Aalto-yliopisto
Insinööritieteiden
korkeakoulu

Building 2030: Esivalmistusta tukeva suunnitteluautomaatio

Loppuraportti

Kirjoittajat:

Aalto-yliopiston tutkijat: Olli Seppänen, Tuomas Valkonen, Hisham Abou Ibrahim

Aalto-yliopiston opiskelijat: Axel Lindberg

Aalto-yliopiston Rakennustekniikan laitoksen Building 2030 tutkimuskonsortion jäsenet tutkimusvuonna olivat: A-Insinöörit, Amplit, Fluent Progress, Fira, Granlund, Haahtela, Jatke, Lujatalo, Parma, Peab, Pohjola Rakennus, Ramboll, Rejlers, Ramirent, Skanska, SRV, Stark, Tocoman, Trimble, Vastuu Group ja YIT.

1.12.2022

Sisällysluettelo

1 Johdanto ... 3

1.1 Tutkimuksen tausta ... 3
1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja menetelmät ... 3

2 Toteutuskelpoinen talotekniikkasuunnittelu ... 5

2.1 Tutkimuskohteet ... 5
2.2 Havainnointi työmaalla ... 6
2.3 Tulokset ... 6
2.4 Ongelmien tunnistaminen etukäteen ... 16
2.5 Ratkaisuehdotus ... 16

3 Esivalmistuksen suunnitteluvaatimukset (perustuu Lindberg 2022) ... 19

3.1 Taustaa ... 19
3.2 Case Southland ... 20
3.3 Biotuotetehdas ... 24
3.4 Mallinnustestit MagiCadilla ... 24
3.5 Ehdotus Suomen prosessiksi ... 25

4 Suunnitteluautomaation käyttökohteet ja ratkaisut talotekniikan suunnitellussa ... 26

5 Yhteenveto ja johtopäätökset (Olli) ... 29

Lähdeluettelo ... 30

1 Johdanto

1.1 Tutkimuksen tausta

Building 2030 -konsortio halusi selvittää suunnitteluautomaation mahdollisuuksia talotekniikan esivalmistussuunnittelussa. Aiempi tutkimus hukasta LVI- ja sähkötöissä osoitti, että asentajat hukkaavat valtavasti aikaa työmaalla tapahtuvaan suunnitteluun, koska suunnitelmien ja yhteensovituksen tarkkuustaso ei ole riittävä suunnitteluvaiheessa. Parempi suunnittelu voisi mahdollistaa tuottavuusloikan erityisesti putkiasennuksissa, joissa järjestelmät ovat joustamattomia ja eri ratkaisut vaativat erilaisia osia (Seppänen ym. 2021).

Toisaalta talotekniikan esivalmistuksessa nähtiin edelleen potentiaalia. Aiemmassa Building-2030 tutkimuksessa selvisi, että nykyinen suunnittelun tarkkuustaso ei mahdollista esivalmistusta. Vierailut talotekniikkatehtaalla Kaliforniassa ja meriteollisuutta palvelevilla putkipajoilla Suomessa osoittivat, että detaljointi on mahdollista mutta asia jäi aiemmissa tutkimuksissa yksittäisten havaintojen varaan.

Konsortion ohjausryhmä halusi selvittää tässä tutkimuksessa, voisiko suunnitteluautomaatiolla ratkaista sekä toteutuskelpoisen talotekniikkasuunnittelun että esivalmistuskelpoisen talotekniikkasuunnittelun haasteet lisäämättä olennaisesti suunnittelutunteja.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja menetelmät

Vaikka tutkimuksen otsikkona olikin suunnitteluautomaatio, oli tärkeää ensin ymmärtää tarkemmin, mitä haasteita suunnitelmien toteutuskelpoisuuteen liittyy. Lisäksi selvitettiin esivalmistettavan talotekniikan suunnitteluvaatimuksia. **Ensimmäinen tavoite oli siis ymmärtää täsmällisemmin, mikä suunnitteluautomaatiolla ratkaistava ongelma on.**

Urakoitsijat ja asentajat ovat pitkään puhuneet toteutuskelvottomista talotekniikkasuunnitelmista yksilöimättä riittävästi, mikä niissä on vikana. Siksi tutkimus lähti oletuksesta, että pelkästään haastattelemalla asiantuntijoita ei tässä asiassa päästäisi riittävän syvälle. Menetelmäksi valikoitui työmaatutkimus, jossa verrattiin toteutuneita asennuksia suunniteltuihin ja selvitettiin poikkeamien syyt. Lisäksi ulkopuolinen talotekniikkaurakoitsija tarkasti kohteiden suunnitelmat, jotta selviäisi, olisiko suunnitelmien haasteet voitu havaita jo ennen asennustyön alkamista.

Esivalmistustarkastelun lähtökohtana oli tieto jo onnistuneesti esivalmistusta tekevistä yrityksistä. Tästä johtuen perehdyttiin kalifornialaisen Southland Industries -yrityksen toimintaan ja suunnitteluprosessiin. Lisäksi tutustuttiin suomalaiseen esivalmistukseen Kemin biotuotetehtaalla. Tavoitteena oli selvittää esivalmistetun talotekniikan suunnitteluvaatimukset.

Suunnitteluautomaatiota tutkittiin ratkaisuna sekä toteutuskelpoisen talotekniikkasuunnittelun että esivalmistuksen näkökulmasta. Menetelminä tutkimuksessa käytettiin kirjallisuustutkimusta, internet-tutkimusta ja testaamalla sovelluksia, joihin tutkijat saivat pääsyn ohjelmistotoimittajalta.

2 Toteutuskelpoinen talotekniikkasuunnittelu

2.1 Tutkimuskohteet

Tutkimus suoritettiin kolmessa erillisessä rakennushankkeessa. Hankkeet valittiin saatavuuden perusteella. Kohteet ja niiden tiedot on esitetty taulukossa 1. Kaksi kohteista oli koulurakennuksia ja yksi asuinkerrostalo.

Taulukko 1. Tutkimuskohteet ja niiden tiedot.

	Rakennustyyppi	Projektityyppi	Suunnittelussa oli käytetty tietomallinnust	Asennuksessa oli käytetty tietomallinnusta
Tapaus 1	Asuinrakennus	Uudisrakennus	Kyllä	Osittain
Tapaus 2	Koulurakennus	Uudisrakennus	Kyllä	Kyllä
Tapaus 3	Koulurakennus	Peruskorjaus	Osittain	Ei

Kaikissa kohteissa oli käytetty suunnittelussa tietomallinnusta mutta käytetyn mallinnuksen tarkkuus vaihteli kohteittain. Tapauksessa 1 tietomallinnusta oli käytetty suunnittelussa, mutta yhteensovitusta ei ollut tehty tarkasti ja asioita oli selvästi jätetty työmaan ratkaistavaksi. Tapauksessa 2 tietomallinnus oli viety pisimmälle ja yhteensovitusta oli tehty. Tapauksesta 3 oli osittainen tietomalli, josta puuttui kokonaisia tekniikan aloja eikä tietomallia ollut yhteensovitettu tai pidetty ajan tasalla.

Asennukseen käytettävä suunnitteluaineisto vaihteli kohteittain. Tapauksessa 1 asentajat käyttivät enimmäkseen paperisia tasokuvia asennukseen. Tietomallia oli kuitenkin käytetty rajatusti ongelmakohtien selvittämiseen ja työn suunnitteluun. Tietomalli ei ollut asentajilla käytettävissä työmaalla. Tapauksessa 2 asentajilla oli tietomalli käytettävissä mobiililaitteilla työmaalla ja tietomallia käytettiin asennusten suunnittelussa. Tietomallin käyttäminen koettiin tapauksen 2 työmaalla asennusta helpottavaksi tekijäksi. Tapauksen 3 työmaalla tietomallia ei käytetty. Asennus tehtiin pelkästään paperisien tasokuvien perusteella.

Osittain vaihtelua asennukseen käytetyn aineiston osalta tapausten välillä selittää tietomallin laatu. Työmaahaastattelujen perusteella tyytyväisimpiä tietomallin käyttöön olivat asentajat Tapauksen 2 työmaalla. Tapauksien 1 ja 3 työmaalla asentajat kertoivat, että tietomallin käytettävyyttä asennuksessa haittaa tietomallin luettavuus työmaalla sekä sen laatu.

2.2 Havainnointi työmaalla

Suunnitelmien laatua sekä asentajien tekemiä muutoksia suhteessa suunnitelmiin dokumentoitiin rakennustyömailla vertaamalla toteutussuunnitelmaa toteutuneeseen asennukseen. Havaittujen poikkeamien syyt selvitettiin päättelemällä sekä haastattelemalla asentajia. Näkyvissä olevia asennuksia verrattiin kohteiden ajantasaiseen suunnitteluaineistoon. Poikkeamaksi määriteltiin suunnitelmasta poikkeava asennus, esim. poikkeava putkireitti tai laitteen sijainti. Poikkeama ei siis välttämättä tarkoita, että asennus olisi tehty virheellisesti. Ajantasainen suunnitteluaineisto saatiin projektipankista ja se oli kohteesta riippuen tietomalli tai tasokuva tai näiden yhdistelmä. Havaituista poikkeamista otettiin valokuvia sekä kirjattiin ylös tunnistetiedot. Poikkeaman aiheuttanut syy pääteltiin asennuksen ympäristöstä tai selvitettiin joissain tapauksissa haastattelemalla asentajia.

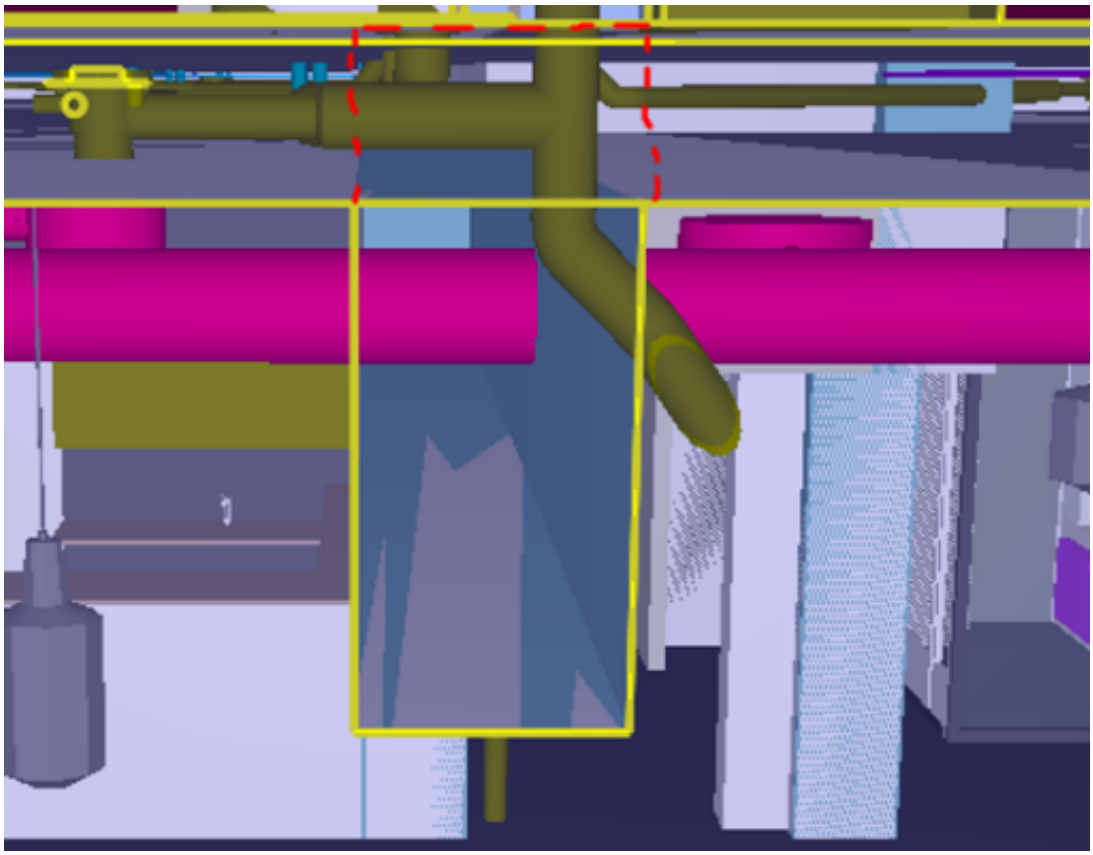
Havainnoijan kirjaamien poikkeamien lisäksi kussakin kohteessa haastateltiin yleisesti paikalla olleita talotekniikka-asentajia sekä työmaasta vastaavia henkilöitä. Haastattelujen tavoitteena oli tunnistaa etukäteen mahdollisia ongelmakohteita, joihin kiinnittää huomiota kierroksella, sekä sellaisia ongelmia, jotka eivät olisi enää nähtävissä työmaalla. Haastattelut olivat muodoltaan teemahaastatteluja, jossa haastattelija ohjasi keskustelua kysymyksillä.

2.3 Tulokset

2.3.1 Tapaus 1

Työmaan johdon haastattelun perusteella yleisiä ongelmakohteita asuinkerrostalojen työmaalla ovat alakattojen korot huoneistoissa. Tekniikan sovittaminen suunniteltuihin alakattokorkoihin on työlästä eikä se ole aina mahdollista. Tämä on ongelmallista, koska alakattokorot on ilmoitettu myyntiesitteissä, eikä korkojen muuttaminen jälkikäteen ole siksi ongelmatonta.

