

TALOTEKNIikka 2030

BUILDING 2030

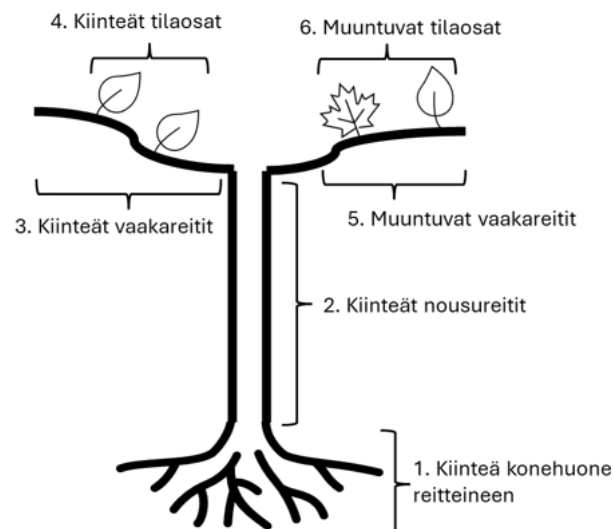
Talotekniikan modulaarisuus, esivalmistus ja toleranssit

Kirjoittajat:

Kimmo Keskiniva¹, Tuomas Valkonen², Anni Luoto¹, Olli Seppänen², Piia Sormunen¹, Arto Saari¹

¹Tampereen yliopisto

²Aalto-yliopisto



Tiivistelmä

Rakennusalan toimintamallit ovat murroksessa, ja erityisesti talotekniikan osalta korostuu tarve kehittää suunnittelua ja toteutusta tukemaan paremmin esivalmistusta ja tarkkoja asennustoleransseja. Tuotantomallit, kuten avoin rakentaminen ja tahtituotanto, edellyttävät hallittua ja ennakoitavaa toteutusta, jossa modulaarisuus ja tarkkuus tukevat rakentamisen sujuvuutta, laadua ja muuntojoustavuutta. Hankkeen taustalla on tarve ymmärtää, miten toleranssienhallinta ja esivalmistus voidaan kytkeä osaksi rakennushankkeen kokonaisprosessia.

Tutkimuksen tavoitteena oli analysoida talotekniikan sijoittamista, reititystä, moduulimitoitusta ja esivalmistusta suunnitteluvaiheessa sekä mitata toteutusvaiheen asennustarkkuuden vaihtelua. Mittausten pohjalta määriteltiin valmistukselle ja asennukselle soveltuvat toleranssivaatimukset. Lisäksi kehitettiin rakennushankeprosessi, joka tukee talotekniikan modulaarisuutta ja mahdollistaa työmaalta saadun palautteen hyödyntämisen suunnittelun kehittämisessä.

Tutkimuksessa hyödynnettiin kirjallisuusselvityksiä, asiantuntijahaastatteluja, työpajoja ja la-serkeilausta. Asennustarkkuuden vaihtelua analysoitiin vertaamalla pistepilviaineistoa 3D-suunnitelmiin, ja vaihtelun vaikutuksia arvioitiin simuloinnilla. Tilaajan ja rakennuttajan rooli esivalmistuspäätöksissä osoittautui keskeiseksi, mutta vaatimuksia ei aina määritellä. Esivalmistus voi toimia kilpailuetuna urakoitsijoille, joilla on valmiudet toteuttaa esivalmisteita. Kansainväliset esimerkit osoittavat, että tilaajavetoinen esivalmistuksen edistäminen voi tuottaa merkittäviä säästöjä, mutta Suomessa skaalautuvuutta rajoittaa markkinan pienuus.

Esivalmistuksen onnistuminen edellyttää tarkkaa suunnitelmaa, mutta poikkeamia syntyy usein suunnitelmien epätarkkuuksien tai työmaan olosuhteiden vuoksi. Suunnittelukulttuuri, jossa tietomalleista huolimatta tuotetaan edelleen 2D-tasokuvia, jättää asentajille laajan vapauden. Detaljoitu suunnittelu vaatii kattavia osakirjastoja ja kannatussuunnitelmia, joiden puute rajoittaa esivalmistuksen hyödyntämistä. Vaikka tarkka suunnittelu ei poista kaikkea vaihtelua, sen hallinta edellyttää ulkoisten vaihtelulähteiden tunnistamista ja huomioimista.

Talotekniikka-asennuksille ei ole yleisiä toleranssivaatimuksia, vaan ne määritellään projekti-kohtaisesti. Mittaustulokset osoittavat suurta vaihtelua, ja toleranssien asettaminen sekä niiden valvonta ovat keskeisiä tarkkuuden parantamiseksi. Vaatimusten tulee olla realistisia ja perustua prosessin kyvykkyyteen. Esimerkiksi ± 50 mm toleranssi voi olla liian löysä tai aiheuttaa toteutusongelmia. Toleranssien määrittelyssä tulee huomioida myös suunnittelun tarkkuus ja rakennettavuus.

Tutkimuksessa kehitettiin talotekniikan avointa rakentamista havainnollistava puumalli, joka esittää järjestelmien osien keskinäiset kytkökset yksinkertaisella tavalla. Mallissa konehuoneet kuvataan juurina, nousureitit runkona, vaakareitit oksina ja tilaosat lehtinä. Haastattelujen perusteella käyttäjien päätöksenteko painottuu tilaosiin, jolloin muutosten vaikutus muihin järjestelmän osiin jää helposti huomaamatta. Puumalli auttaa hahmottamaan, miten yksittäinen muutos voi vaikuttaa taloteknisiin järjestelmiin.

Tutkimuksen lopputuloksena syntyi talotekniikan modulaarisuutta tukeva rakennushankeprosessi, joka kokoaa suosituksia rakennusvaiheittain ja eri näkökulmista, kuten päätöksenteosta, yhteistyöstä, suunnittelusta, esivalmistuksesta ja toleransseista. Prosessi perustuu empiiriseen aineistoon ja työpajoista saatuun ohjaukseen, ja se tukee kokonaisvaltaista ja käytännöllä-heistä prosessikuvauksen muodostamista.

Alkusanat

Tutkimus on Talotekniikka 2030- ja Building 2030 -konsortioiden yhteishanke. Talotekniikka 2030 -konsortio on Aalto-yliopiston, Tampereen yliopiston ja 14 toimialakumppanin käynnistämä yhteenliittymä, joka edistää toimialaa uudistavaa visiota tutkimushankkeiden ja nopeiden kokeilujen avulla. Talotekniikka-alan kaikki sektorit toivotetaan tervetulleeksi projektin tuleviin hankkeisiin. Building 2030 -konsortio on Aalto-yliopiston ja 19 toimialakumppanin yhteenliittymä, joka käsittelee rakentamista yleisemmin. Konsortion rahoittamasta tutkimuksesta osa on liittynyt myös talotekniikkaan.

