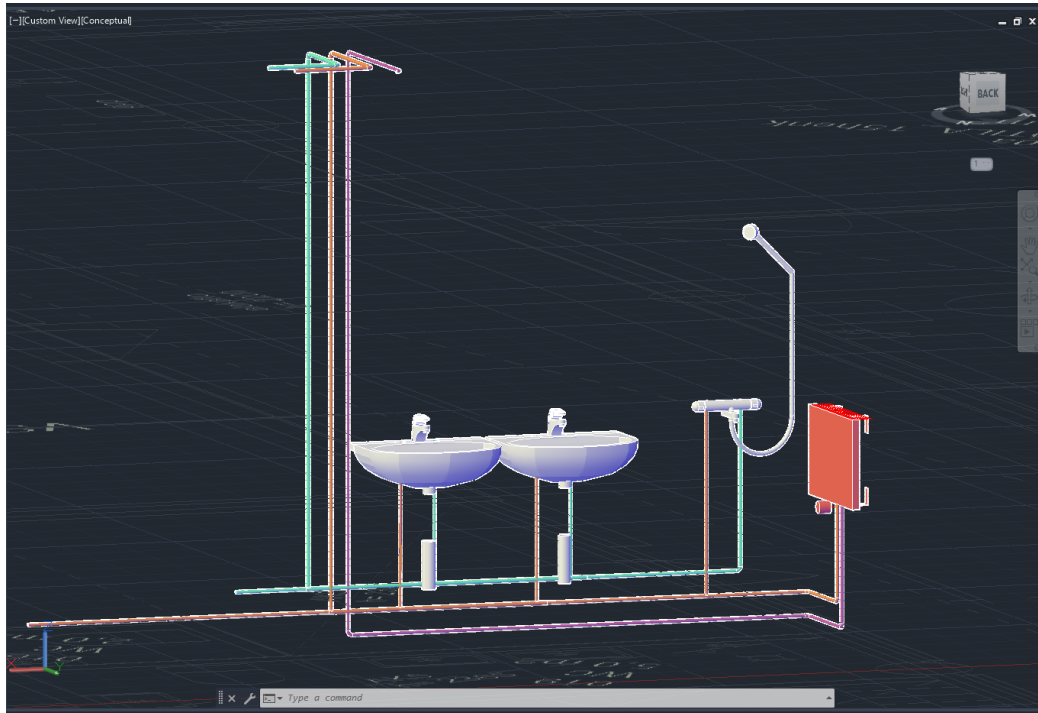
Pohjalle liitettiin osa aikaisemmista suunnitelmista, joista näki kuinka edellisen remontin talotekniikka oli suunniteltu. Nämä suunnitelmat eivät kuitenkaan sisältäneet verkostojen tietoja, joten näitä suunnitelmia ei voida käyttää Digital Twin -hankkeessa. Lisäksi tietomallissa näiden suunnitelmien putket risteilivät keskenään ja korot eivät pitäneet paikkaansa, joten näistä täytyi tehdä tarkempi malli,

jotta näistä olisi hyötyä Digital Twinissä. Käyttöön saatuja suunnitelmia ei oltu ajantasaistettu, joten näiden lisäksi täytyi katsoa otetuista valokuvista mistä verkostot todellisuudessa kulkivat.

Jotkin vesikalusteet ja lämmitysverkoston laitteet ovat erilaisia, koska MagiCADin tietokannasta ei ole saatavilla tuotannosta poistuneita kalusteita ja laitteita. Näiden sijaan käytettiin ohjelman omia vakiokalusteita. Ohjelman omissa hanoissa virtaamat ja painehäviöt ovat samaa luokkaa, joten nämä eivät vaikuta mitoituksiin olennaisesti. Kellarin sekoittajat olivat tuotannosta poistuneita (Kuva 16), joten näiden tilalle vaihdettiin MagiCADin tietokannan vakiosekoittajat (Kuva 17).