Toinen työmaanjohdon havaitsema toistuva ongelma oli paikalla valettavien rakenteiden raudoitusten ja viemärin yhteentörmäys. Ongelma on esitetty kuvassa **1**. Kuvasta nähdään, että tietomallissa palkkia ei ole esitetty rakenneleikkausta vastaavalla tavalla. Kuvassa punainen katkoviiva esittää rakenneleikkauksen mukaista palkin sijaintia. Tämä poikkeama esitystavassa on johtanut siihen, että palkin lävistävälle viemärille ei ole tehty reikävarausta. Reikävarauksen puuttuminen taas johtaa ylimääräiseen suunnitteluun työmaalla, koska palkin raudoituksen suunnittelussa ei ole huomioitu palkkia lävistävää viemäriä.



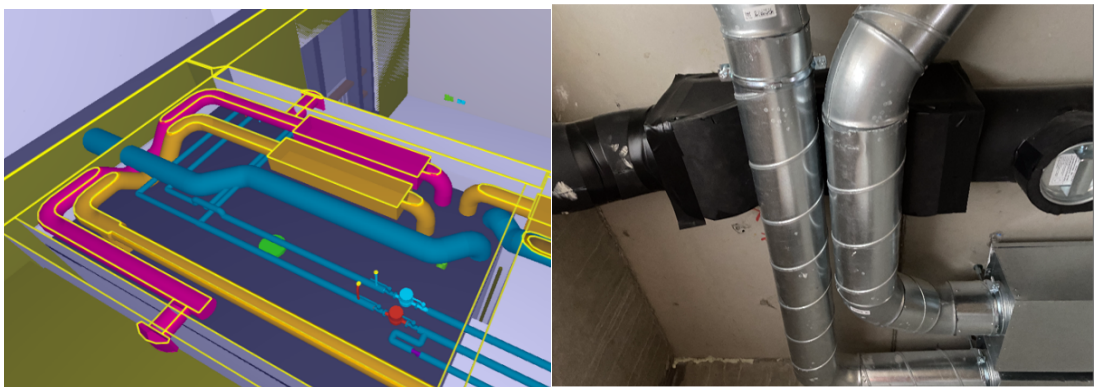
Kuva 1. Viemäri lävistää palkin, joka on esitetty tietomallissa puutteellisesti. Punainen katkoviiva osoittaa rakenneleikkauksen mukaisen palkin sijainnin.

Työmaahavaintojen perusteella paikalla valettaviin välipohjiin tehtävien asennusten sijainneissa oli poikkeamia suhteessa suunnitelmiin. Välipohjiin asennettavat sähköjohtojen asennusputket, vesijohtojen suojaputket sekä laatan läpiviennit olivat useasti eri kohdissa työmaalla suunnitelmiin verrattuna. Läpivientien paikat sekä putki ja kaapelireittien paikat valuun määrittää haastattelun perusteella erillinen mittamies, joka ei ole talotekniikan asentaja.

Suunnitelmista poikkeaville paikoille tehdyt asennukset hankaloittavat alakattoihin asennettavan tekniikan asentamista. Esimerkiksi ilmanvaihtokanavaa ei voida asentaa kiinni laattaan, jos kanavan kohdalla laatan lävistää suuri määrä sähköjohtojen asennusputkia. Tämä saattaa johtaa alakattokoron laskemiseen ja vaikeuttaa sekä ilmanvaihtoasennusta että sähköasennusta. Sähköjohtojen asennusputkien tilantarve on nähtävissä kuvista 2a ja 2b. Tyypillisesti näitä asennusputkia ei mallinneta ollenkaan, mikä vaikeuttaa ongelmakohtien havaitsemista suunnitteluvaiheessa.

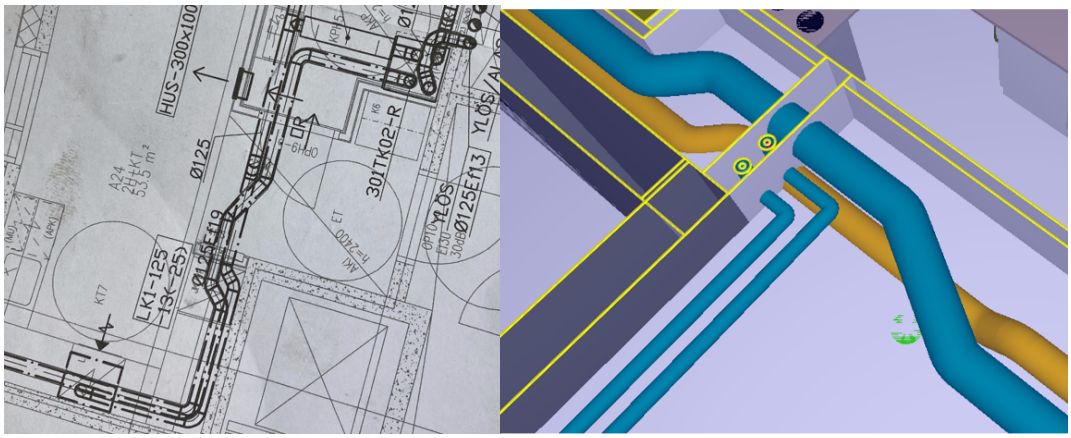
Kuvat 2a ja 2b. 2a (vasen) Suuri määrä sähköjohtimien asennusputkia, joita ei esitetä tietomallissa. 2b (oikea) Sähköjohtojen asennusputket tulevat laatasta läpi äänenvaimentajan yläpuolella.

Ilmanvaihtokanavien asentamiseen suunnitelmien mukaan liittyi edellä kuvatun lisäksi kaksi poikkeamatyyppiä: kanavien ylityksien asentaminen ja asentaminen pieneen tilaan. Suunnitelmissa ilmanvaihtokanavien ylitykset oli suunniteltu pyöreällä kanavalla, mutta kaikissa huoneistoissa ylitykset oli tehty käyttäen erikoisvalmisteista ylitysosaa, joka mahdollistaa ylityksen tekemisen matalammassa tilassa. Käyttämällä ylitysosaa voidaan pitää alakattokorot mahdollisimman korkealla. Ylityksen tekeminen pyöreällä kanavalla olisi tarkoittanut alakattokoron laskemista suunnitellusta. Esimerkki suunnitellusta ja toteutetusta kanavien ylityksestä esitetty kuvissa 3a ja3b.Toinen poikkeama liittyi kanavien reitityksiin muutamissa erityisen ahtaissa kylpyhuoneissa. Kanavareittejä oli muutettu niin että yksi kanava oli reititetty viereisen eteisen alakatossa, jolloin kylpyhuoneeseen jäi enemmän tilaa asennukselle. Reitityksen muuttaminen oli mahdollista, koska eteiseen oli suunniteltu valmiiksi alakatto, jossa kanava mahtui kulkemaan.



Kuvat 3a ja 3b. 3a (vasen) Ilmanvaihtokanavien ylitys suunniteltu pyöreillä kanavilla. 3b (oikea) Ilmanvaihtokanavien ylitys toteutettu erikoisosalla.

Työmaatutkimuksen aikana ilmanvaihtoasentajia haastateltaessa tuli ilmi tapaus, jossa asentaja ei käyttämänsä suunnitelman (Kuva 4a) perusteella pystynyt ymmärtämään syytä kanavien epäsuoralle reitille. Asentaja oli aikeissa asentaa kanavat suoraan linjaa, koska se on asennusteknisesti helpompaa. Kuvassa 4b nähdään, että kanavien reitityksellä syynä on lämpöjohtonousu, jota ei mahduta asentamaan, jos kanavat asennetaan suoralle linjalle.

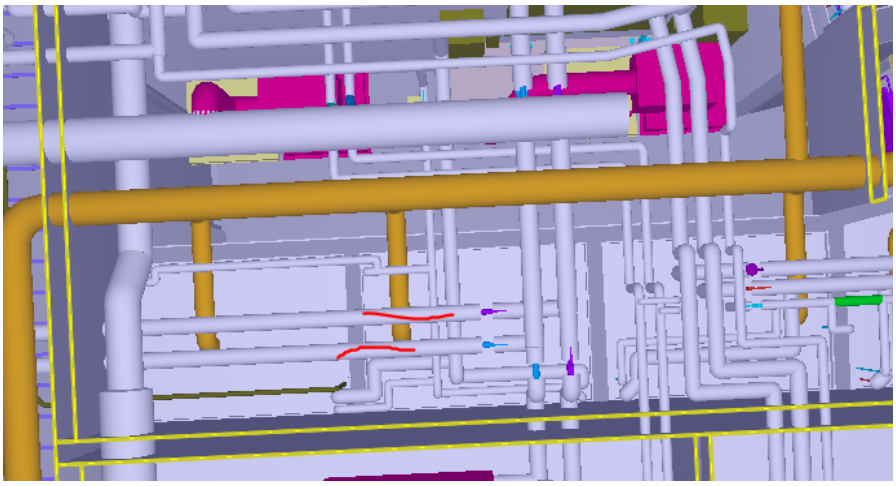


Kuvat 4a ja 4b.4a (vasen) IV-tasokuva, jossa ei näy syytä kanavien reitityksellе. 4b (oikea) Tietomalli, jossa näkyy, että kanavilla on väistetty lämpöjohtoja.

2.3.2 Tapaus 2

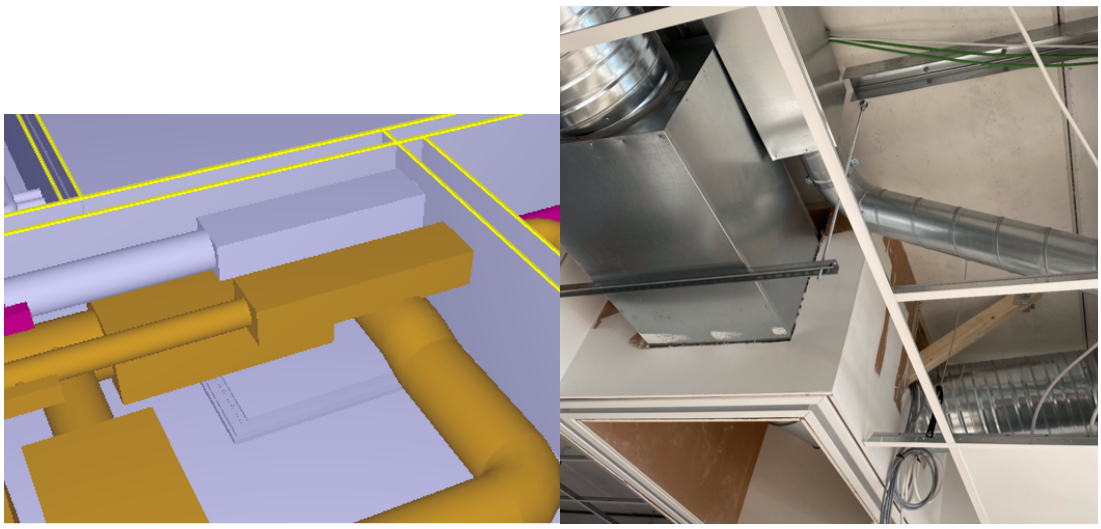
Tapauksen 2 työmaalla oli paljon asennettavuuteen liittyviä poikkeamia. Muutostarpeita aiheuttivat suunnittelemattomat rakenteet, ongelmat asennettavuudessa ja rakennusaikataulu. Suunnittelemattomat rakenteet aiheuttivat työmaalla risteilyjä, joita ei ollut voitu ratkaista suunnitteluvaiheessa tietomallin tarkkuuden takia. Asennettavuuteen liittyi poikkeamia, joissa asentajat olivat tehneet muutoksia suunnitelmiin oman työnsä helpottamiseksi tai mahdollistamiseksi. Rakennusaikataulu aiheutti asennusjärjestyksen muuttamisen suunnitelmista poikkeavaksi.

Suunnittelemattomista rakenteista esimerkkejä ovat wc-ryhmien väliseinät, siirtoseinän tukirakenteet sekä alakattojen rungot. Tietomallissa wc-ryhmien väliseinät oli mallinnettu alakattoon asti, vaikka todellisuudessa kivirakenteiset seinät oli rakennettu välipohjaan asti (kuva 5). Tämä olisi aiheuttanut huomattavan määrän suunnittelemattomia läpivientejä kiviseiniin putkilla. Läpivientien välttämiseksi asentajat olivat reitittäneet putkia viereisille käytäville. Ylimääräisten läpivientien lisäksi asentaja kertoi, että korkealla työskentely pienissä tiloissa on haastavaa, koska sinne ei mahdu viemään työturvallisuusvaatimusten mukaista työskentelytasoa.