Yhteishankkeessa oli neljä teemaa: taloteknisen suunnittelun reititys, modulaarisuus, talotekniikan esivalmistus ja toleranssinhallinta. Toleranssien hallintaa tutkittiin Building 2030 -konsortion aloitteesta, koska aiemmissa konsortion tutkimushankkeissa oli paljastunut improvisoinnin merkittävä rooli taloteknisissä asennuksissa. Toleranssien hallinta liittyy esivalmistukseen, koska esivalmistuksella on tyypillisesti tiukemmat toleranssivaatimukset. Talotekniikka 2030 -konsortio otti näkökulmaksi taloteknisen suunnittelun modulaarisuuden. Koska kaikki teemat ovat lähellä toisiaan konsortioiden ohjausryhmät päättivät hankkeen toteuttamisesta yhteishankkeena.

Tämän projektin toteutuksesta on vastannut väitöskirjatutkija Kimmo Keskiniva, projektipäällikkö Anni Luoto, professori (associate) Piia Sormunen ja professori Arto Saari Tampereen yliopistosta sekä väitöskirjatutkija Tuomas Valkonen ja professori (associate) Olli Seppänen Aalto-yliopistosta.

Projektin työpajoihin ovat olleet kutsuttuna seuraavat henkilöt:

Pekka Pessi, Jatke	Markus Suominen, Hilti
Joni Jumisko, Jatke	Joonas Vierijärvi, Magicad
Mikko Oksanen, Jatke	Risto Asp, Sähkötieto
Tapio Jylhä, Skanska	Panu Mustakallio, Halton
Henna Niemenmaa, Skanska	Vesa Kinnaslampi, Caverion
Ville Multisilta, Skanska	Jesse Reponen, Lahden Tiedepuisto
Pellervo Matilainen, Skanska	Mikko Sahikallio, QMG
Tero Järvinen, Granlund	Turo Salmi, LSK
Ville Aallo, Granlund	Tommi Liikola, Recair
Mikael Kiuru, Hilti	Valtteri Viitikko, Rakennustieto
Kimmo Rahnasto, Peab	Richard Prate, Asensi
Niko Nordman, Haahtela	Mika Savolainen, Asensi
Axel Lindberg, Haahtela	Henri Jyrkkäranta, Helsinki yliopistokiinteistöt
Miro Lehtimäki, Ramboll	Mikko Levaniemi, Fira
Markus Karila, Fira	Otto Alhava, Fira
Thomas Bagge, Trimble	
Henri Hietala, Bravida	

Kiitos kaikille hankkeeseen osallistuneille.

Tampereella ja Espoossa 31.8.2025

Tekijät

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	2
Alkusanat	3
Sisällysluettelo	4
Terminologia	6
1 Johdanto	7
1.1 Hankkeen tausta	7
1.2 Tutkimuksen tavoitteet.....	7
2 Tutkimusmenetelmät	8
2.1 Asiantuntijahaastattelut	8
2.2 Asiantuntijatyöpajat.....	9
2.3 Vaihtelun suuruuden mittaaminen laserkeilauksella	9
2.4 Simulointi.....	11
3 Talotekniikan reititys, modulaarisuus ja esivalmistus	13
3.1 Avoin rakentaminen ja talotekniikan reititys	13
3.2 Talotekniikan modulaarisuus	14
3.3 Talotekniikan esivalmistus	16
4 Haastattelututkimuksen tulokset.....	17
4.1 Talotekniikan reititykset	17
4.2 Modulaarisuus ja esivalmistus	17
4.3 Ansaintalogiikat.....	20
4.4 Case esimerkki esivalmisteen hyödyntämisestä asuinkerrostalossa	21
5 Toleranssimittausten tulokset.....	23
5.1 Vaihtelu talotekniikka-asennuksissa.....	23
5.1.1 Monitoimirakennus	24
5.1.2 Asunto	26
5.1.3 Sairaala, kaukokylmän tekninen tila.....	29
5.1.4 Toimisto	30
5.2 Vaihtelun suuruuteen vaikuttavat tekijät	31
5.3 Simulointi.....	33
6 Yhteenveto ja johtopäätökset	35
6.1 Talotekniikan modulaarisuus ja esivalmistus	35
6.2 Avoimen rakentamisen puumalli	36
6.3 Asennustarkkuus.....	37
6.4 Talotekniikan toleranssivaatimukset	39

6.5	Talotekniikan modulaarista rakentamista tukeva rakentamishankeprosessi	41
7	Lähteet.....	47
	Liite 1 – Haastattelukysymykset	49

Terminologia

Raportissa hyödynnetään toistuvasti käsitteitä, jotka on määritelty alla.

Modulaarisuus

Modulaarisuudella tarkoitetaan tapaa yksinkertaistaa monimutkainen tuote, järjestelmä, prosessi tai organisaatio jakamalla se selkeästi määriteltyihin alijärjestelmiin – kuten tuoteosiin, komponentteihin tai moduuleihin. Näiden osien välisten rajapintojen pyritään olevan mahdollisimman yksinkertaisia ja standardoituja.

Modulaarinen rakenne mahdollistaa kokonaisuuden, kuten esimerkiksi talotekniikan järjestelmän, jakamisen pienempiin ja hallittavampiin osiin. Näitä osia voidaan suunnitella ja valmistaa toisistaan riippumattomasti, ja lopuksi ne voidaan liittää toisiinsa vakioliitoksien yhtenäiseksi lopputuotteeksi.

Moduulimitta

Moduulimittaa käytetään rakennusalan suunnitelmissa vakiomittaisuuteen ohjaavana mittayksikkönä. Moduulimitat ilmoitetaan M-luvun kerrannaisina (1M = 100 mm).

Moduuliverkko

Pohjakuviin piirretyt pituus- ja leveyssuuntaiset moduulimitat muodostavat moduuliverkon. Moduuliverkon käyttäminen helpottaa mm. esivalmisteen ja rakennustarvikkeiden valmistamista ja asentamista muuhun rakennukseen.

Esivalmistus

Esivalmistuksella ja -asennuksella tarkoitetaan rakennustyömaan ulkopuolella tapahtuvaa tuoteosien valmistusta tai niihin kuuluvien komponenttien osakokoonpanoa. Esivalmistuksen ansiosta tuotanto ei ole sidottu tiettyyn paikkaan, ja se voidaan toteuttaa paremmissa ja hallitummissa olosuhteissa. Tämä mahdollistaa tehokkaamman, nopeamman ja laadukkaamman tuotannon.

Esivalmistus voi koskea joko yksittäisen projektin tarpeisiin räätälöityjä tuoteosia tai useissa projekteissa hyödynnettäviä vakioituja osia. Valmistus voidaan toteuttaa tilapäisissä tuotantotiloissa esimerkiksi rakennuskohteen läheisyydessä tai pysyvissä tuotantolaitoksissa. Modulaarinen, kokoonpanoon perustuva tuoterakenne tukee esivalmistusta, sillä se mahdollistaa asennuksessa tarvittavien rajapintojen ja työvaiheiden standardoinnin.