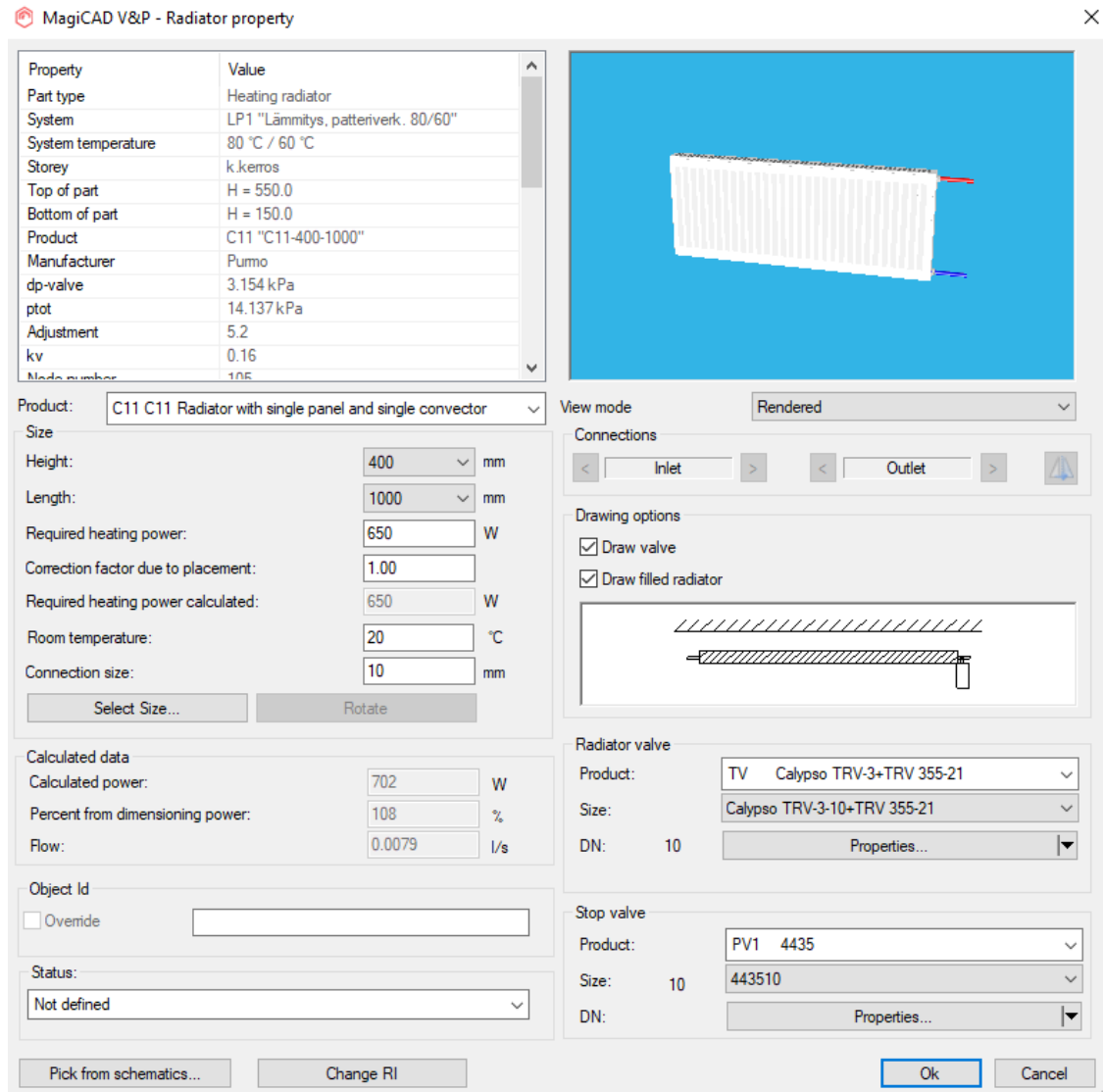


Kuva 16. Vanhat sekoittajat.

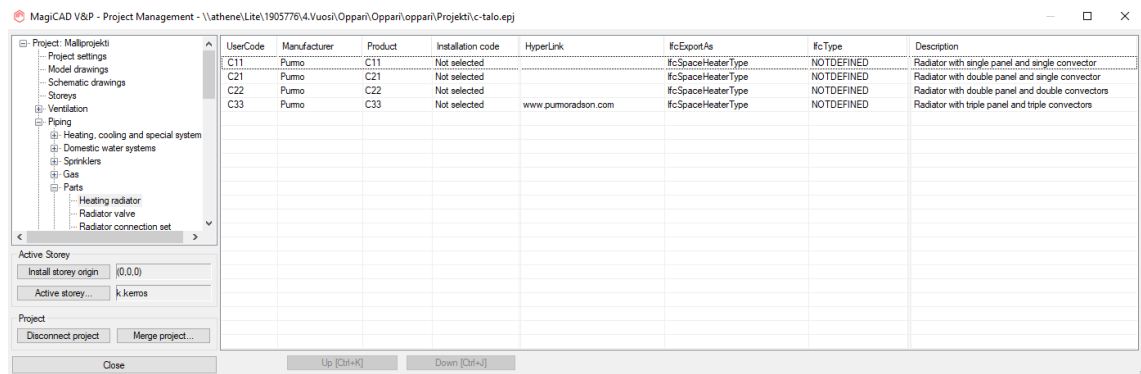


Kuva 17. MagiCADin tietokannan sekoittajat.