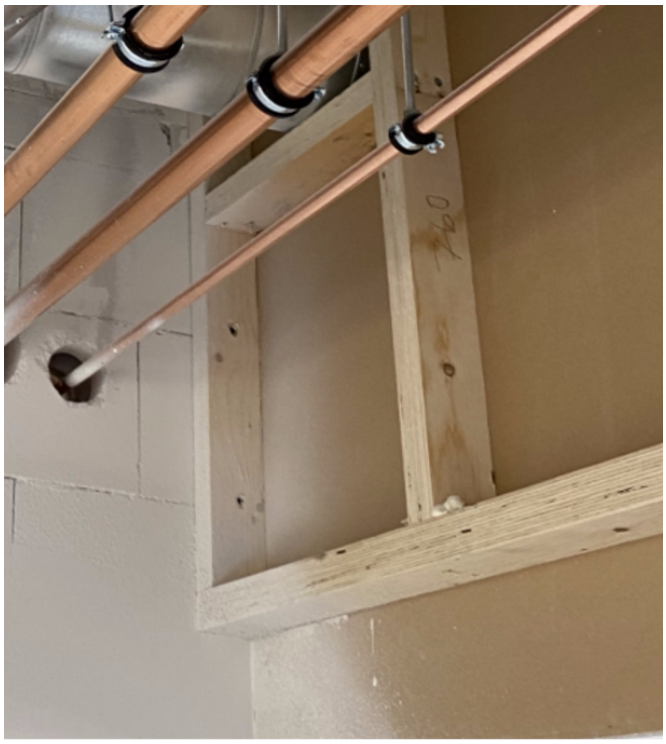
Kuva 5. Kuvan alalaidassa nähdään wc-tilojen väliseinät, jotka on mallinnettu alakattoon asti, sekä seinien yläpuolella kulkevat putket jotka todellisuudessa kulkevat seinien läpi.

Siirtoseinän mallintamaton rakenne aiheutti törmäyksen ilmanvaihtokanavien kanssa. Suunniteltu asennus ja toteutettu asennus esitetty kuvissa 6a ja 6b. Törmäyksen välttämiseksi kanavia oli reititetty uudestaan, mikä oli johtanut äänenvaimentimen asentamiseen irti rakenteesta. Tämä johtaa siihen, että järjestelmä ei toimi ääniteknisesti suunnitellulla tavalla.



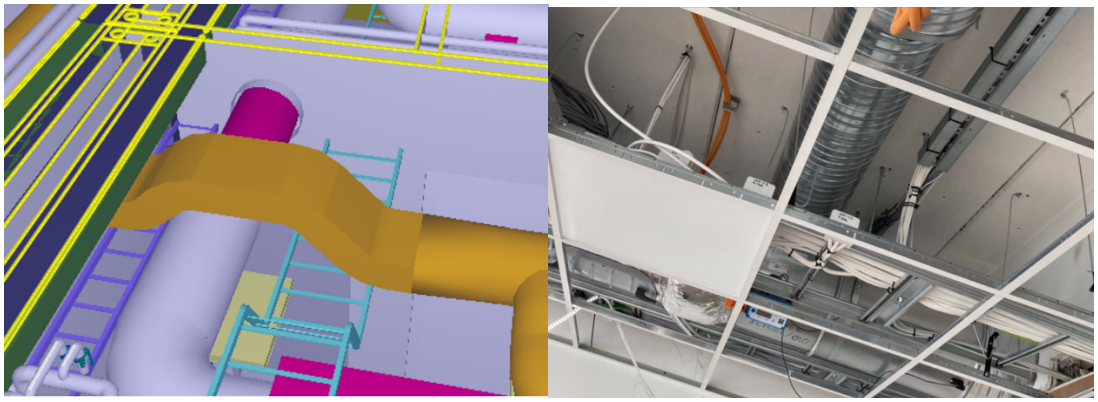
Kuvat 6a ja 6b. 6a Siirtoseinän tukirakenne puuttuu tietomallista. 6b Siirtoseinän tukirakenne työmaalla, kanavat osittain koteloitu ja osittain siirretty.

Alakattojen rungot, joita ei ollut esitetty tietomallissa, aiheuttivat muutamissa tiloissa tarpeen alakattokorkeuden muuttamiselle työmaalla. Suunniteltu alakattokorkeus ei mahdollistanut kanavan viemistä läpi otsapinnasta tilan puolelle ilman alakaton tukirakenteen lävistämistä. Asennuksen tekemiseksi alakaton korkeutta laskettiin. Esimerkki alakattorungosta on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Alakaton otsapinnan tukirakenne, jota ei mallinnettu.

Joissain tapauksissa asentajat olivat yksinkertaistaneet asennuksia oman työnsä helpottamiseksi. Esimerkiksi kahden suuren ilmanvaihtokanavan keskinäinen ylitys alakatossa oli suunniteltu suorakaidekanavalla, mutta toteutettu pyöreällä kanavalla (kuvat 8a ja 8b). Ylitys mahduttiin tekemään pyöreällä kanavalla, joka on sekä virtausteknisesti että materiaalin ja asennustyön näkökulmasta edullisempi. Asentajan näkemyksen mukaan kyseiselle paikalle suunniteltu suorakaidekanava laippaliitoksineen olisi tarvinnut pyöreää kanavaa suuremman tilan. Toinen yleinen esimerkki, missä asentajat olivat yksinkertaistaneet asennuksia, olivat viemärihajotukset. Viemärihajotukset oli tehty suunnitelmia pienemmällä materiaalimäärällä.



Kuvat 8a ja 8b. 8a (vasen) Suorakaidekanavalla suunniteltu kanavien keskinäinen ylitys. 8b (oikea) Kanavien keskinäinen ylitys tehty pyöreillä kanavilla.

Rakennusaikataulusta johtuvat asennusjärjestykset eivät aina vastaa suunnittelussa oletettua asennusjärjestystä. Kohteessa asennusjärjestystä oli muutettu siten, että putkiasennuksia tehtiin ennen ilmanvaihtoasennuksia. Ylimmäksi suunnitellut ilmanvaihtokanavat oli alun perin ollut tarkoitus asentaa ensimmäisenä. Ilmanvaihtoasennukset tehtiin kuitenkin P1-puhtausluokassa, mikä tarkoittaa, että samanaikaisesti tiloissa ei voida tehdä pölyäviä töitä. Putkiasennukset taas voidaan tehdä yhtä aikaa muiden runkovaiheen pölyävien täiden kanssa, joten ne oli aikataululllisesti järkevämpää tehdä ensin. Asennusjärjestyksen muuttaminen aiheutti tilanteessa työmaalla normaalia enemmän suunnittelua, kun kertaalleen yhteensovitetut suunnitelmat eivät enää pitäneet kaikilta osin paikkaansa. Asennusjärjestyksen muuttaminen oli lisäksi vaikeuttanut merkittävästi ilmanvaihtoasennusta sellaisissa paikoissa, missä ilmanvaihtokanavat oli pakko asentaa ylimmäksi, vaikka alapuolelle tuleva tekniikka oli jo asennettu. Tällaisen tilanteen aiheutti esimerkiksi käytävälle ylemmästä kerroksesta tuotavat ilmanvaihdon runkokanavat (kuva 9).

Kuva 9. Suuret ilmanvaihtokanavat asennettu ylimmäksi sähköhyllyjen asennuksen jälkeen.

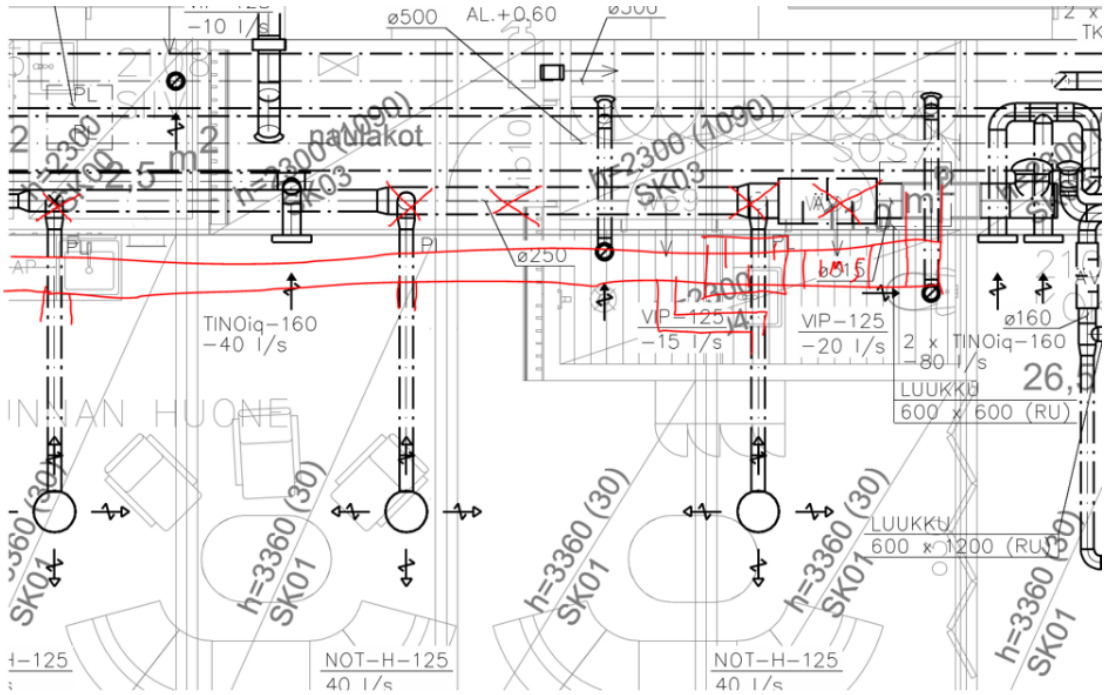
Kaikissa tiloissa toistuva poikkeama Tapauksessa 2 oli suunnittelemattomien kaapelihyllyjen asentaminen. Tiloihin ei ollut suunniteltu kaapelihyllyjä kaapelien asentamiseksi tilassa sijaitseville sähköpisteille. Työmaalla oli kuitenkin päädytty asentamaan kaikkiin tiloihin kaapelihyllyt. Kaapelien asentaminen oli helpointa tehdä hyllyjen päälle. Vaihtoehtoisena ratkaisuna

voisi olla esimerkiksi putkitus, joka tässä tapauksessa ei kaapelimäärästä johtuen ollut järkevä vaihtoehto.

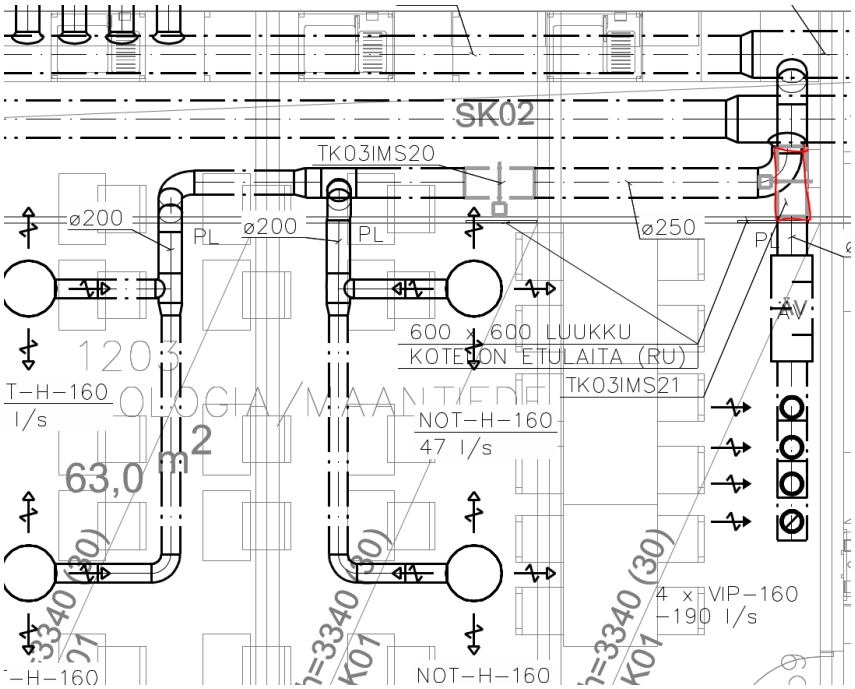
2.3.3 Tapaus 3

Tapauksen 3 työmaalla suurin osa havaituista poikkeamista liittyi puutteellisiin asennustiloihin. Työmaalla käytettävissä olevat asennustilat poikkesivat merkittävästi suunnitelluista tiloista, jolloin asennusten tekemiseksi jouduttiin tekemään poikkeamia suunnitelmiin. Poikkeamien havainnointi oli Tapauksia 1 ja 2 haastavampaa, koska käytössä ei ollut ajantasaista tietomallia, jossa olisi ollut kaikki tekniikka esitettynä. Asennuksen ja suunnitelman vertaamisessa käytettiin tasokuvia, jolloin puutteiden määrittäminen ja tunnistaminen on haastavampaa. Esimerkiksi asennusjärjestykset sekä tarkat reitit on vaikeampi määritellä pelkkien tasokuvien perusteella.

Useassa paikassa käytävän tai alaslaskun leveys ei riittänyt suunnitelluille asennuksille ja kanavia jouduttiin reitittämään suunnitelmasta poiketen näkyvillä huonetilojen puolella (kuva 10). Kanavien reitittämisen lisäksi tilan ahtaus johti myös siihen, että piiloon suunniteltuja IMS-säätöpeltejä oli asennettu luokkatilojen puolelle, jolloin pelti ja sen toimilaite jää näkyviin tilaan (kuva 11). Lisäksi kuvassa 11 nähdään että tulokanavan IMS-säätöpellin jälkeen puuttuu äänenvaimennin. Muissa tiloissa äänenvaimennin on suunniteltu aina IMS-pellin jälkeen.