Toleranssit

Toleranssivaatimus on tarkkuusvaatimus. Toleranssivaatimuksella voidaan määrittää valmistettavalle kappaleelle sallitut mitahteitot koskien muotoa (esim. pinnan tasaisuus tai osan suoruus) ja kokoa (kappaleen ulkomitat). Taloteknisissä asennuksissa toleranssivaatimuksella viitataan asennuksessa käytettyihin osiin ja erityisesti näiden osien asennussijaintiin.

Vaihtelu kuvaa epätarkkuutta toleranssivaatimuksen saavuttamisessa. Vaihtelua esiintyy kaikilla ja suunnittelussa vaihtelun ilmentymä voi olla identtisissä tiloissa käytetty toisistaan poikkeava suunnitteluratkaisu. Tässä raportissa vaihtelulla tarkoitetaan taloteknisen asennuksen ja suunnitelman eroa.

1 Johdanto

1.1 Hankkeen tausta

Hankkeen taustalla toimii tarve kehittää nykyisiä toimintamalleja huomioimaan entistä paremmin talotekniikan toleranssit ja esivalmistusmahdollisuudet. Rakennushankkeita mullistaa monenlaiset toisiinsa kytkeytyvät toimintamallit, kuten avoin rakentaminen ja tahtituotanto, joita on nistunut toleranssienhallinta ja esivalmistaminen voivat sujuvoittaa. Aiheesta on tehty aiempaa tutkimusta mm. Building 2030 -konsortion sisällä, mutta kehityspotentiaalia on yhä.

Talotekniikan uusiminen on haastavaa, erityisesti tilankäytön vuoksi. Rakennuksen elinkaarella tehtävissä korjauksissa joudutaan usein avaamaan rakenteita ja rakentamaan koteloita, mikä lisää kustannuksia ja työvaiheita. Näitä voidaan jatkossa vähentää, kun talotekniikan reititykset suunnitellaan jo uudisrakentamisessa käyttöiät ja huollettavuus huomioiden.

Modulaariset ja järkevästi suunnitellut reititykset tukevat avoimen rakentamisen ja tahtituotannon toimintamalleja. Avoimessa rakentamisessa rakennuksen kiinteä perusosa mitoitetaan siten, että se sallii muuntuvaan tilaosaan tehtävät muutokset sekä rakennusaikana että rakennuksen käyttövaiheessa. Siihen liittyen myös kiinteän perusosan talotekniset reitit suunnitellaan siten, että ne ovat mitoitukseltaan riittävät, kun muuntuvaan tilaosaan kohdistuu muutoksia joustavan tilaohjelman rajoissa. Tahtituotannossa modulaarisuus helpottaa asennusten tahdistamista ja rajapintojen hallintaa. Esivalmisteiset moduulit mahdollistavat siirtymisen tehdasolosuhteisiin, mikä selkeyttää mm. tahtiaikataulua ja parantaa rakentamisen laatua.

Aikaisempi tutkimus on antanut viitteitä huomattavasta vaihtelusta taloteknisissä töissä. Asentajien työskentelyä tutkittaessa havaittiin, että merkittävä osuus työajasta käytetään muuhun kuin suoraan arvoa lisäävään työhön. Asentajälähtöisen suunnittelun tutkimuksen osana on dokumentoitu suuria poikkeamia suunnitelmiin verrattuna, sekä näihin poikkeamiin johtaneita syitä. Esivalmistukseen liittyvässä tutkimuksessa taas on korostettu tarvetta tarkalle ns. detajisuunnittelulle ja tarkalle valmistukselle sekä asennukselle. Asennustarkkuuteen eli toleransseihin liittyvä harkinta on oleellista esivalmistuksen käytössä, paikallarakentamisen tehostamisessa sekä esivalmisteiden ja paikallarakentamisen rajapinnoissa.

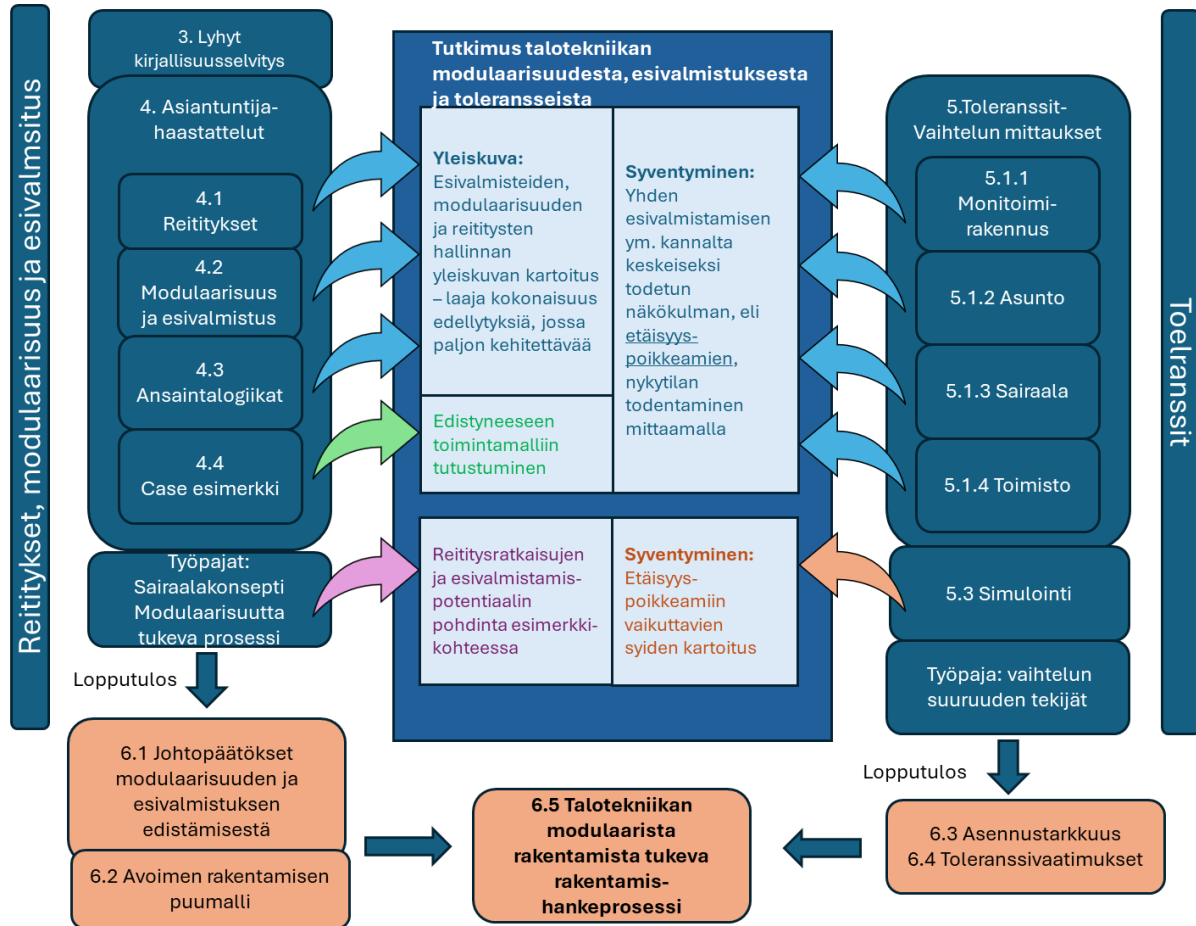
1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena oli analysoida rakennuksen suunnitteluvaiheen talotekniikan sijoittamista rakennukseen ja talotekniikan reititystä sekä talotekniikan moduulimitoitusta ja esivalmistusta. Toisena tavoitteena oli mitata toteutusvaiheessa asennusten tarkkuuden vaihtelua sekä esivalmistettuna että paikalla asennettuna. Mittausten pohjalta määritellään talotekniikan valmistukselle ja asennukselle toleranssivaatimukset.