Kellarikerroksesta sekä toisesta kerroksesta ei ollut saatavilla lämmitysjärjestelmän pattereiden tehoja eikä malleja, joten nämä tiedot jouduttiin kopioimaan käytössä olevasta tietomallista, jonka paikkansapitävyydestä ei ole varmuutta. Radiaattorien tehomäärä arvioitiin vanhojen pohjakuvien mukaan (Kuva 18). Pattereina käytettiin Purmo Compact C-pattereita (Kuva 19).

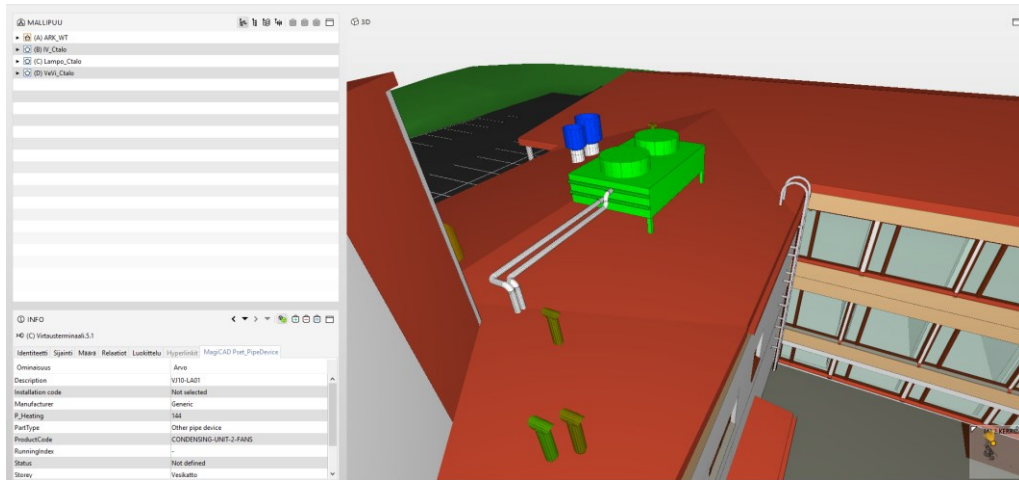


Kuva 18. Patterin tehomäärä.



Kuva 19. Projektin patterit.

Jäähdytysjärjestelmän Chillerin ulkoyksikköä JKJ10-LA01 ei löytynyt MagiCADin tietokannasta, joten se yritettiin saada Chillerin valintaohjelmasta. Ulkoyksikköä ei saatu tuotua MagiCADiin. Malliin laitettiin MagiCADin tietokannan ulkoyksikkö (Kuva 20), johon lisättiin oikeat tehoarvot lähtötietojen jäähdytyslaitemitoituksesta. Järjestelmät tehtiin toimiviksi, mutta niiden mitoitettut virtaamat erosivat suunnitelluista arvoista joiltain osin.



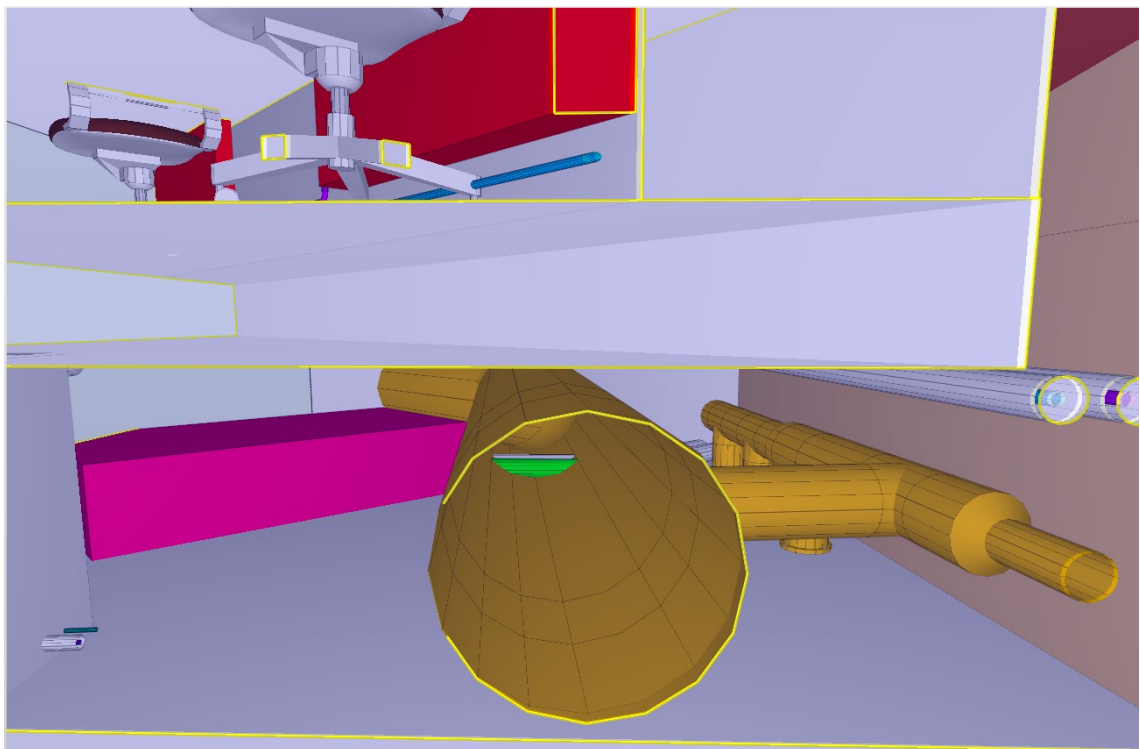
Kuva 20. Jäähdytyksen ulkoyksikkö.