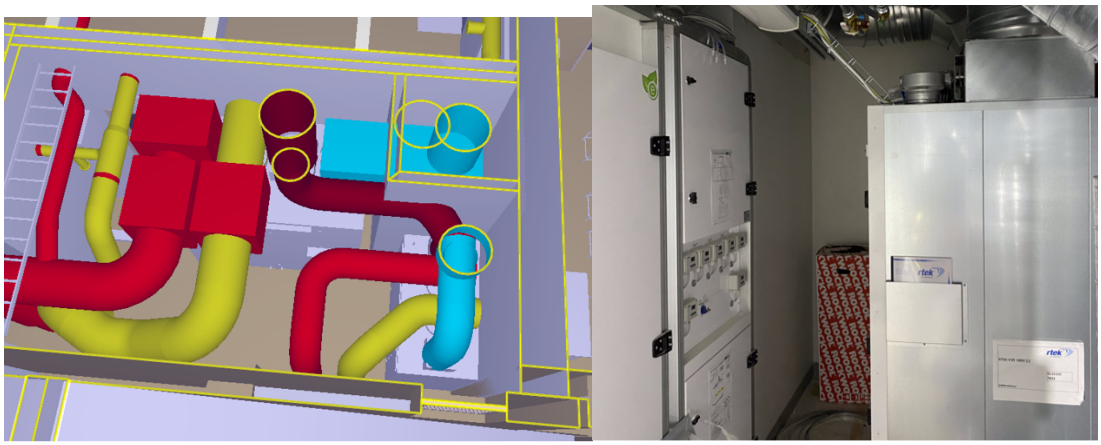


Kuva 10. Ilmanvaihtokanavan uudelleenreititys, syynä liian pieni asennustila alakatossa.



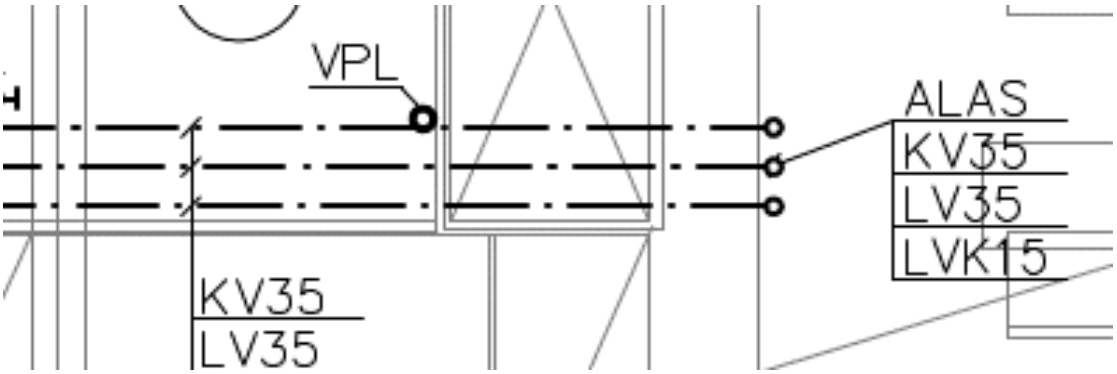
Kuva 11. Kuvan oikeassa laidassa punaisella korostettu säätöpelti ei mahtunut alakattoon ja päädyttiin asentamaan tilan puolelle.

Ilmanvaihtokonehuoneessa toinen ilmanvaihtokone oli suunniteltu konehuoneen peräseinälle. Konehuone oli todellisuudessa pienempi kuin suunnitelmassa, jolloin ilmanvaihtokone asennettiin vastakkain toisen ilmanvaihtokoneen kanssa (kuvat 12a ja 12b). Ratkaisun takia ilmanvaihtokoneille ei jää riittäviä huoltotiloja koneiden eteen osien huoltamiseksi ja vaihtamiseksi.



Kuvat 12a ja 12b. 12a (vasen) Ilmanvaihtokoneiden suunnitellut asennuspaikat. 12b (oikea) Ilmanvaihtokoneet asennettu vastakkain.

Kohteessa käyttövesi- ja lämmitysputkireittejä oli muutettu useissa paikoissa. Putkilla väistettiin ilmanvaihto- ja sähköasennuksia. Osittain poikkeamat johtuivat puutteellisista tiloista ja osittain puutteellisesta suunnittelusta. Puutteellisten tilojen takia ilmanvaihtokanavia oli jouduttu reitittämään suunnitelmista poiketen, mikä aiheutti muutostarpeen myös putkireittien osalta. Tietomallinnuksen puutteen vuoksi suunnitelmiin oli jäänyt sellaisia risteilyjä jotka olisi voitu ratkaista suunnittelussa (kuvat 13 ja 14).



Kuva 13. Käyttövesiputket suunniteltu hormin läpi. Asennuksessa ilmanvaihtokanavia täynnä oleva hormi kierrettiin.

Kuva 14. Lämmitysputkilla väistetty ilmanvaihtokanavia. Kuvassa näkyvissä läpiviennit kanavia varten.

Muutoksia kanavareititykseen aiheuttivat myös kantavat rakenteet, joita ei ollut huomioitu suunnittelussa. Ilmanvaihtokonehuoneesta alempaan kerrokseen suunniteltu kanava ei mahtunut hormin kohdalla olevan palkin ohi. Tilanteen korjaamiseksi kanava oli haaroitettu jo konehuoneessa, jolloin alempaan kerrokseen pystyttiin viemään pienempi kanava.

2.4 Ongelmien tunnistaminen etukäteen

Suomessa talotekniikkasuunnittelija on koulutukseltaan insinööri tai diplomi-insinööri, jolla ei yleensä ole asennus- tai työmaakokemusta eikä siksi käsitystä asennuksen vaatimuksista suunnittelulle. Eräs ratkaisuvaihtoehto suunnitelmien asennettavuuden parantamiseen on asentajanäkökulman tuominen suunnitteluun. Toimintamalli perustuu siihen, että asentaja tietää, miten asennukset tehdään, joten asennuksen vaatimat seikat voidaan ottaa paremmin huomioon suunnittelussa. Tämä mallin testaamiseksi projektin aikana järjestettiin haastattelutilaisuus, jossa kaksi asentajaa arvioi Tapauksen 2 tietomallia ja pyrki tunnistamaan sieltä asennuksessa kohdattavia ongelmia. Asentajat olivat sähköasentaja sekä ilmanvaihtoasentaja. Molemmilla asentajilla oli useiden vuosien asennuskokemus, enimmäkseen asuinkerrostalotyömailta.

Haastattelun tuloksena sähköasentaja tunnisti välittömästi puutteeksi kaapelihyllyjen puuttumisen luokkatiloista. Asentajalle oli selvää, että kaapelien viemiseksi sähköpisteiden luo tarvittaisiin kaapelihylly tai vastaava ratkaisu. Muissa tiloissa sähköasentaja arvioi kaapelihyllyjen reittien olevan vaikeasti asennettavia toistuvien korkeuden muutosten vuoksi. Näitä samoja korkeuden muutoksia oli poistettu ja kaapelihyllyn reittiä yksinkertaistettu työmaalla.

Ilmanvaihtoasentaja tunnisti myös muutamia kohtia, joissa suunnitelmien mukaan asentaminen ei ole mahdollista. Tällaisia olivat esimerkiksi 90° kulmaosan muuttaminen T-kappaleeksi ylemmästä kerroksesta tultaessa suurella kanavalla. Näin asennus mahdutaan tekemään alakaton yläpuolisessa tilassa ja saadaan puhdistusluukku asennettua samalla. Lisäksi ilmanvaihtoasentaja pohti yleisesti ns. lentoratojen puutetta suunnittelussa. Jatkuvat korkeuden muutokset aiheuttavat haasteita työjärjestyksen yhteensovittamisessa. Jos tietty tekniikka kulkee aina tietyllä korkeudella, on asennusten tekeminen helpompaa tekniikan ala kerrallaan ylhäältä alaspäin.

Suurimpina puutteina nykyisessä suunnittelussa asentajat tunnistivat:

- Risteilyt suunnitelmissa
- Kannakkeiden huomioiminen
- Lentorata ajattelun puute
- Eristeiden huomioiminen asennuksessa
- Paikallavalettavien rakenteiden toleranssit

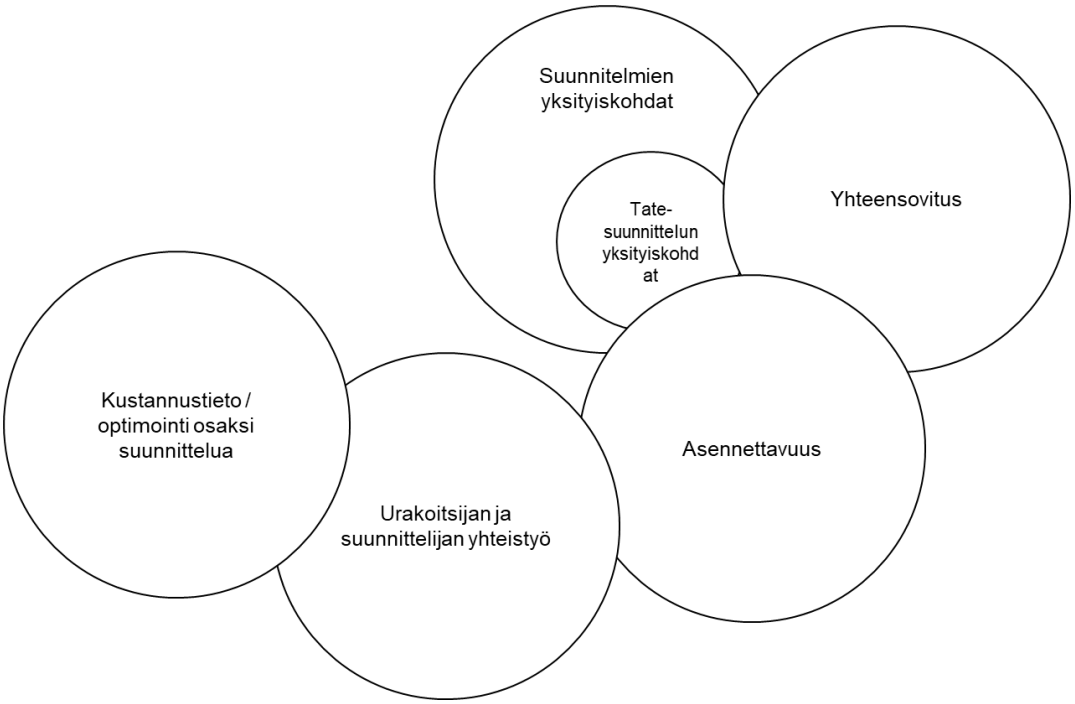
2.5 Ratkaisuehdotus

Yhteenvetona tuloksista voidaan todeta että: 1. Suunnittelussa jää ongelmia ratkaisematta tietomallien matalan tarkkuustason takia, 2. Laitteiden todellisen koon ja asennuksen vaatiman tilan huomioon ottamisessa on puutteita, 3. Asentajat osaavat yksinkertaistaa suunnitelmia oman työnsä helpottamiseksi.

Työmailla havaittavien ongelmien ratkaisu vaatii muutoksia toimintamalleihin sekä suunnittelussa että asennuksessa. Tulosten perusteella esitettävä toimintatavan muutos on kuvattu kuvassa 15.

Kaikilla kolmella työmaalla havaittiin puutteita yhteensovituksessa. Yhteensovituksen parantamiseksi tavoitteena pitäisi olla: 1) törmäyksetön tietomalli, 2) yhteensovitus, jossa arvioidaan asennettavuutta ja asennusjärjestystä törmäilyjen lisäksi sekä 3) tietomallin tarkkuustason kasvattaminen ongelmien havaitsemiseksi suunnitteluvaiheessa.

Tämän tutkimuksen tulosten perusteella tietomallien nykyinen tarkkuustaso ei mahdollista kaikkien ongelmien havaitsemista suunnitteluvaiheessa. Puutteita on sekä talotekniikan tietomallien tarkkuudessa että arkkitehti- ja rakennemalleissa. Suunnitelmien yhteensovittamisen lisäksi tulisi kiinnittää erityisesti huomiota talotekniikan asennettavuuteen. Moni asentaja kommentoi asentamisen tarvitsemaa tilaa ja sen ottamista huomioon suunnittelussa. Asennettavuudella tässä tarkoitetaan sitä, että laitteiden mahtuminen tietomalliin on eri asia kuin laitteiden asennuksen vaatima tila. Tämä voi tarkoittaa kokoamisen vaatimaa tilaa tai työskentelyyn tarvittavien välineiden vaatimaa tilaa.



Kuva 15. Suunnittelussa parannettavia osa-alueita.

Asennettavuuden arviointiin paras osaaminen on henkilöillä, jotka tekevät asennusta. Tämän tutkimuksen tulosten perusteella asentajat tekevät suunnitelmiin muutoksia. Osa näistä muutoksista on työtä helpottavia ja kokonaistaloudellisesti suunnitelmaa parempia ratkaisuja. Osa työmaalla tehdyistä muutoksista kuitenkin heikentää järjestelmien teknistä toimivuutta. Tästä syystä asennussuunnittelua ei voida kokonaan ulkoistaa asentajalle, vaan suunnittelussa tarvi-

taan loppuun asti järjestelmien toiminnan tunteva suunnittelija. Asennuskokemuksen tuomisella suunnitteluun voitaisiin kuitenkin tehostaa työmaan toimintaa tekemällä suunnittelu enemmän tulevaa asennusta vastavaksi.