Hankkeessa kehitettiin talotekniikan modulaarisuutta tukeva rakennushankeprosessi, joka mahdollistaa takaisinkytkennän työmaalta suunnitteluprosessin kehittämiseen. Prosessi antaa edellytykset modulaarisuuden ja esivalmistuksen toteuttamiseen huomioiden avoimen rakentamisen periaatteet, että tarvittavat talotekniikan toleranssit.

2 Tutkimusmenetelmät

Hankkeessa käytettiin useita tutkimusmenetelmiä. Suunnitteluprosessia ja modulaarisuutta tutkittiin kirjallisuusselvityksillä, asiantuntijahaastatteluilla ja osallistuvalla havainnoinnilla. Uutta prosessia kehitettiin asiantuntijatyöpajoissa. Vaihtelun mittaamiseen puolestaan hyödynnettiin laserkeilausta. Toteutunut asentamistarkkuuden vaihtelu mitattiin pistepilvistä suhteessa 3D-to-teutussuunnitelmiin. Vaihtelun merkitystä arvioitiin simuloinnilla. Kuvassa 1 on esitetty tutkimuksen kokonaisuus, jossa yleiskuvaa on selvitetty pääosin asiantuntijahaastatteluilla ja työpajoilla. Vaihteluun on syvennynyt mittauksilla case-kohteissa ja sen syitä on kartoitettu työpajoissa.



Kuva 1. Tutkimus talotekniikan modulaarisuudesta, esivalmistuksesta ja toleransseista

2.1 Asiantuntijahaastattelut

Esivalmisteen, modulaarisuuden ja reititysten hallinnan kokonaisuutta tutkittiin asiantuntijahaastatteluilla, joita toteutettiin touko- ja kesäkuussa 2025. Yhteensä haastateltiin 15 rakennusalan asiantuntijaa, joiden roolit löytyvät taulukosta 1. Haastattelut toteutettiin teemahaastatteluina, eli keskustelunomaisesti etukäteen määritettyjen teemojen ympärillä. Keskusteluja varten laadittiin ohjaava kysymyspatteri, joka löytyy liitteestä 1. Osa haastatteluista toteutettiin ryhmähaastatteluina, joissa oli haasteltavia 2–3 henkeä ja haastattelijoita 1–4 henkeä Tampereen yliopiston tutkimusryhmästä.

Taulukko 1. Haastateltavien organisaatio, roolit ja haastattelussa käsitelty hanke.

Haastateltavan organisaatio	Haastateltavan rooli	Haastatteluun liittyvä case-hanke
Tate-suunnittelu	Suunnittelujohtaja	Oppilaitos
Tate-suunnittelu	Liiketoimintajohtaja, suunnittelu	Oppilaitos
Tate-urakointi	Projektipäällikkö, tate-urakointi	Oppilaitos
Rakennuttaja	Kiinteistöpäällikkö	Oppilaitos
Rakennuttaja	Rakennuttajainsinööri	Oppilaitos
Rakennuttaja	Sähköinsinööri	Oppilaitos
Konsultointi	Johtava konsultti	Sairaala-allianssi
Päätoteuttaja	Yksikön johtaja, urakointi	Sairaala-allianssi
Päätoteuttaja	Suunnittelun johtaminen, urakointi	Sairaala-allianssi
Tate-urakointi	Hankekehityspäällikkö	Sairaala-allianssi
Tate-urakointi	Hankekehityssinööri, tate-urakointi	Sairaala-allianssi
Tate-suunnittelu	Ryhmäpäällikkö, suunnittelu	Sairaala-allianssi
Tate-suunnittelu	Projektijohtaja, suunnittelu	Sairaala-allianssi
Tate-suunnittelu	Ryhmäpäällikkö, suunnittelu	Sairaala-allianssi
Tate-suunnittelu	Varatoimitusjohtaja, suunnittelu	Muu asiantuntijahaastattelu

Valtaosa haastateltavista valikoitui kahden etukäteen määritetyn case-hankkeen osapuolista. Case-kohteina toimi vastikään valmistunut oppilaitoshanke ja meneillään oleva sairaala-allianssihanke. Haastatteluissa keskusteltiin case-kohteiden kokemuksista ja havainnoista, mutta myös yleisiä alaa koskevia havaintoja jaettiin. Myös yksittäinen case-kohteisiin sitoutumaton asiantuntijahaastattelu järjestettiin tukemaan kehitystyötä.

2.2 Asiantuntijatyöpajat

Tämän tutkimuksen aikana Building 2030 ja Talotekniikka 2030 konsortioiden yhteiset työpajat järjestettiin 19.3.2025, 15.5.2025 ja 15.8.2025. Työpajoissa pohdittiin reititysratkaisuja sekä esivalmistamispotentiaalia esimerkksairaalakohteen näkökulmasta. Lisäksi työpajoissa kartoitettiin etäisyyspoikkeamiin vaikuttavia syitä.