4.5 Mallin tarkastelu

Mallin tarkastelu tehtiin Solibrin tarkastus-toiminnolla sekä visuaalisesti. Mallia vertailtiin talotekniikan ja arkkitehtimallin välillä. MagiCADista tuodut IFC-mallit sovitettiin keskenään. Ohjelma laatii törmäyksistä raportin, josta pystyy tarkastelemaan mallin talotekniikan välisiä leikkauksia (Kuva 21). Törmäilyjä oli enimmäkseen käyttövesi- sekä ilmanvaihtoverkoston kesken (Kuva 22). Havaitut törmäilyt korjattiin tarkastelun jälkeen (Kuva 23). Korjauksia ei kuitenkaan voinut tehdä muutamaa eri kohtaan, koska malli ei ollut näiden osalta totuutta vastaava.

TULOKSET		Ei suodatusta ▼ Automaattinen ▼	
Tulokset			
▶	🔒 Jäähdytys 1 ja Tuloilma (Keittiö) -komponenttien väliset leikkaukset [0/8]		
▶	🔒 Erillispoistot ja Jäähdytys 1 -komponenttien väliset leikkaukset [0/1]		
▶	🔒 Jäähdytys 1 ja Käyttövesi 1 -komponenttien väliset leikkaukset [0/2]		
▶	🔒 Jäähdytys 1 ja Poistoilma (Keittiö) -komponenttien väliset leikkaukset [0/1]		
▶	🔒 Jäähdytys 1 ja Poistoilma (WC-/SOS.tilat) -komponenttien väliset leikkaukset [0/1]		
▶	🔒 Jäähdytys 1 ja Raitisilma -komponenttien väliset leikkaukset [0/1]		
▶	🔒 Jäähdytys 1 ja Tuloilma (Ruokailu) -komponenttien väliset leikkaukset [0/1]		
▶	🔒 Jäähdytys 1 ja Tuloilma (WC-/SOS.tilat) -komponenttien väliset leikkaukset [0/1]		
▼	🔒 Käyttövesi 1 ja Poistoilma (Keittiö) -komponenttien väliset leikkaukset [0/1]		
▶	🔒 Käyttövesi 1 ja Poistoilma (Keittiö) [0/1]		
▶	🔒 Käyttövesi 1 ja Rasvaviemäri 1 -komponenttien väliset leikkaukset [3/3]		
▼	🔒 Käyttövesi 1 ja Tuloilma (Keittiö) -komponenttien väliset leikkaukset [0/1]		
▶	🔒 Käyttövesi 1 ja Tuloilma (Keittiö) [0/1]		
▶	🔒 Käyttövesi 1 ja Tuloilma (Ruokailu) -komponenttien väliset leikkaukset [0/1]		
▶	🔒 Käyttövesi 1 ja Tuloilma (WC-/SOS.tilat) -komponenttien väliset leikkaukset [0/2]		
▼	🔒 Käyttövesi 1 ja Viemäri 1 -komponenttien väliset leikkaukset [44/44]		
▶	🔒 Käyttövesi 1 ja Viemäri 1 [44/44]		

Kuva 21. Raportti talotekniikan törmäilykohdista.