Testissä, jossa suunnitelmien puutteita yritettiin asentajien kanssa havaita etukäteen pelkästään suunnitelmien perusteella, huomattiin, että tiettyjä puutteita, kuten suunnitelmista selkeästi puuttuvia komponentteja, on helppo tunnistaa etukäteen. Puuttuvien komponenttien lisäksi asentajille on helppo tunnistaa tiettyjä kohtia, joissa he käyttävät tavallisesti tiettyjä osia suunnitelmasta riippumatta. Suunnitelmien perusteella ei kuitenkaan voitu tunnistaa sellaisia työmaalla havaittuja poikkeamia, jotka ovat syntyneet tietomallin puutteellisen sisällön takia. Esimerkiksi raportoitu törmäys siirtoseinän rakenteen kanssa ei näytä tietomallissa asentajan mielestä ongelmalta samasta syystä, jonka takia suunnittelija ei ole ratkaissut ongelmaa jo suunnitteluvaiheessa.

3 Esivalmistuksen suunnitteluvaatimukset (perustuu Lindberg 2022)

3.1 Taustaa

Aikaisempi tutkimus on osoittanut, että esivalmistuksen hyödyntäminen rakennusprojekteissa lisää tuottavuutta, vähentää hävikkiä ja parantaa lopputuloksen laatua (Gann 1996; Lu 2009). Havaittujen hyötyjen vuoksi esivalmistus on nähty keskeisenä keinona, kun rakennusalaa kehitetään kohti parempia ja kestävämpiä toimintatapoja.

Suomessa esivalmistetaan runsaasti tiettyjä rakennusosia, kuten betonielementtejä, mutta talotekniikan esivalmistus on rajoittunut pääosin tilapohjaisiin ratkaisuihin, esimerkiksi kylpyhuone- tai IV-konehuone-elementteihin.

Lavikka ym. (2021) tutkivat esivalmistusta estäviä tekijöitä. Tutkimus osoitti, että esivalmistusasteen lisääminen talotekniikassa vaatisi toimintatapojen systeemisiä muutoksia. Ongelmia liittyi mm. sopimusteknisiin asioihin ja urakkarajoihin. Tämän hankkeen kannalta olennaisin aiemman tutkimuksen tulos oli kuitenkin se, että nykyiset talotekniikkasuunnitelmat eivät ole riittävän tarkalla tasolla esivalmistusta ajatellen.

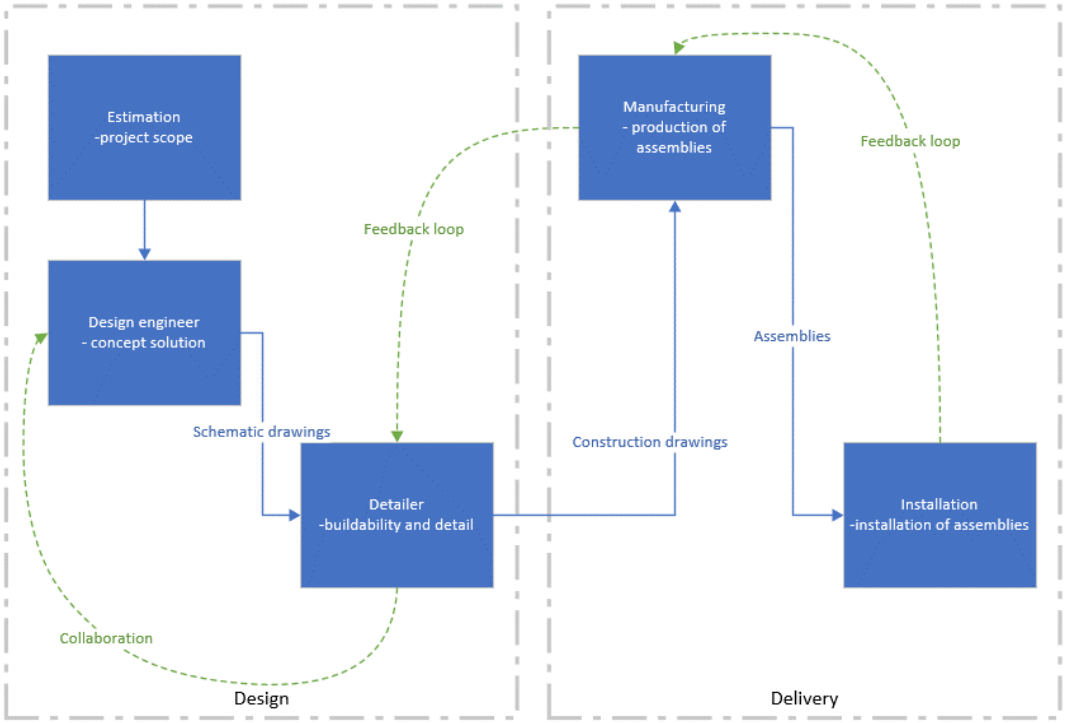
Tämän tutkimuksen lähtökohta oli selvittää, mitä esivalmistuskelpoisuus käytännössä vaatii suunnittelulta. Yhdysvalloissa hyödynnetään esivalmistettua talotekniikkaa selvästi enemmän kuin Suomessa, joten osana tutkimusta järjestettiin tutkimusmatka Yhdysvaltoihin. Tutkimusmatkan aikana tutkittiin, miten esivalmistukseen panostanut talotekniikkayritys suunnittelee, esivalmistaa ja asentaa talotekniikkaa. Koska esivalmistusaste on jo kasvanut Yhdysvalloissa, voidaan suunnitteluvaatimukset selvittää tutkimalla siellä hyödynnettyä prosessia.

Tässä luvussa esitellään Southland Industriesin Kalifornian toimipisteessä käytettyjä suunnittelutapoja ja esivalmistusta. Yhtiö toimii LVI-urakoitsijana Yhdysvalloissa. Se on erikoistunut esivalmistetun LVI:n suunnitteluun, tuotantoon ja asennukseen.

Tietoa kerättiin järjestämällä teemahaastatteluja Southland Industriesin henkilökunnan kanssa. Haastateltavat edustivat erilaisista tehtäviä yrityksessä. Yhteensä kuudessa haastattelussa käsiteltiin suunnitteluprosessia, detaljisuunnittelua ja esivalmistetuotantoa. Käsiteltävät teemat rajattiin koskemaan suunnittelua, joten esimerkiksi urakkamuodot, tuotantoprosessit ja logistiikka jätettiin ulkopuolelle. Haastattelujen lisäksi tehtiin havaintoja Southland Industriesin talotekniikkatehtaalla ja työmaalla, jossa asennettiin esivalmistettua talotekniikkaa.

3.2 Case Southland

Southland Industries on yhdysvaltalainen LVI-urakoitsija, joka on erikoistunut esivalmistetun LVI:n suunnitteluun, tuotantoon ja asennukseen. Suurimman osan hankkeista se toteuteuttaa Design-Build -mallilla, jossa yhtiö suunnittelee, esivalmistaa ja asentaa. Tässä raportissa kuvatut prosessit liittyvät Design-Build -hankkeisiin. Southland Industriesin suunnittelu- ja tuotantoprosessi voidaan jakaa viiteen eri vaiheeseen, jotka on kuvattu kuvassa 16.



Kuva 16: Suunnittelun työnkulku Southland Industriesillä

1 - Kustannusten arviointi

Southland Industriesin suunnitteluprosessin ensimmäinen vaihe on kustannusten arviointi. Siinä arvioidaan, millaisia taloteknisiä ratkaisuja hanke tulee vaatimaan ja selvitetään urakan laajuus. Tässä vaiheessa päätetään myös, missä laajuudessa hankkeessa hyödynnetään esivalmistettua LVI-tekniikkaa.

Esivalmistetun LVI-tekniikan suunnittelu vaatii enemmän suunnitteluresursseja verrattuna perinteisiin suunnitteluratkaisuihin, joten se ei aina ole kannattava vaihtoehto. Jos hankkeen LVI-tekniikka on yksinkertaista ja tilavaatimukset joustavia, perinteisillä suunnitteluratkaisuilla voidaan päästä kannattavampaan lopputulokseen kuin esivalmistamalla. Kustannusarviovaiheessa ei tehdä varsinaista suunnittelua, vaan arvioidaan erilaisia etenemisvaihtoehtoja ja laaditaan alustava kustannuslaskelma vaihtoehtojen perusteella.

Kustannuslaskennan perusteella tilaajalla on mahdollisuus vaikuttaa siihen, miten suunnitteluprosessin on edettävä, jotta tilaaja saa mahdollisimman paljon hyötyä investoinnista. Kustannusarviovaiheessa arvioidaan myös hankkeen elinkaari ja sen vaikutus käytettyjen ratkaisuihin. Vaiheen lopputuloksena saadaan yhteinen päätös siitä, miten suunnitteluprosessia jatketaan.

2 - Konseptisuunnittelu

Seuraavassa vaiheessa suunnitteluprosessissa suunnitteluinsinööri (design engineer) laatii konseptiratkaisuja hankkeelle. Suunnitteluinsinöörin rooli muistuttaa LVI-insinöörin roolia Suomessa, sillä työtehtävät ja vastuut ovat hyvin samanlaisia. Suunnitteluinsinööri muun muassa selvittää lämpökuormat ja tarvittavat ilmamäärät ja suunnittelee konseptiratkaisuja, joilla päästään tilaajan tavoitteeseen. Ratkaisujen täytyy noudattaa paikallisia rakennusmääräyksiä (building code) ja suunnitteluinsinöörin on varmistettava, että suunnitellut ratkaisut ovat hyväksyttävissä.

Tässä vaiheessa ei vielä priorisoida suunnitelmien asennuskelpoisuutta, koska järjestelmien reititys muuttuu suunnitteluprosessin edistyessä. Liian yksityiskohtainen suunnittelu tässä vaiheessa olisi tarpeetonta. Runkolinjojen ja päätelaitteiden alustavilla sijainneilla voidaan kuitenkin karkeasti varmistaa lopputuloksen tekninen toimintakyky, mikä riittää konseptivaiheessa. Konseptiratkaisujen pohjalta voidaan jatkaa suunnittelua ja lisätä tarkkuustasoa. Tällöin asennuskelpoisuuden varmistaminen on oleellista.

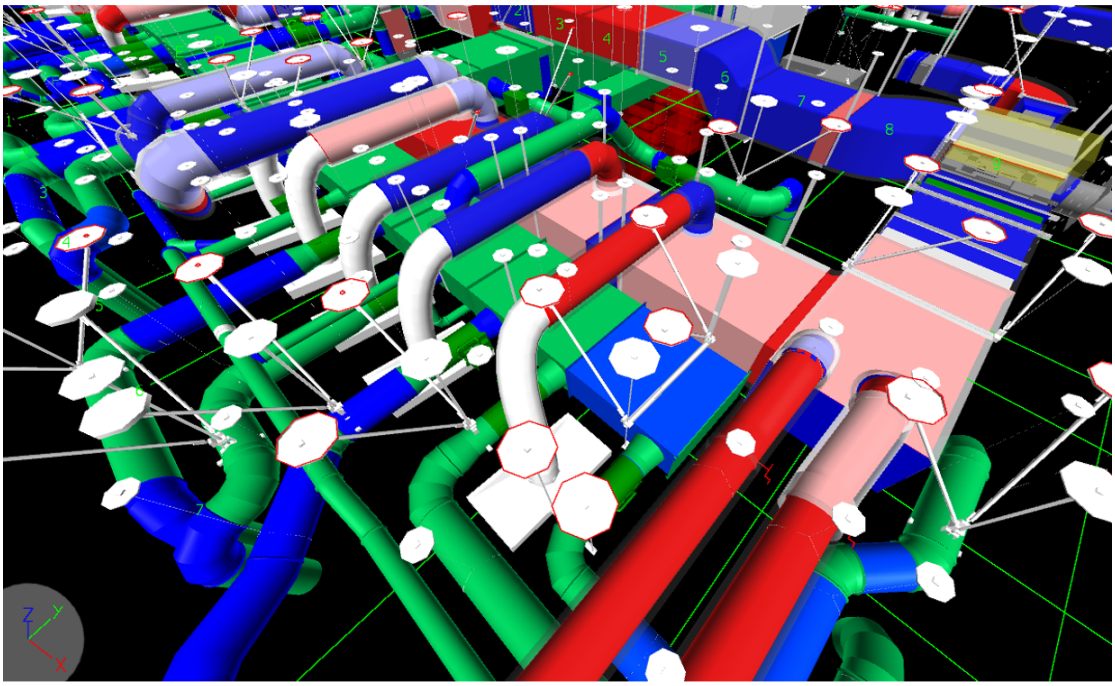
3 - Detaljointi

Seuraavasta vaiheesta Southland Industriesin suunnitteluprosessissa vastaa detaljoija (detailer). Detaljoijan tehtävä on kehittää suunnitteluinsinöörin laatimat konseptiratkaisut asennuskelpoisiksi ja tehdä esivalmistepiirustuksia konepajalle. Detaljoijiksi yhtiö valitsee entistä työmaahenkilökuntaa, jolla on asennuskokemusta. Haastatteluissa selvisi, että detaljoija tarvitsee aiempaa asennuskokemusta ja käytännön asiantuntijuutta asennustyöstä.