2.3 Vaihtelun suuruuden mittaus laserkeilauksella

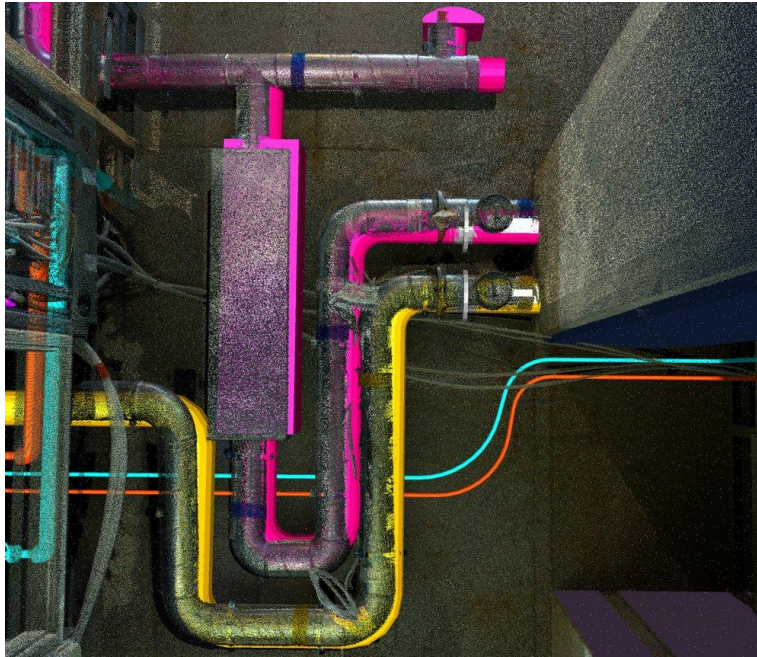
Tutkimuksessa syvennyttiin etäisyyspoikkeamien tutkimiseen tarkemmin, koska se on yksi keskeinen, mutta vähän tutkittu esivalmistamiseen ja reitityksiin vaikuttava näkökulma. Vaihtelun suuruuden mittaamiseksi suoritettiin laserkeilauksia viidessä kohteessa, jotka on esitelty taulukossa 2. Mukaan saatiin erilaisia kohteita, joissa osassa käytettiin talotekniikan asennuksessa esivalmisteita ja osassa asennettiin paikalla. Laserkeilaus toteutettiin yleensä yhdessä kerroksessa tai valituissa erityistiloissa. Mittalaite vaihteli eri kohteissa sen takia, että osassa kohteissa yhteistyökumppani Trimble toteutti keilaukset ja muissa kohteissa keilaus toteutettiin Tampereen yliopiston laitteilla.

Laserkeilauksen lopputuloksena on pistepilvi, joka kuvaa tarkasti keilatun geometrian. Mitattaessa suoritetaan useita peräkkäisiä keilauksia toistensa kanssa lähekkäisistä sijainneista siten että peräkkäisissä keilauksissa on riittävästi yhtäläisyyksiä. Keilauksen jälkeen nämä yksittäiset pistepilvet yhdistetään laitekohtaisella ohjelmistolla yhdeksi pistepilveksi, joka voi sisältää koko rakennuksen, yhden kerroksen tai yhden huoneen. Pistepilvien jälkiprosessoinnin kannalta on olennaista, että keilauksia on tehty riittävän tiheästi. Suuri tiheys mittauspisteissä tukee myös tarkempaa mittausta, koska pisteiden määrä pinnalla vähenee etäisyyden kasvaessa. Yhdessä kohteessa tehtävät keilaukset toteutettiin yhden päivän aikana.

Taulukko 2. Mitatut kohteet

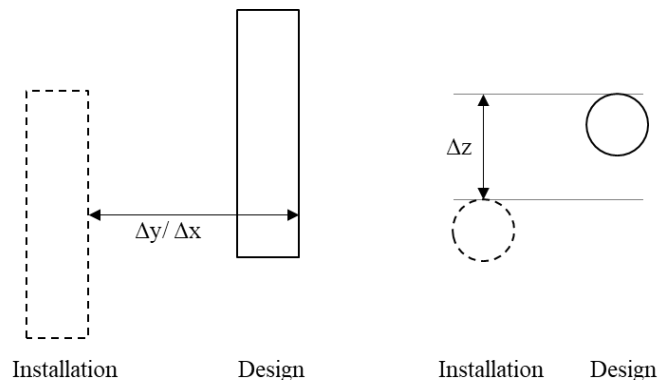
Kohde Ja kuvaus	Mittauksen laajuus	Vaihtelun mittaus	Laite Tarkkuus
Monitoimiareena Uusi hyvinvointi, elämys ja ravintola rakennus, PJU	Yksi kerros	Koko kei- lattu alue	Trimble X7 2,4mm @ 10m, 3,5mm @ 20m, 6,0mm @ 40m
Asuinkerrostalo Uusi vuokrakerrostalo, KVR, iv-esivalmisteen	Yksi kerros, 7 asuntoa	Yksi kerros	Trimble X7 2,4mm @ 10m, 3,5mm @ 20m, 6,0mm @ 40m
Sairaala 1 Uusi sairaala, allianssi	Kaukokylmän tekninen tila, ilmanvaihtokone- huone, tekniikkakäy- tävä.	Kaukokyl- män tekni- nen tila	Faro Focus Premium 2mm @ 10m, 3,5mm @25m
Sairaala 2 Uusi sairaalarakennus, allianssi	Potilasosaston kerros, ilmanvaihtokone- huone, potilashuone	-	Faro Focus Premium 2mm @ 10m, 3,5mm @25m
Toimisto Uusi toimistorakennus, PJU	Yksi kerros (putkirun- got), ilmanvaihtokone- huone, käytävä.	Yksi kerros	Faro Focus Premium 2mm @ 10m, 3,5mm @25m

Talotekniikka-asennuksien vaihtelu mitattiin vertaamalla pistepilveä tietomalliin. Tietomallista näkyy suunniteltu sijainti. Pistepilvestä selviää, mihin laitteet on todellisuudessa asennettu. Vaihtelu on suunnitellun ja toteutuneen sijainnin ero. Esimerkki tietomalliin yhdistetystä pistepilvestä on esitetty kuvassa 2. Kuvassa punainen ja keltainen kanava ovat suunnitellut tulo- ja poistoilmakanavat. Värikkäiden kanavien päällä oleva harmaa on asennetun sijainnin osoittava pistepilvi. Tässä esimerkissä osissa on havaittavissa siirtymää suhteessa suunnitelmaan, mutta suunnitelmaa vastaavat osat löytyvät myös toteutuksesta ja suunniteltuja reittejä on myös noudatettu. Aineistosta löytyy myös lukuisia esimerkkejä tapauksista, joissa on merkittäviä poikkeamia reiteissä tai järjestelmissä.



Kuva 2. Esimerkki pistepilven ja tietomallin yhdistämisestä.

Vaihtelu mitattiin komponenttikohtaisesti NavisWorks ohjelman mittaustyökalulla. Mittaamisen periaate on esitetty kuvassa 3. Jokaiselle komponentille mitattiin poikkeama suunnitelman ja asennuksen välillä x, y ja z akselien suuntaisesti. Vaakasuuntaisille asennuksille mitattiin joko x- tai y -akselin suuntainen poikkeama sekä korkeuspoikkeama. Pystysuuntaisille asennuksille mitattiin x- ja y -suuntainen poikkeama. Kulmaosien sijaintia ei mitattu siihen liittyvän suuren epätarkkuuden vuoksi. Kulmaosien sijainnin poikkeama vastaa siihen liitettyjen kanavien sijainnin poikkeamaa eikä sen mittaaminen siksi anna lisäarvoa. Esimerkkinä kuvassa 2 punaisen tuloilmakanavan osalta poikkeama on mitattu seuraaville osille: kanavat (useita), puhdistusluukku, säätöpelti ja äänenvaimennin.