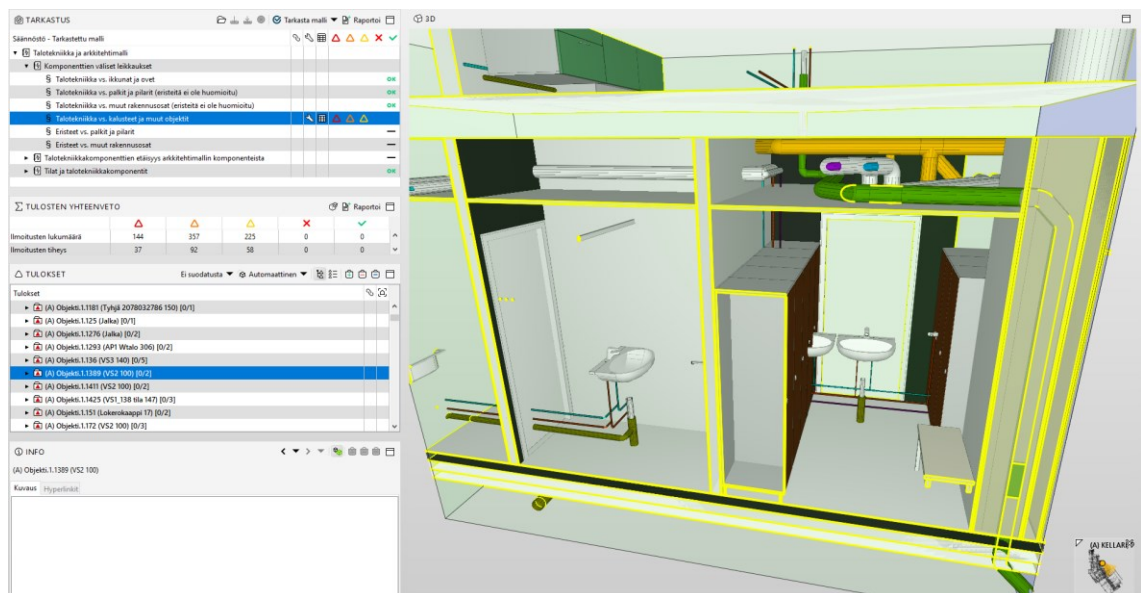


Kuva 22. LVI-mallin väliset törmäilyt.

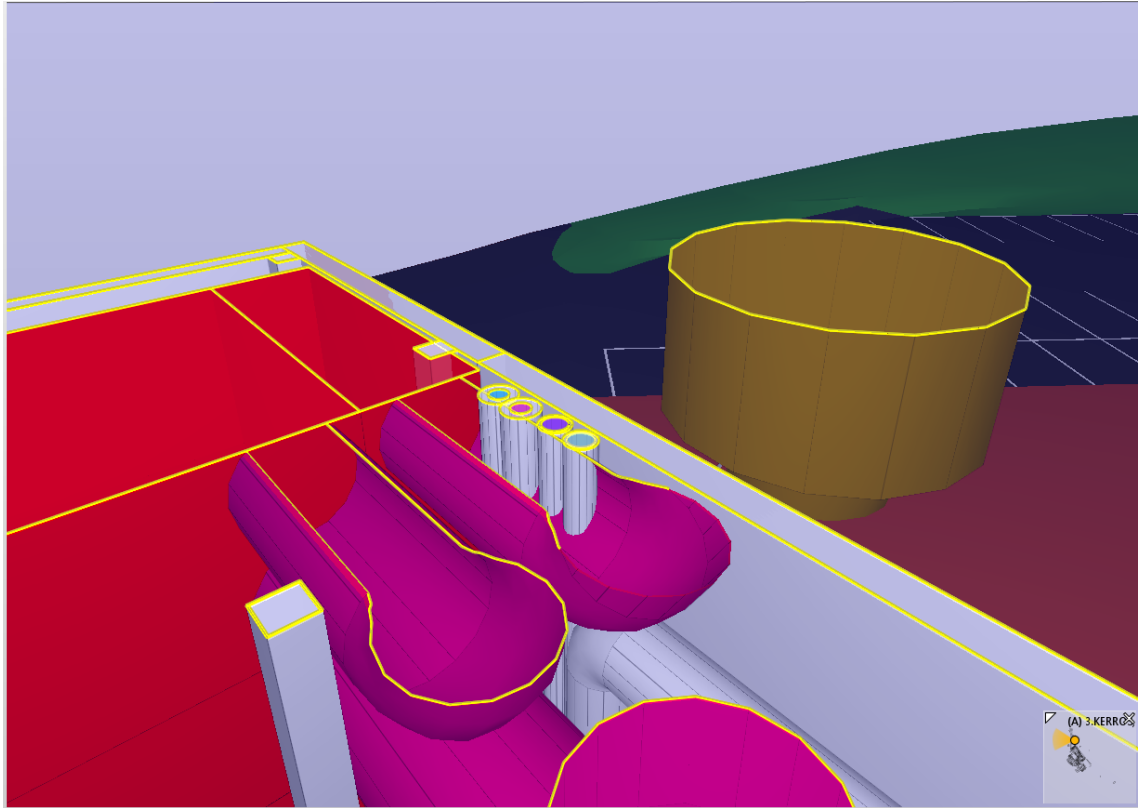
TARKASTUS		Tarkasta malli	Raportoi
Säännöstö - Tarkastettu malli			
▼	§ Talotekniikkamallien komponenttien väliset leikkaukset		
▼	§ LVI-mallien sisäiset leikkaukset		
	§ LVI-mallien keskinäiset leikkaukset (eristeitä ei ole huomioitu)		OK
	§ Tuplakomponentit		X
	§ Eristeiden ja muiden komponenttien väliset leikkaukset		
	§ Eristeiden keskinäiset leikkaukset		
▶	§ Sähkämömallien sisäiset leikkaukset		—
▶	§ LVI-mallien ja sähkämömallien keskinäiset leikkaukset		OK