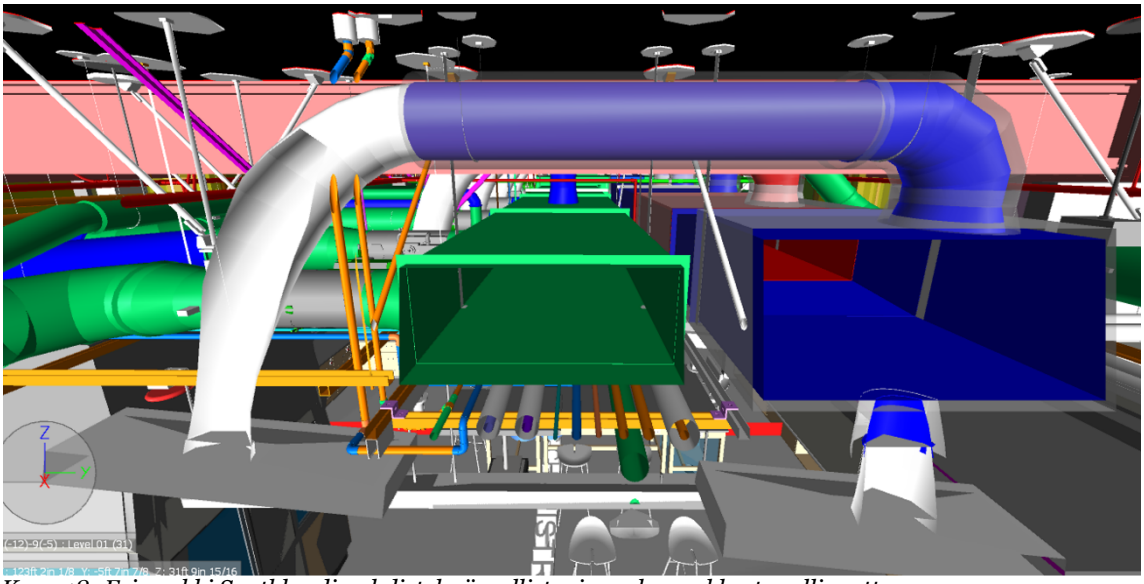
Suunnitelmien detaljointiin kuuluu tarkempi LVI-järjestelmien reititys, törmäystarkastelu ja kannakointisuunnittelu. Törmäystarkasteluun panostetaan, koska ristiriidat suunnittelualan sisällä ja eri suunnittelualojen välillä estävät esivalmisteiden tehokkaan hyödyntämisen.

Kaikki tilaa vievät objektit on mallinnettava, jos halutaan tarkka törmäystarkastelu ja asennuskelpoiset suunnitelmat. Jos esimerkiksi kannakointi jää mallintamatta, mahdolliset ristiriidat estävät esivalmisteiden hyödyntämistä työmaalla.

Kun tarkka reititys ja kannakointi on suunniteltu ja malli on törmäystarkastettu, lopputuloksena on erittäin tarkka, törmäysvapaa ja yleensä rakennuskelpoinen tietomalli. Kuvissa 17 ja 18 on esitetty esimerkkejä tarkoista malleista, jossa kannakointi on mallinnettu.



Kuva 17: Esimerkki Southlandin mallista, jossa kannakkeet mallinnettu



Kuva 18: Esimerkki Southlandin yhdistelmämallista, jossa kannakkeet mallinnettu

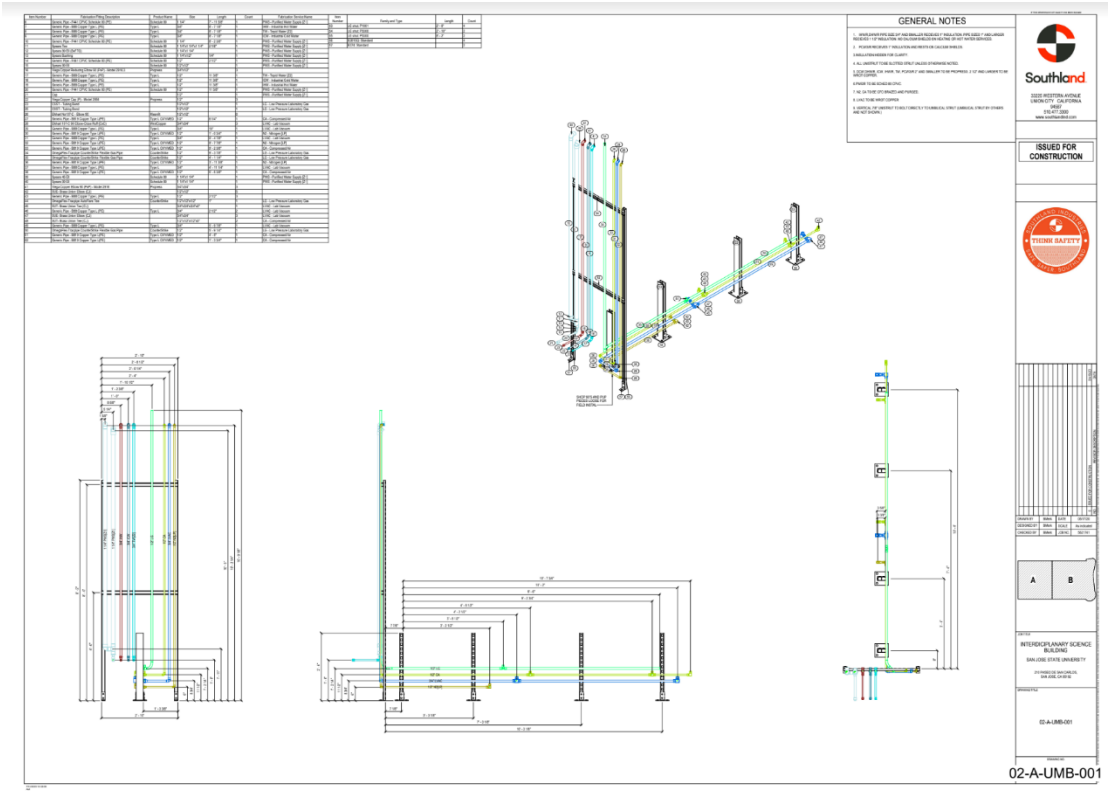
4 - Konenepajasuunnittelu

Tietomallin perusteella detaljoija ja konepajan asiantuntija tekevät esivalmistepiirustukset konepajalle. Malli pilkotaan esivalmistettaviksi kokoonpanoiksi ja kokoonpanoista tehdään konepajapiirustukset. Southland Industriesin konepajapiirustukset koostuivat isometrisistä kuvista esivalmisteesta, komponenttiluettelosta sekä mittatiedoista. Kuvassa 19 on esitetty esimerkki konepajapiirustuksesta.

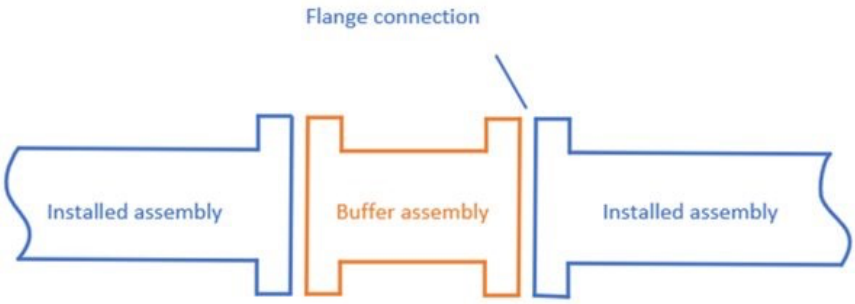
5 - Asennus

Tarkasta suunnittelusta huolimatta esivalmisteiden hyödyntäminen voi kuitenkin aiheuttaa haasteita työmaalla, koska asennus ei tapahdu millimetritarkkuudella. Toleranssivirheet on otettava huomioon, kun esivalmisteet tuotetaan konepajalla ja asennetaan työmaalla.

Toleranssivirheet voivat olla kertautuvia eli virheet kasvavat lineaarisesti, kun esivalmisteet kytketään toisiin esivalmisteisiin. Tämä ongelman Southland Industries on ratkaissut hyödyntämällä ns. strategisia puskureita. Menetelmässä osa esivalmisteista jätetään alkuvaiheessa valmistamatta. Kun viereiset esivalmisteet on asennettu, valmistetaan esivalmiste työmaalta otetuilla mittatiedoilla. Tällä menetelmällä voidaan torjua toleranssivirheitä, jotka syntyvät esivalmistusprosessissa tai työmaalla. Kuvassa 20 on esitetty esimerkki strategisesta puskurista.



Kuva 19: Esimerkki konepajapiirustuksesta.



Kuva 20. Strateginen puskuri visualisoitu

3.3 Biotuotetehdas

Kemin biotuotetehtaalla esivalmistettiin prosessiputkistot mutta rakennuksen muut järjestelmät tehtiin paikalla. Esivalmistus tapahtui sille varatulla alueella rakennustyömaan ulkopuolella teltoissa.

Suunnitteluprosessiin ei voitu tässä hankkeessa tutustua mutta prosessin lopputulos oli sama kuin Southlandilla – tietomalli oli tarkalla tasolla ja esivalmistus perustui isometrisiin konepajakuviin ja tarkkoihin materiaaliluetteloihin. Kannakointia ei kuitenkaan ollut havaittavissa tietomalleissa.

Kaikesta päätellen Suomessa on jo tarvittava suunnitteluosaaminen ja teollisuushankkeissa esivalmistetaan jo putkistoja. Paikalla tehty esivalmistus voisi olla helpompi tapa aloittaa esivalmistus kuin esimerkiksi tehtaisiin investointi.

3.4 Mallinnustestit MagiCadilla

MadiCAD-ohjelmistolla tehtiin testejä, joissa yritettiin tuottaa esivalmistusta vastaavat tiedot: isometriset näkymät kokoonpanosta ja määräluettelo. Testikohteeksi valittiin yksi Southland Industriesin esittelemä kokoonpano laboratorion työtilasta. Mallinnus tehtiin MagiCADin putkistosuunnittelutyökalulla ja mitat lisättiin AutoCadilla. Kannakointia ei mallinnettu.

Testin tulos oli, että nykyisillä mallinnustyökaluilla kokematonkin mallintaja kykeni tekemään esivalmistustason suunnitelmat, jossa näkyi isometrisissä kuvissa kaikki tarvittavat mitat ja määräluettelot. Tehtävä ei ollut teknisesti edes kovin monimutkainen. Tekniset edellytykset esivalmistustason suunnitteluun ovat siis olemassa, joten suurin ongelma on yritysten haluttomuus esivalmistaa ja investoida suunnittelutunteja esivalmistustason yhteensovitukseen ja tarkemman tason suunnitteluun.

3.5 Ehdotus Suomen prosessiksi

Southland Industriesin tapaustutkimus osoitti, että talotekniikan esivalmistaminen laajassa mitassa on mahdollista, mutta vaatii enemmän suunnittelua kuin perinteiset suunnitteluratkaisut. Keskeiset esivalmistusta mahdollistavat tekijät olivat tarkka tietomallikoordinointi, jossa kaikki tilaa vievät komponentit otetaan huomioon suunnittelussa, konepajapiirustuksien laadinta ja strategisten puskureiden hyödyntäminen.

Kaikki havaitut mahdollistajat kasvattavat suunnittelun työkuormaa. Tätä voidaan hallita erikoistumisella ja yhteistyöllä eli jakamalla eri henkilöille suunnitteluinsinöörin ja detaljoijan tehtävät. Suunnitteluinsinööri laatii konseptiratkaisuja ja ratkaisee teoreettiset ongelmat. Detaljoija viimeistelee mallit ja ratkaisee käytännön asennustekniset ongelmat. Tehtävien jakaminen mahdollistaa hallitun työkuormituksen. Roolit vaativat myös erilaista koulutusta ja kokemusta. Suunnitteluinsinööri on korkeakoulutettu (insinööri tai diplomi-insinööri) ja detaljoija on tyypillisesti asentajataustainen ammattilainen (esim. putki- tai IV-asentaja), jolla on pitkä työmaakokemus.

Koska työmaalla työryhmät tekevät detaljoinnin ja tarkan yhteensovituksen, asennustyössä syntyy merkittävää hukkaa (Seppänen ym. 2021). Tämä työ pitäisi siirtää suunnittelupöydälle ”virtuaaliseksi”.

Aiemmin Suomessa on keskusteltu lisätehtävistä LVI-suunnittelijalle. Tarkan tason suunnittelu ei kuitenkaan välttämättä ole suomalaisen LVI-suunnittelijan ydinosaamisaluetta. Detaljoijaroolin lisääminen LVI-suunnitteluun voisi mahdollistaa työkuorman jakamisen.

Käytännössä muutoksen voisi aloittaa siirtämällä kokeneita putkiasentajia ja IV-asentajia osaksi suunnitteluprosessia, esimerkiksi opettamalla heitä mallintamaan. Suunnitteluyritykset voisivat palkata asentajataustaisia detaljoijia tai LVI-urakoitsijat voitaisiin valita aiemmassa vaiheessa siten, että heidän detaljoijansa voisivat kehittää yhteistyössä suunnitteluryhmän kanssa suunnitelmat asennus- ja esivalmistuskelpoisiksi. Osan detaljoijien tehtävistä voisi toteuttaa suunnitteluautomaatiolla, jonka mahdollisuuksia kuvataan seuraavaksi.