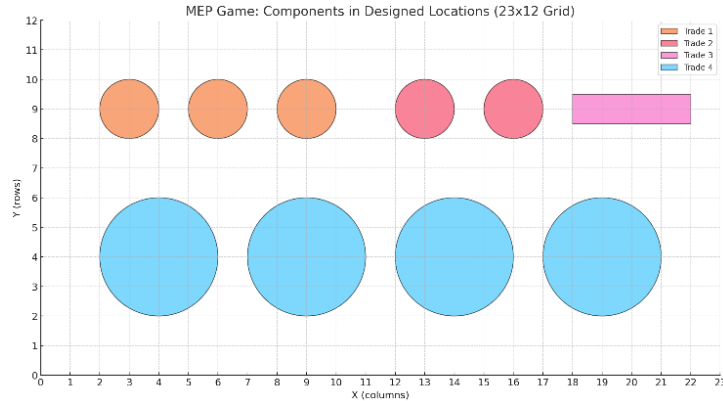
Kuva 3. Vaihtelun mittaamisen periaate.

2.4 Simulointi

Toleranssien vaikuttavuudesta työmaa-asennusten sujuvuuteen ei ollut saatavilla tietoa, minkä vuoksi asennustarkkuuden vaikutusta projektin keston ja seuraaviin työvaiheisiin tutkittiin simuloinnin avulla. Simuloinnissa mallinnettiin taloteknisten asennusten sijaintipoikkeamia ja niiden vaikutusta työnkulkuun. Menetelmänä käytettiin diskreettiä tapahtumapohjaista simulointia

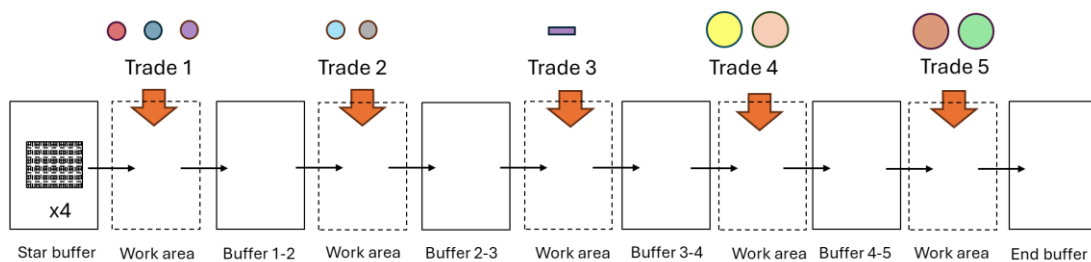
(DES) Pythonin SimPy kirjastolla. DES-simulointi mahdollistaa resurssien, tehtävien ja jonojen kuvaamisen realistisella tavalla.

Simulaatiossa viisi peräkkäistä asennusryhmää tekevät asennuksia neljään peräkkäiseen asennussijaintiin eri suuruisella vaihtelulla. Asennussijainti ja asennusten suunnitellut sijainnit on kuvattu kuvassa 4.



Kuva 4. Asennussijainti ja asennusten suunnitellut paikat.

Simulaation kulku on esitetty kuvassa 5. Alkutilanteessa aloituspuskurissa on neljä tyhjää asennussijaintia. Työryhmät vetävät työalueelle sijainnin aina kun työalue on tyhjä ja edeltävässä puskurissa on sijainteja. Varsinainen asennus tehdään kuvainnollisesti noppaa heittämällä, eli asennussijainti suhteessa suunniteltuun sijaintiin määritetään nopan heitolla. Nopan silmäluvut valitaan kuvaamaan erisuuruista vaihtelua. Asennus on mahdollinen, jos nopan osoittama paikka on asennusalueen sisällä eikä asennettava komponentti törmää mihinkään muuhun komponenttiin. Törmäyksen tapauksessa suoritetaan uusintaheittoja, kunnes mahdollinen sijainti löytyy. Yksi työryhmä voi työskennellä yhdessä sijainnissa kerrallaan. Simuloinnissa käytettiin viittä eri noppaa: [0], [-1,0,1], [-2,-1,0,1,2], [-2,-1,1,2], [-4,-3,-2,-1,0,1,2,3,4]. Nopalla heitetään jokaiselle komponentille erikseen poikkeama x ja y akselin suuntaisesti erikseen suhteessa suunniteltuun sijaintiin. Jokaisella nopalla tehtiin yksittäinen simulointi, sekä 1000 peräkkäistä simulointikierrosta, joista tuloksena esitetään keskiarvot sekä vaihtelu.



Kuva 5. Simulaation kulku. Asennussijainnit liikkuvat työalueiden ja puskurien kautta alkupuskurista päätepuskuriin. Simulaatio päättyy, kun kaikki sijainnit ovat päätepuskurissa.

3 Talotekniikan reititys, modulaarisuus ja esivalmistus

Building 2030 -konsortiossa on tutkittu esivalmistamisen vaikutusten arviointia (Peltokorpi ym. 2019), talotekniikan esivalmistuksen esteitä, mahdollistajia ja prosesseja (Peltokorpi ym. 2018), sekä kehitetty suunnitteluprosesseja mm. esivalmistusasteen kohottamisen näkökulmasta (Seppänen ym. 2024).

RIL 239-2008 -julkaisu käsittelee talotekniikan reititysohjeistusta modulaarisen installaatiotekniikan näkökulmasta. Kirjan sisältö nojaa vahvasti Eino Rantalan väitöskirjaan ja sisältää useita suosituksia.

RT-korteista löytyy jonkin verran aihetta sivuavia kortteja, kuten tehtäväluetteloja sekä rakennusten ja rakennusosien mittajärjestelyä kuvaava RT 103447 (2022). Myös toleransseja käsitellään hieman RT-korteissa.

Heljo (2005) on tutkinut reititysten taloudellista merkitystä ja kehittänyt RIBS-menetelmää, jolla pyritään luomaan perusratkaisu rakennustekniikan ja perustasoisten taloteknisten verkkojen yhtenäistämiseksi esimerkiksi toimistorakennuksissa. Sorri (2013) on puolestaan tutkinut teräskennoteknologian mahdollisuuksia ja haasteita moduulirakentamisessa. Myös Keskiniva ym. (2020) ovat tutkineet teollisia esivalmisteita tahtituotantoa käyttävällä korjaustyömaalla.