Kuva 23. Korjatut LVI-mallin väliset törmäilyt.

Arkkitehdin IFC-mallin ja talotekniikka-mallin välillä tehty tarkastelu antoi virheitä, vaikka raportti oli kunnossa talotekniikan osalta. Virheet tulivat pääosin arkkitehdin uusien kalusteiden ja väliseinien takia (Kuva 24). ARK-mallin seinien ja pilarien sijainnit IVK-huoneessa eivät täysin vastanneet rakennettujen seinien ja pilareiden sijainteja, joten tekniikka ei mahtunut todelliselle paikalleen (Kuva 25).



Kuva 24. Esimerkki arkkitehdin ja talotekniikan välisestä törmäyksestä.



Kuva 25. IVK-huoneen tekniikan väliset törmäilyt.

5 Digital Twin -hanke

Digital Twin -hanke on Karelia-ammattikorkeakoulun kehittämishanke, jonka tavoitteena on mallintamisosaamisen kehittäminen rakennus- ja talotekniikan opetuksessa. Erityisesti tavoitteena on kehittää talotekniikan kiinteistöautomaation koulutusta. (Karelia-ammattikorkeakoulu 2023a.)

Hanke toteutetaan eri koulutusten yhteistyönä samalla kehittäen kaikkien osaamista. Esimerkiksi rakennustekniikka hyödyntää ja tuottaa tietomalleja, joita voidaan käyttää myös kiinteistön elinkaaren myöhemmissä vaiheissa. LVIS-järjestelmät, joita ohjataan automaatiolla luovat perustan kiinteistön käytönaikaiselle optimoinnille, jolloin tietoverkko-osaaminen on pakollinen osa automaation arkkitehtuurissa. (Karelia-ammattikorkeakoulu 2023a.)

Konkreettinen toiminta hankkeessa on jaettu neljään eri työpakettiin: digitaalisen kaksosen käyttö rakennuksen eri elinkaaren vaiheissa, taloautomaation uudet teknologiat, kiinteistötietojen hallinta ja KampusTwin. (Karelia-ammattikorkeakoulu 2023a.)

Työpaketin viimeinen osa sisältää Wärtsilä kampuksen C-osan digitaalisen kaksosen toteutuksen. Digitaalisen kaksosen ilmentymä voi olla digitaalinen AR/XR-malli, johon tuodaan näkyviin erilaisia tietoja, esimerkiksi käyttäjä-, olosuhde- ja kulutustietoja. Digitaalisen kaksosen ilmentymisen muita esimerkkejä voivat olla talotekniikan simulointimallit sekä energiasimulointimallit. (Karelia-ammattikorkeakoulu 2023b.)

6 Pohdinta

Mallinnettaessa jokainen järjestelmä tehtiin erikseen ja tästä syntyi ongelma työn lopussa, koska tämä opinnäytetyö tehtiin parityönä koululla ja käytössä ei ollut yhteistä verkkoasemaa, jossa eri järjestelmiä olisi voinut mallintaa samaan aikaan yhdelle projektitiedostolle. Projektien ja piirrettyjen nodejen yhdistäminen oli kaikista hankalinta ja aikaa vievää, koska jokainen node täytyi tehdä uudelleen. Isommilla suunnittelufirmoilla käytössä on yhteinen verkkoasema, minkä takia kyseistä ongelmaa ei synny. Ongelmaa ei tule myöskään vastaan silloin, kun tiedostopolku ei muutu.