4 Suunnitteluautomaation käyttökohteet ja ratkaisut talotekniikan suunnitellussa

Suunnitteluautomaatiolla voidaan tarkoittaa määritelmästä ja käyttöympäristöstä riippuen monia asioita. Tässä tutkimuksessa suunnitteluautomaatiolla tarkoitetaan sellaisia suunnittelijaa helpottavia toimintoja, jotka vähentävät suunnittelijan työmäärää tietyn tehtävän suorittamiseksi. Tässä luvussa käsitellään suunnitteluautomaation käyttökohteita talotekniikkasuunnittelussa. Menetelmänä käytetään systemaattista kirjallisuuskatsausta ajantasaisen tutkimuskirjallisuuden löytämiseksi sekä avoimia internethakuja kaupallisien ratkaisujen löytämiseksi. Lopuksi arvioidaan löydettyjen ratkaisujen soveltuvuutta suunnittelun automatisoimiseksi sekä aiemmissa luvuissa todettujen suunnittelun ongelmien ratkaisemiseksi.

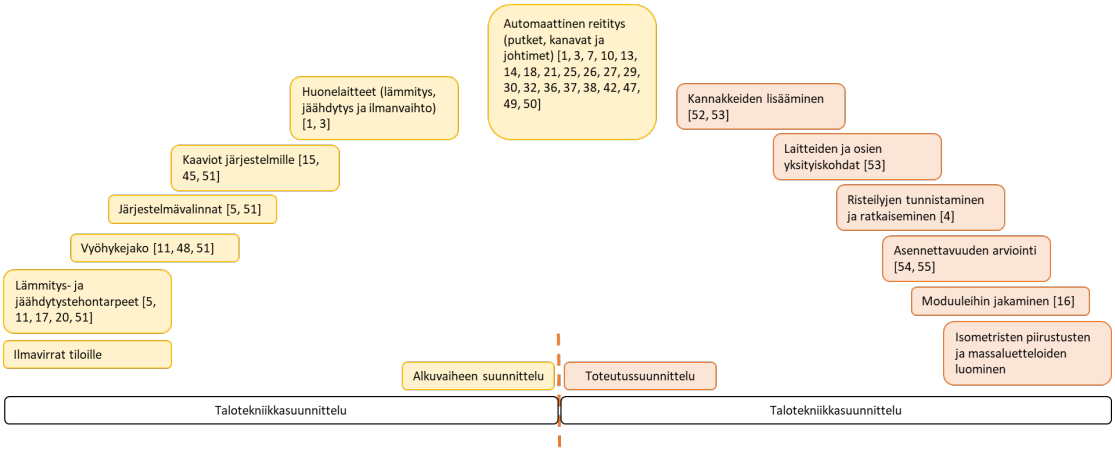
Systemaattisen kirjallisuuskatsauksen tiedonhaku toteutettiin Scopus- tietokannasta. Tiedonhakuun käytettiin ennalta määritettyjä hakusanojen yhdistelmiä. Käytetyt hakusanat on esitetty taulukossa 2. Hakujen perusteella löydettiin yhteensä 452 julkaisua, jotka suodatettiin tarkempaa analyysiä varten otsikon ja tiivistelmän perusteella. Objektiivisen suodatuksen varmistamiseksi työn toteutti kaksi tutkijaa itsenäisesti, minkä jälkeen tutkijat kävivät läpi eriävät tulkinnat ja keskustelun päätteeksi tekivät yhdessä ratkaisun artikkelin sisällyttämisestä tutkimukseen. Tarkempaan tarkasteluun valittiin 51 julkaisua.

Taulukko 2. Kirjallisuuskatsauksen tiedonhaussa käytetyt hakusanat.

1.	**OR**		**OR**		
	Design automation Automatic routing Generative design Parametric design Automatic design	**AND**	MEP HVAC Building Services Pipe Duct		
2.	**OR**		**OR**		
	Design automation Automatic routing Generative design Parametric design Automatic design	**AND**	MEP HVAC Building Services Ship Marine		
3.	**OR**		**OR**		**OR**
	Design automation Automatic routing Generative design Parametric design Automatic design	**AND**	MEP HVAC Building Services Pipe Duct	**AND**	Ship Marine
4.	**OR**		**OR**		
	Design automation Automatic routing Generative design Parametric design Automatic design Automatic Optimization	**AND**	MEP HVAC Building Services Pipe Duct Detailing Hangers		

Kirjallisuuskatsauksen perusteella tutkimusta talotekniikan suunnitteluautomaatioon liittyen on tehty jossain määrin. Kirjallisuudesta erottui selvästi automaattisen reitityksen tutkimusalue, jota koskevia julkaisuja oli noin 40 % kaikista löydöksistä.

Kuvassa 21 on esitetty löydettyjen ratkaisujen käyttökohde talotekniikkasuunnittelussa. Ratkaisut suunnittelun automatisoimiseen jakautuvat koko prosessin läpi, alkaen tehontarpeiden määrityksestä ja järjestelmävalinnoista aina valmistuspiirustusten luomiseen. Tutkimuksissa on tyypillisesti tarkasteltu hyvin rajattua suunnittelun osa-aluetta konseptin toimivuuden osoittamiseksi. Ratkaisujen skaalautuvuutta koko projektin tai rakennuksen laajuudelle ei ole yleensä osoitettu. Esimerkiksi automaattisen putkireitityksen tutkimuksissa käsitellään rajattua aluetta ja rajallista määrää reititettäviä putkia. Automaattinen putkireititys muuttuu huomattavasti haastavammaksi, kun tarkastellaan kokonaista rakennusta ja kaikkia putkijärjestelmiä, joiden reititys vaikuttaa toisiinsa.



Kuva 21. Suunnitteluautomaation käyttökohteet talotekniikkasuunnittelussa.

Vaikka tutkimusta talotekniikan suunnitteluautomaatioon liittyen on tehty, ei kaupallisia sovelluksia suunnittelijoiden työn helpottamiseksi ole juurikaan tarjolla. Yksi selkeä käyttökohde, johon on ostettavissa työkaluja, on kannakointi. Kannakointi on yksi merkittävä talotekniikan tietomalleista puuttuva, tilaa vievä objekti ja olennainen osa myös esivalmistavien talotekniikkaurakoitsijoiden prosessia. Revit-suunnitteluohjelman lisäosilla voidaan parametrisesti lisätä halutunlaiset kannakkeet kaikille putkijärjestelmille ja tällöin on mahdollista havaita jo suunnitteluvaiheessa kannakoinnin aiheuttamat risteilyt. Kannakkeiden lisääminen manuaalisesti vaatisi suunnittelijoilta huomattavan työmäärän.

Kannakoinnin lisäksi on olemassa Revit-pohjainen sovellus, jolla voidaan tehdä tarkkaa suunnittelua esivalmistusta varten. Sovellus mahdollistaa laitevalmistajakohtaisten oikeiden osien käyttämisen tietomallissa, kannakoinnin mallintamisen sekä valmistuskuvien luomisen massaluettelon kanssa. Valmistuskuva voidaan luoda joko perinteiseksi pdf-tulosteeksi tai mobiililaitteella katsottavaksi osamalliksi.

Valmiiden sovellusten lisäksi suunnittelijoille mahdollisuuden oman työnsä automatisointiin tarjoaa Autodeskin Dynamo-työkalu, joka toimii Revitin lisäosana. Dynamo mahdollistaa kaikkien Revitin ominaisuuksien käyttämisen ohjelmoitavien työkulkujen kautta. Työkalulla voidaan tehdä esimerkiksi oma työkulku kannakkeiden lisäämiseen tai päätelaitteiden sijoittamiseen huonetiloihin. Dynamon käyttäminen vaatii kuitenkin enemmän osaamista kuin valmiit automaatiosovellukset. Työkulkujen laatiminen on aikaa vievää ja vaatii vähintään ohjelmoinnin perusteiden ymmärtämistä. Toisaalta työkulut ovat kehittämistyön jälkeen uudelleenkäytettävissä ja työkulut voidaan räätälöidä esimerkiksi yrityskohtaiset tarpeet huomioon ottaen.

Perinteisen tietomallin yhteensovituksen lisäksi tarvittavaan asennettavuuden arviointiin on mahdollista käyttää olemassa olevia työkaluja. Tietomallikoordinointia tehtäessä tarkastellaan törmäyksiä objektien välillä. Samoilla sovelluksilla on mahdollista käyttää tarkastelussa ehtoja, jotka törmäyksien sijaan tunnistavat objektien välisen etäisyyden ja raportoivat liian pienet etäisyydet. Toiminnolla voidaan tarkastaa esimerkiksi, että putkien ja kanavien yläpuolelle jää riittävästi tilaa kannakointia varten tai että kanavia ei ole suunniteltu liian lähelle toisiaan.

Osa työmaalla havaituista poikkeamista on jo nyt poistettavissa suunnitteluautomaatiota hyödyntämällä. Kannakoinnin lisääminen suunnitelmiin olisi selkeä parannus talotekniikan tietomallien tarkkuustasossa. Tämän lisäksi suunnitteleminen oikeilla laitevalmistajakohtaisilla osilla parantaisi asennettavuuden arviointia suunnittelussa. Talotekniikan lisäksi on mahdollista automaattisesti tarkentaa myös rakennesuunnittelun tietomallia lisäämällä väliseinien tukirakenteet.

5 Yhteenveto ja johtopäätökset

Taloteknisten suunnitelmien toteutettavuuteen liittyy useita haasteita. Asentajat joutuvat tekemään detaljitason suunnitteluratkaisuja työmailla, koska asennettavuutta ei ole otettu huomioon suunnittelussa. Malleista puuttuu useita tilaa vaativia elementtejä eikä niissä oteta huomioon useita asennuksen kannalta olennaisia asioita. Asentajat osaavat usein yksinkertaistaa asennuksia, jotta saavat omaa tuottavuuttaan parannettua. Ongelmia voitaisiin poistaa lisäämällä tietomallien ja yhteensovituksen tarkkuustasoa suunnittelussa.

Esivalmistuskelpoisten suunnitelmien laatiminen lähtee liikkeelle samoista tarpeista. Asennuskelpoinen suunnitelma on siis myös esivalmistettavissa. Esivalmistukseen tarvitaan jonkun verran lisätehtäviä. Esivalmistettavat kokoonpanot on valittava ottaen huomioon logistiset rajoitteet. Konepajakuvat sisältävät isometriset näkymät kokoonpanosta, tarkat mittatiedot ja materiaaliluettelon. Nämä tiedot ovat tuotettavissa nykyisin käytössä olevilla ohjelmistoilla, joten teknisiä esteitä ei ole. Huomiota on kiinnitettävä myös puskurikokoonpanoihin, jotka ovat olennaisia toleranssien hallinnassa. Asennuskelpoinen suunnittelu on siis esivalmistussuunnittelun välttämätön edellytys mutta esivalmistussuunnittelu vaatii sen lisäksi vielä lisätyövaiheita.

Vaikka teknisiä esteitä ei ole, asennus- ja esivalmistussuunnittelu vaatii runsaasti lisäsuunnittelutunteja, jos tarvittavat lisädetaljit tehdään käsityönä. Suunnitteluautomaatio voi osaltaan auttaa detaljoinnissa. Tutkimusta on tehty yksittäisiin suunnittelun osa-alueisiin kaikilta tarvittavilta osin mutta toistaiseksi markkinoilta ei löydy kattavaa kaupallista ratkaisua. Toimivia ratkaisuja löytyy kannakointisuunnitteluun mutta muilta osin ostettavissa ei ole välittömästi käyttöön otettavissa olevia työkaluja. Kannakointisuunnittelun automatisointi on kuitenkin hyvä ensimmäinen askel, jolla voidaan säästää merkittävästi tunteja tarkemman tason suunnittelussa.

Southlandin työnjako kuulostaa järkevältä lähtökohdalta prosessin kehittämiselle. Korkeakoulutetut LVI-insinöörit suunnittelevat konseptit ja varmistavat, että tilaajan ja viranomaisten vaatimuksiin päästään. Asentajataustaiset detaljoijat varmistavat asennettavuuden, tekevät yhteensovituksen yhdessä LVI-insinöörin kanssa ja varmistavat, että kaikki olennainen on mukana mallissa ja yhteensovituksessa. Suomessa tämä toimii jo osin yhteistoiminnallisissa hankkeissa, joissa urakoitsija on mukana aiemmin. Tosin tuolloinkaan asentajat eivät tee suunnittelua, vaan talotekniikkaurakoitsijan työnjohto kommentoi tehtyjä suunnitelmia. Tästä on vielä pitkä matka siihen, että asentajien nykyisin työmaalla tekemä yhteensovitus saataisiin siirrettyä virtuaaliseksi. Liikkeelle voisi lähteä esimerkiksi siten, että suunnittelutoimistot palkkaavat asentajia detaljoijiksi. Yhteistoiminnallisissa hankkeissa voisi järjestää osallistuville asentajille tietomallikoulutusta ja osallistaa heidät suoraan suunnittelu- ja yhteensovitustyöhön.

Lähdeluettelo

Gann, D. M. (1996). Construction as a manufacturing process? Similarities and differences between industrialized housing and car production in Japan. Construction Management & Economics, 14(5), 437-450

Lavikka, R., Chauhan, K., Peltokorpi, A., & Seppänen, O. (2021). Value creation and capture in systemic innovation implementation: case of mechanical, electrical and plumbing prefabrication in the Finnish construction sector. Construction Innovation.