Lisäksi taustatutkimuksia ovat olleet mm. avoimen rakentamisen tutkimus (Saari, 2001, Saari ym. 2007), SUKE-tutkimus (Kruus ym. 2006; Kiiras ym. 2007), SKOL-malli (Järvinen 2021) sekä aiemmat Talotekniikka 2030 -tutkimukset (Keskiniva ym. 2023; Keskiniva ym. 2024)

3.1 Avoin rakentaminen ja talotekniikan reititys

Avoimen rakentamisen periaatetta noudattamalla tavoitellaan rakennukselle muuntojoustavuutta. Se onkin rakennuksen omistajalle tärkeä strateginen rakennuksen ominaisuus. Omistajan on huolellisesti punnittava, kannattaako hänen sijoittaa jo investointivaiheessa kalliimpaan, mutta muutosjoustavampaan ratkaisuun. Voihan käydä niin, ettei kalliisti hankittu optio muodostukaan kannattavaksi investoinniksi (muutosta ei tapahdukaan tai muutos onkin täysin erilainen, kuin mihin oli varauduttu). Ja puolestaan jos onkin päädytty halvempaan ja joustoltaan jäykempään ratkaisuun, voi käydä niinkin, että muutoksen taloudelliset haitat ovat oleellisesti suuremmat, kuin option hinta olisi ollut. (Saari 2001)

Rakennuksen joustavuustavoitteet on otettava huomioon jo hankesuunnitteluvaiheessa tehtävän ohjelmoinnin yhteydessä. Rakennuksen joustavuuden tavoittelu tuo ohjelmointiin erityispiirteitä, jotka ovat seuraavat: määritetään muuntuvan tilaosan ominaisuudet (ne kuvataan joustavassa tilaohjelmassa), mitoitetaan kiinteä perusosa, laaditaan rakennuskustannusbudjetti eritellen kiinteän perusosan osuuteen ja muuntuvan tilaosan osuuteen sekä määritetään ylläpitotaloudelliset tavoitteet muuntuvan tilaosan sekä minimi- että maksimivaihtoehtoilta. Jotta kiinteä perusosa voidaan määritellä ja mitoittaa, tulee sitä ennen määritellä muuntuvien tilojen ominaisuudet tai paremminkin tilojen ominaisuuksien vaihteluvälit. Muuntuviin tiloihin sisällytetään ne rakennukseen sijoitettavat tilat, joiden käyttötarkoituksen tai -tavan muutoksiin varaudutaan. Tämä kuvataan laatimalla hankkeelle joustava tilaohjelma. Hankesuunnitteluvaiheessa kiinteästä perusosasta määritetään rakennuksen kokonaislaajuus (bruttoalana) sekä mm. vapaa huonekorkeus, rakennusrungon jännevälit, lattioiden kantavuus, ikkunajako ja kiinteän perusosan talotekniikka (kuten tarvittavien ilmamäärien enimmäisarvot). Samoin siitä määritetään kiinteät tilat. (Saari 2001)

Alla esimerkki joustavan tilaohjelman periaatteesta (Saari 2001):

Toimistohuoneita	300...1600m ²	a' 10...20m ²	20...150 henk.
Avotoimistotilaa	0...1000m ²		0...125 henk.
Neuvottelutiloja	100...200 m ²		
Lähiparastotiloja	200...400 m ²		
WC-tiloja	0...20 m ²		
Jne...			
Yhteensä	4000 m ²		

Yleissuunnitelma on kiinteän perusosan suunnitelma, jossa esitetään täsmennetty muuntuvan osan raja- ja tila-alueet. Talotekniikan mitoitus, varaukset ja muuntuvaa tilaosaa varten tehty lähdöt määritellään kiinteän osan suunnitelmassa. Raja- ja tilat päätetään hankekohtaisesti. Suositus on, että kiinteään perusosaan kuuluvat porrashuoneet ja nousuhormit. Perusosaan voidaan lukea sellaiset kiinteät tilat, joita ei suunnitelmissa tulla muuttamaan (Kiiras ym. 2007). Jossain tapauksissa talotekniikan vaakakanavisto voidaan myös sisällyttää kiinteään perusosaan ja se mitoitetaan tilajoukon maksimille (Kiiras ym. 2007).

3.2 Talotekniikan modulaarisuus

Rakentamisen modulaarisuuteen liittyy olennaisesti moduuliverkkojen hyödyntäminen suunnittelussa sekä toisaalta modulaaristen esivalmisteen käyttäminen. Suunniteltava rakennus ja siihen liittyviä rakennusosia voidaan ositella mittajärjestelyn avulla. Mittajärjestelyssä voidaan määrittää rakennukselle mm. moduuliverkkoja sekä niihin liittyviä kanta- ja kertamoduuleja, suositusmittoja (esim. kerrokorkeuksia) sekä toleransseja. Mittajärjestelyn avulla esivalmistettaville tuotteille saadaan suunnittelua varten mittoihin liittyvät riittävät lähtötiedot, jolloin esivalmisteen voidaan valmistaa varastoon sujuvasti. Mittajärjestely selkeyttää myös suunnittelutöitä sekä rakentamisen aikaisia mittauksia ja asennustöitä. (RT 03-10525)

Moduuliverkot selkeyttävät rakennusosien- ja tarvikkeiden asennusta erityisesti, kun ne suunnitellaan ja valmistetaan moduulimittaisina. Asennettavien komponenttien mitoituksessa huomioidaan niiden tarvitsemat liittymismittat, joiden avulla varataan riittävä tila mm. asennukselle, mittapoikkeamille sekä saumaukselle. (RT 03-10525)

Toleranssien väljyys haastaa esivalmistusta. RT-kortin 03-10525 mukaan osa käytössä olevista valmistus- ja asennustoleransseista ovat niin väljiä, että moduulijärjestely ei ole täysin noudatettavissa asennusvaiheessa. Rakennus- ja rakentajakohtaisia menetelmiä on tämän vuoksi jouduttu soveltamaan poikkeamien hallitsemiseksi työmaalla. (RT 03-10525)

Ilman moduulimitoitusta tarvikkeita tai komponentteja joudutaan sovittamaan tai työstämään enemmän työmaalla, jolloin esivalmistuksen hyödyt voidaan menettää. Vaikka komponentteja valmistettaisiin suunnittelun sisältävänä tuoteosakauppana, tulee tuoteosan liittyminen muuhun rakennukseen olla tarkasti moduulimittainen. (RT 03-10525). Moduulien hyötyinä pidetään mm. sujuvaa moduulien sisältämien tuotteiden vaihdettavuutta, tuotteiden standardoituvuutta, tuotannon aikataulun lyhentymistä, virheiden vähentymistä, sekä huollettavuuden ja kunnossapidon helpottumista (RIL 239-2008; Keskiniva ym. 2020).

Moduulien suunnittelun yhteensovittaminen voi olla paikallarakentamista haastavampaa. Modulaarisissa ratkaisuissa tulee kiinnittää erityistä huomiota moduulien välisiin liitoksiin ja niiden standardointimahdollisuuksiin (Keskiniva ym. 2020).

Ohjeessa RIL 239-2008 jaetaan taloteknisten asennusten modulaarisuus kahteen osaan, reitityksen ja järjestelmien modulaarisuuteen.