Mallissa jotkut virtaamat eroavat saaduista suunnitelmista, mikä voi johtua esimerkiksi lämmitysverkostossa siitä, että kellarikerroksen ja toisen kerroksen vesikalusteita tai pattereita ei löytynyt MagiCADin tietokannasta, koska ne ovat niin vanhoja. Tehomäärät voivat myös erota näissä pattereissa. Myös verkostojen runkoputkistot menevät eri tavalla kuin alkuperäisessä suunnitelmassa joiltain osin. Tehdyssä mallissa ei ole näkyvillä mitattuja virtaamia, vaan siinä käytetään MagiCADin laskemia virtaamia, jotka olivat suhteellisen lähellä toteutuneita arvoja.

Suurin osa arkkitehdin ja talotekniikan välisistä virheistä törmäystarkastelussa johtuvat mallista, joka on piirretty uusien tilojen mukaan. Kellarikerroksen talotekniikka on mallinnettu vanhojen tilojen mukaan. Tämä ero näkyy helpoiten katsomalla kuvaa 24. Kyseisiä virheitä ei korjattu.

Mallintamisen alussa opittiin käyttämään MagiCADin Floor Offset Area:a, mikä mahdollisti käyttämään yhdessä kerroksessa useampaa eri huonekorkoa. Ominaisuus helpotti huomattavasti talotekniikan mallintamista ensimmäiseen kerrokseen sekä ivkh:n (ilmanvaihtokonehuone) osalta.

Mallintaessa toisen kerroksen ilmanvaihtoa käytettävissä ei ollut vanhoja suunnitelmia, joista olisi voitu katsoa kanavien kokoja tai runkoreittejä. Mallinnus toisen kerroksen ilmanvaihdon osalta tapahtui uusien iv-suunnitelmien mukaan.

Remontin vuoksi kellarikerroksen ja toisen kerroksen talotekniikan mallinnuksen hyöty jää todella vähäiseksi. Tilat muuttuvat remontin aikana molemmissa kerroksissa, joten niin kuin kuvassa 24 hyvin näkyy, käsienpesualtaat olisivat puku-kaapin sisällä. Ivkh:n osalta sekä ensimmäisen kerroksen osalta tate-mallinnusta tosin voi hyödyntää paremmin Digital Twin -hankkeessa, koska nämä tilat eivät muutu remontin aikana merkittävästi.

Tehty malli eli toteumamalli osuu neljänteen työpakettiin, eli KampusTwiniin. Mallista voi käydä tarkastelemassa talotekniikan eri osien ja komponenttien painehäviöitä, virtaamia ja muita tietoja avaamalla suunnitteluohjelmaa. Tiedot, laitteiden sijainnit ja mallit voi käydä katsomassa esimerkiksi Solibrilla, joka säästää aikaa verrattuna suunnitteluohjelmalla tehtyyn tarkasteluun. IFC-malli sisältää rakennuksen C-osan sekä sen sisältämän LVI-tekniikan tietoineen. Suunnitteluohjelmalla samanlainen tarkastelu vaatii eri tiedostojen avaamisen jokaisen kerroksen ja järjestelmän kohdalla, mikä on hitaampaa ja joiltain osin myös hankalampaa.

Tietomallia tarkastelemalla voidaan tutkia tilojen laitteita, korkeuksia ja leveyksiä, mistä on apua tilojen käytön suunnittelussa ja tilojen muutostöissä. Mahdolliset korjaus- ja kunnossapitosuunnitelut voidaan tehdä jopa käymättä tiloissa fyysisesti. Tämä säästää suunnittelijan ja tilaajan aikaa, vaivaa ja rahaa. Kun malli on ajantasainen ja sisältää talotekniikan komponenttien tiedot, sitä voidaan myös käyttää apuna rakennuksen ylläpidossa.

Mallia voi käyttää olosuhde- ja energiasimulointiin, mikä mahdollistaa rakennuksen tarkastelua eri olosuhteissa. Tulevaisuudessa rakennuksen ja ihmisten turvallisuus voi lisääntyä tekniikan kehittyessä, esimerkiksi palohälytyksen yhteydessä palokunta voisi suunnitella tulosuunnan rakennukseen näkemällä heti mallista, missä palo sijaitsee.