Lindberg, A., (2022). Design requirements for prefabricated mechanical and plumbing systems. Master's thesis. Master's Programme in Building Technology. Aalto-yliopisto.

Lu, N (2008) Designers' and general contractors' perceptions of offsite construction techniques in the United State construction industry, International Journal of Construction Education and Research, V (4) 3, pp. 177-188.

Seppänen, O., Görsch, C., Zhao, J., Kerttula, J. & Viitala, L. (2021). Hukka LVI- ja sähkötöissä. Tutkimushankkeen loppuraportti. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu. Saatavilla: https://www.aalto.fi/sites/g/files/flghsv161/files/2021-12/Hukka-LVI-ja-sahkotoissa-loppuraportti2021-11-26.pdf

Kirjallisuuskatsauksen tulokset. Viittaukset kuvan 21 laatikoissa numeroilla.

[1] Benachir Medjdoub & Mokhtaria Benzohra Chenini (2015) A constraint-based parametric model to support building services design exploration, Architectural Engineering and Design Management, 11:2, 123-136, DOI: 10.1080/17452007.2013.834812

[2] Bian, Xuanyi, Lin, Yan, and Zongran Dong. "Auto-routing Methods for Complex Ship Pipe Route Design." *J Ship Prod Des* 38 (2022): 100–114.
doi: https://doi.org/10.5957/JSPD.03210008

[3] Benachir Medjdoub, Gang Bi, Parametric-based distribution duct routing generation using constraint-based design approach, Automation in Construction, Volume 90, 2018, Pages 104-116, ISSN 0926-5805, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.02.006.

[4] Radke, Andreas & Wallmark, T. & Tseng, Mitchell. (2010). An Automated Approach for Identification and Resolution of Spatial Clashes in Building Design. 2084 - 2088. 10.1109/IEEM.2009.5373167.

[5] Toth, Bianca & Salim, Flora & Burry, Jane & Frazer, John & Drogemuller, Robin & Burry, Mark. (2011). Energy-Oriented Design Tools for Collaboration in the Cloud. International Journal of Architectural Computing. 9. 339-360. 10.1260/1478-0771.9.4.339.

[7] Kim, Shin-Hyung & Ruy, Wonsun & Jang, Beom-Seon. (2013). The development of a practical pipe auto-routing system in a shipbuilding CAD environment using network optimization. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 5. 10.3744/JNAOE.2013.5.3.468.

[8] [9] Dong, Zongran & Lin, Yan. (2017). Ship Pipe Routing Method Based on Genetic Algorithm and Cooperative Coevolution. Journal of Ship Production and Design. 33. 122-134. 10.5957/JSPD.33.2.150005.

[10] Jin-Hyung Park, Richard L. Storch, Pipe-routing algorithm development: case study of a ship engine room design, Expert Systems with Applications, Volume 23, Issue 3, 2002, Pages 299-309, ISSN 0957-4174, https://doi.org/10.1016/S0957-4174(02)00049-0.

[11] Berquist, Justin & Tessier, Alexander & brien, William & Attar, Ramtin & Khan, Azam. (2017). An Investigation of Generative Design for Heating, Ventilation, and Air-Conditioning. 10.22360/simaud.2017.simaud.018.

[12] Ikehira, Satoshi & Kimura, Hajime. (2009). Automatic Design Algorithm for Pipe Arrangement considering valve operationality. Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers. 9. 231-236. 10.2534/jjasnaoe.9.231.

[13] Ajiwaskita, Farhan & Gunawan, Gunawan & Yanuar, Yanuar. (2020). Pipe-routing optimization using system engineering methodology in ship engine room. AIP Conference Proceedings. 2227. 020022. 10.1063/5.0001001.

[14] Zhisen Chen, Hang Guan, Xiaolei Yuan, Tian Xie, Peng Xu, Rule-based generation of HVAC duct routing, Automation in Construction, Volume 139, 2022, 104264, ISSN 0926-5805, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104264.

[15] Zhang, Yi & Wright, Jonathan & Hanby, V. & Buswell, R.A.. (2003). Automatic Design Synthesis and Optimization of Component-Based Systems by Evolutionary Algorithms. 213-213. 10.1007/3-540-45110-2_93.

[16] Gunawan, Gunawan & Yanuar, Yanuar & Waskita, Farhan & Kurniawan, Arif. (2020). Modularization of Ship Engine Room Using Design Structure Matrix (DSM) Based on the Genetic Algorithm. Engineering Journal. 24. 205-216. 10.4186/ej.2020.24.4.205.

[17] de la Barrera Poblete, Carlos Ignacio. (2011). Evolutionary Strategy to Design Optimized Architecture. 29th eCAADe Conference Proceedings. ISBN 978-9-4912070-1-3

[18] Masoudi, Nafiseh & Fadel, Georges. (2021). An Optimization Framework for The Design of Cable Harness Layouts in Planar Interconnected Systems. Journal of Mechanical Design. 144. 1-29. 10.1115/1.4051685.

[19] Patterson, WR, Jr., & Campbell, MI. "PipeSynth: An Algorithm for Automated Topological and Parametric Design and Optimization of Pipe Networks." Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. August 28–31, 2011. pp. 13-23. ASME. https://doi.org/10.1115/DETC2011-47906

[20] Sheward, H., & Charles, E. (2011). Preliminary Concept Design (PCD) Tools for Laboratory Buildings, Automated Design Optimization and Assessment Embedded in Building Information Modeling (BIM) Tools.

[21] Yan Zhang and Zhuo Wang, "Design and implement of 3D chemical pipes," 2011 Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, 2011, pp. 1148-1151, doi: 10.1109/MACE.2011.5987139.

[22] Castro, Alejandro & Garcia Alvarado, Rodrigo. (2017). BIM-Integration of solar thermal systems in early housing design. Revista de la construcción. 16. 323-338. 10.7764/RDLC.16.2.323.

[23] Ando, Yuto & Kimura, Hajime. (2012). An Automatic Piping Algorithm including Elbows and Bends. Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers. 15. 219-226. 10.2534/jjasnaoe.15.219.

[24] Johnson, P., Padgaonkar, A., Bush, J., Anderson, G. et al., "Development of a Parametric Blend Door Computer-Aided Design System," SAE Technical Paper 960685, 1996, https://doi.org/10.4271/960685.

[25] D. Zhu and J. . -C. Latombe, "Pipe routing-path planning (with many constraints)," Proceedings. 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1991, pp. 1940-1947 vol.3, doi: 10.1109/ROBOT.1991.131911.

[26] Q. Liu, R. Xu and X. Liu, "A CAD system development for pipe and cable planning," 2012 3rd International Conference on System Science, Engineering Design and Manufacturing Informatization, 2012, pp. 131-133, doi: 10.1109/ICSSEM.2012.6340826.

[27] Van der Velden, C., Bil, C., Yu, X. (2011). A Knowledge-Based Approach to Design Automation of Wire and Pipe Routing through Complex Aerospace Structures. In: Frey, D., Fukuda, S., Rock, G. (eds) Improving Complex Systems Today. Advanced Concurrent Engineering. Springer, London. https://doi.org/10.1007/978-0-85729-799-0_26

[28] Garcia, A., Howard, H., & Stefik, M. (1994). Improving design and documentation by using partially automated synthesis. Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, 8(4), 335-354. doi:10.1017/S0890060400001001

[29] Van der Velden, Christian & Bil, Cees & Xu, Xinghuo. (2012). Adaptable methodology for automation application development. Advanced Engineering Informatics. 26. 231–250. 10.1016/j.aei.2012.02.007.

[30] Hermansson, Tomas & Bohlin, Robert & Carlson, Johan & Söderberg, Rikard. (2016). Automatic routing of flexible 1D components with functional and manufacturing constraints. Computer-Aided Design. 79. 10.1016/j.cad.2016.05.018.

[31] Foord, A.G. (1983). Experience with Computer Aids for Routing Pipes — ISOROUTE. In: Adey, R.A. (eds) Engineering Software III. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-02335-8_60

[32] Ikehira, Satoshi & Kimura, Hajime. (2006). Multi-objective genetic algorithms for pipe arrangement design. 1869-1870. 10.1145/1143997.1144304.

[33] Kimura, H. (2011). Automatic designing system for piping and instruments arrangement including branches of pipes. In RINA, Royal Institution of Naval Architects - International Conference on Computer Applications in Shipbuilding 2011, Papers (pp. 93-99).

[34] T. Wei, X. Chen, X. Li and Q. Zhu, "Model-based and Data-driven Approaches for Building Automation and Control," 2018 IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD), 2018, pp. 1-8, doi: 10.1145/3240765.3243485.

[35] Zhu, D., & Latombe, J. (1991). Mechanization of spatial reasoning for automatic pipe layout design. Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, 5(1), 1-20. doi:10.1017/S089006040000250X

[36] Guirardello, Reginaldo & Swaney, Ross. (2005). Optimization of process plant layout with pipe routing. Computers & Chemical Engineering. 30. 99-114. 10.1016/j.compchemeng.2005.08.009.

[37] Singh, J., Cheng, J.C.P. (2021). Automating the Generation of 3D Multiple Pipe Layout Design Using BIM and Heuristic Search Methods. In: Toledo Santos, E., Scheer, S. (eds) Proceedings of the 18th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51295-8_6

[38] Min, Jwa-Geun & Ruy, Wonsun & Park, Chul. (2020). Faster pipe auto-routing using improved jump point search. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 12. 596-604. 10.1016/j.ijnaoe.2020.07.004.

[39] Bhowmik, Subrata , Noiray, Gautier , and Harit Naik. "Subsea Pipeline Design Automation Using Digital Field Twin." Paper presented at the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi, UAE, November 2019. doi: https://doi.org/10.2118/197394-MS

[40] Bhowmik, Subrata , Noiray, Gautier , and Harit Naik. "Subsea Pipeline Design Automation Using Digital Field Twin." Paper presented at the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi, UAE, November 2019. doi: https://doi.org/10.2118/197394-MS

[41] Kristinsson, H, Jonsson, MT, & Jonsdottir, F. "Pipe Route Design Using Variable Topography Distance Transforms." Proceedings of the ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Volume 2: 31st Design Automation Conference, Parts A and B. Long Beach, California, USA. September 24–28, 2005. pp. 331-336. ASME. https://doi.org/10.1115/DETC2005-85342

[42] Van der Velden, Christian & Bil, Cees & Yu, Xinghuo & Smith, Adrian. (2007). An intelligent system for automatic layout routing in aerospace design. ISSE. 3. 117-128. 10.1007/s11334-007-0021-4.

[43] Akagi, S., Tanaka, T., & Kubonishi, H. (1988). An Expert CAD System for the Design of Marine Power Plants Using Artificial Intelligence. JSME international journal. Series 3, Vibration, control engineering, engineering for industry, 31, 149-156.

[44] Patsios, C. & Beniakar, Minos & Kladas, A. & Prousalidis, J.M.. (2014). A Simple and Efficient Parametric Design Approach for Marine Electrical Machines. Materials Science Forum. 792. 367-372. 10.4028/www.scientific.net/MSF.792.367.

[45] W. C. Tan, I. -M. Chen, S. J. Pan and H. K. Tan, "Analysis With Histogram of Connectivity: For Automated Evaluation of Piping Layout," in IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, vol. 15, no. 1, pp. 381-392, Jan. 2018, doi: 10.1109/TASE.2017.2764107.

[46] Entner, D., Prante, T., Vosgien, T., Alexandru-Ciprian Zăvoianu, Saminger-Platz, S., Schwarz, M., & Fink, K. (2019). Potential identification and industrial evaluation of an integrated design automation workflow. Journal of Engineering, Design and Technology, 17(6), 1085-1109. doi:https://doi.org/10.1108/JEDT-06-2018-0096

[47] Ganquan Shi, Andong Qiu, Zhouwang Yang, A hierarchical layout approach for underfloor heating systems in single-family residential buildings, Energy and Buildings, Volume 268, 2022, 112208, ISSN 0378-7788, https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112208.

[48] Di Nardo, A., Di Natale, M., Santonastaso, G.F. et al. An Automated Tool for Smart Water Network Partitioning. Water Resour Manage **27**, 4493–4508 (2013). https://doi.org/10.1007/s11269-013-0421-1

[49] Liao, Haiguang & Zhang, Wentai & Dong, Xuliang & Poczos, Barnabas & Shimada, Kenji & Kara, Levent. (2019). A Deep Reinforcement Learning Approach for Global Routing. Journal of Mechanical Design. 142. 1-17. 10.1115/1.4045044.

[50] P. -C. Wu, J. -R. Gao and T. -C. Wang, "A Fast and Stable Algorithm for Obstacle-Avoiding Rectilinear Steiner Minimal Tree Construction," 2007 Asia and South Pacific Design Automation Conference, 2007, pp. 262-267, doi: 10.1109/ASPDAC.2007.357996.

[51] Wang, H., Xu, P., Sha, H. et al. BIM-based automated design for HVAC system of office buildings—An experimental study. Build. Simul. 15, 1177–1192 (2022). https://doi.org/10.1007/s12273-021-0883-7

[52] AGA CAD, MEP Hangers

[53] Trimble, SysQue

[54] Navisworks Manage, Clash Detection

[55] Solibri, Clash Detection