Molemmat opinnäytetyön tekijät tekivät ensimmäistä kertaa tämän tyyppisen työn, joten aikaa meni pelkkään mallintamiseen kaiken kaikkiaan noin 500 tuntia. Tämän lisäksi työtilan etsiminen, työhön vaadittavat ohjelmat, työkalut, mitaukset ja dokumenttien kysely ympäriinsä vei oman aikansa. Aikaa saisi varmasti menemään vähemmän, jos lähtötiedot sekä edellä mainitut työhön vaadittavat asiat olisivat olleet heti valmiina. Myös ammattitaidon karttuessa työn saa tehtyä huomattavasti nopeammin.

Haluttuun lopputulokseen kuitenkin päästiin ja tästä työstä saa käsityksen, mitä kaikkea ajantasaispiirustusten teko sekä järjestelmien tietomallintaminen vaatii.

Lähteet

- buildingSmart Finland WiKi. 2022. YTV – Yleiset tietomallivaatimukset 2012. https://wiki.buildingsmart.fi/fi/04_Julkaisut_ja_Standardit/YTV. 13.03.2023.
- Eduskunta. 2022. Hallituksen esitys HE 139/2022 vp. https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/HallituksenEsitys/Sivut/HE_139+2022.aspx. 12.03.2023.
- Granlund. 2023. Digital twin. <https://www.granlund.fi/palvelut/digital-twin/>. 14.03.2023.
- IMI-Hydronic. 2023. TA-scope. <https://www.imi-hydronic.com/fi/product/ta-scope>. 12.03.2023.
- Karelia-ammattikorkeakoulu. 2023a. Digital Twin – Kiinteistö- ja talotekniikan kestävät palvelut ja alustaosaaminen. <https://www.karelia.fi/projektit/?RepoProject=6198>. 20.03.2023.
- Karelia-ammattikorkeakoulu. 2023b. Digital Twin – Kiinteistö- ja talotekniikan kestävät palvelut ja osaaminen. <https://rakentaminen.karelia.fi/projektit/digital-twin/>. 20.03.2023.
- Maanmittauslaitos. 2023. Kohti Suomen digitaalista kaksosta. <https://www.maanmittauslaitos.fi/tietoa-maanmittauslaitoksesta/organisaatio/lehdet-ja-julkaisut/positio/kohti-suomen-digitaalista-kaksosta>. 14.03.2023.
- MagiCAD. 2023. MagiCAD LVIS-suunnitteluun. <https://www.magicad.com/fi/mita-magicad-tarjoaa-lvis-suunnitteluun/>. 13.03.2023.
- Nordicbim. 2023. Digitaaliset kaksoset. <https://www.nordicbim.com/fi/digitaalinen-kaksonen>. 14.03.2023.
- Pietiko Oy. 2023. Swema 3000md. <https://www.pietiko.fi/tuotteet/ilmanvaihto/ilmamaaramittarit/swema-3000md-mittauspaketti/>. 12.03.2023.
- Rakennustieto. 2023. LVI-KORTISTO. <https://www.rakennustieto.fi/palvelut/tietoa-rakentamiseen/kortistot/lvi-kortisto>. 12.03.2023.
- Rakennustieto. 2023. RT-KORTISTO. <https://www.rakennustieto.fi/palvelut/tietoa-rakentamiseen/kortistot/rt-kortisto>. 13.03.2023.
- RT 10-11066. 2012. Yleiset tietomallivaatimukset 2012. Osa1. Yleinen osuus (Versio 1.0, 2012). Rakennustieto <https://kortistot.rakennustieto.fi/kortit/RT%2010-11066?navref=Search>. 12.03.2023.
- RT LVI 014-10290. 1999. LVI-LAITOSTEN MITTAUKSET. Rakennustieto. <https://kortistot.rakennustieto.fi/kortit/LVI%20014-10290>. 13.03.2023.
- RT LVI 014-10291. 1999. Lämmitysverkostojen vesivirran mittaus. Rakennustieto. <https://kortistot.rakennustieto.fi/kortit/LVI%20014-10291>. 12.03.2023.
- Solibri. 2022. BIM ja tietomallit rakentamisessa. <https://www.solibri.com/fi/ajankohtaista/bim-ja-tietomallit-rakentamisessa>. 12.03.2023.
- Solibri. 2023. Solibri Office. <https://www.solibri.com/fi/solibri-office>. 13.03.2023.
- Trimble. 2022. What is BIM (Building Information Modeling). <https://constructible.trimble.com/construction-industry/what-is-bim-building-information-modeling>. 29.03.2023.

Trotec. 2023. Etäisyysmittari BD21. https://fi.trotec.com/shop/etaisyysmittari-bd21.html?gclid=EAlaIQobChMloqeNvNO1_QIVTJBoCR24PwALE-AAYASAAEgKzsPD_BwE. 12.03.2023.