Reititysten modulaarisuus:

Reitityksen modulaarisuus tarkoittaa karkeasti sitä, että ainakin talotekniikkaa sisältävän esivalmisteisen hormin ”ulkoinen seinärakenne” on modulaarinen esivalmiste. Myös kannakkeet ja mahdollisesti osa eristyksistä voidaan laskea kuuluvaksi tällaiseen reititysmoduuliin. Lisäksi reititysmoduulissa voi olla eriteltynä moduulimittaiset paikat erotuspelteineen eri tekniikka-asennuksille. Reititysmoduuli toimii siis modulaarisena kehikkona talotekniikka-asennuksille. Reititysmoduuliin voidaan varata tilat myös mahdollisille tulevaisuudessa asennettaville reitityksille, mikäli se on tilankäytöllisesti mahdollista. Tällainen reititysmoduuli periaatteessa mahdollistaa myös eri tuotevalmistajien taloteknisten järjestelmämoduulien asentamisen samaan reititysmoduuliin. (RIL 239-2008)

Talotekniikan kannatus voidaan tehdä esiasennettuina moduuleina tai paikalla asennettuna (hitsauksella). Tyypillisiä esiasennettuja kannatusmoduuleita löytyy esimerkiksi pystyhormimoduuleista ja vaakasuuntaisista käytävämoduuleista. Modulaariset kannakkeet voivat olla korkeussäädettäviä, mikä helpottaa tekniikan asentamista ja toleranssien hallintaa. (RT 103447)

Rantalan laatimassa RIL-ohjekirjassa kuvataan mm. taloteknisten asennusten systemaattisen reitityksen moduulimalli, esimerkkejä moduulimaisista talotekniikkaesivalmisteista ja niiden sijoittelusta asuinkerrostaloihin, RIBS-mallin (Heljo 2005) mukaiset toimistotalon ”tyyppikerrokset” ja kehityksen suuntaviivoja lähitulevaisuudelle.

Järjestelmien modulaarisuus:

Järjestelmämoduuli taas sisältää ainakin varsinaisen talotekniikan, eli kaapelit tai putket. Reititys- ja järjestelmämoduulin yhdistelmää kutsutaan oppaassa asennusmoduuliksi. Saatavilla olevien esi-valmisteratkaisujen perusteella joskus pelkkä reititysmoduuli voi olla esivalmisteinen, mutta siihen asennetaan putket tai kaapelit paikalla asennettuna. Yksittäisessä asennusmoduulissa eri talotekniikkalajien järjestelmämoduulit erotetaan toisistaan pellein ja muin keinoin mm. sähköturvallisuussyistä. Sähköjärjestelmät kannattaa sijoittaa omaan järjestelmämoduuliinsa selkeästi merkiten. Ilmanvaihtokoneen kaapelit voidaan kuitenkin sijoittaa ilmanvaihtokanavien kanssa samaan järjestelmämoduuliin. Käyttövesijärjestelmät ja viemärit voidaan sijoittaa kosteusilmaisimineen samaan tai erilliseen järjestelmämoduuliin. Järjestelmämoduulien erittelyssä tulee huomioida myös eri järjestelmien käyttöiät siten, että huollot ja korjaukset eivät aiheuta turhia käyttökatkoja tai purkamisia. Toisin eri käyttöiän järjestelmiä ei kannata sijoittaa samaan järjestelmämoduuliin. (RIL 239-2008)

RIL 239-2008 -ohjekirjassa kuvataan myös ideaali ns. UIT (Unified Installation Technology) -malli teollisen talotekniikan asennusjärjestelmille. Oppaan mukaan UIT pyrkii tarjoamaan yhteisen alustan eri valmistajien moduulituotteiden integroimiseksi samaan asennusmoduuliin. Tällaista ei ilmeisesti ole alalla käytössä.

3.3 Talotekniikan esivalmistus

Building 2030 -hankkeeseen tehdyissä raporteissa on käyty läpi esivalmistukseen liittyvää prosessia, mahdollistajia, esteitä ja vaikutusten arviointeja. Esivalmistuksen määrää halutaan lisätä Suomessa. Sen yleisesti tunnetut hyödyt ovat tuottavuuden kasvu sekä materiaalihävikin väheneminen. (Peltokorpi ym. 2018)

Talotekniikan esivalmisteratkaisut luokiteltiin raportissa neljään pääryhmään: tilamoduulit, tekniset tilaosat, talotekniikan keskus-, siirto ja pääteosat ja talotekniikan sovittaminen muihin rakennusosiin. Tilamoduuleihin kuuluvat kerrososaelementit / suurelementit, kylpyhuonemoduulit, konehuoneet ja leikkaussalit. Teknisiin tilaosiin kuuluu esimerkiksi alakattolevyjien talotekniikka (valaisimet ja savuilmaisimet asennettuna), tekniikkaseinäelementit, pystykuiluelementit, lattiaelementit ja käytäväelementit. (Peltokorpi ym. 2018)

Peltokorven ym. (2018) tutkimuksessa kuvataan esivalmistusta hyödyntävän hankkeen prosessikaavio rakennushankkeen vaiheittain. Tarveselvitys etenee normaalisti, tosin erikoisuutena on mainittu TATE-konsultti. Hankesuunnittelussa on suositeltu pohdittavaksi esivalmistuksen hyödyntämistä hankkeen aikataulu- ja kustannustavoitteisiin pääsemisessä sekä tontin ahtauden tai laatuvaatimusten vuoksi. Tässä yhteydessä on suositeltu keskeisinä osapuolina lukuisia konsultteja: TATE-konsultti, rakennuttajakonsultti ja pääurakoitsijan konsultti. (Peltokorpi ym. 2018)

Ehdotus- ja yleissuunnittelu on niputettu yhteen kyseisessä tutkimuksessa. Tutkimuksessa on suositeltu, että tilaaja hankkisi selvityksen taloteknisen järjestelmien esivalmistuksesta ja siihen liittyvistä hyödyistä. Tämän avulla valitaan esivalmisteteet mahdollisuuksien joukosta. Valinnat johtavat esivalmistusohjelman laatimiseen. Esivalmistamisen vaatimat aikataulut sovitetaan muihin aikatauluihin. (Peltokorpi ym. 2018)

Toteutus suunnittelussa ja rakentamisen valmistelussa valitaan esivalmistetoimittajat ja hyödynnetään kyseisten toimittajien vakioratkaisuja. Esivalmistamisen toimitukset sovitetaan muuhun logistiikka-aikatauluun. (Peltokorpi ym. 2018). Rakentaminen, käyttöönotto, takuu-aika ja ylläpito on myös kuvattu raportissa.

4 Haastattelututkimuksen tulokset

Asiantuntijahaastatteluissa keskityttiin kokemuksiin talotekniikan reititysten toteutuksesta, modulaaristen osien ja esivalmistuksen käytöstä. Mielenkiinnon kohteena olivat myös ansaintalogiikka sekä toimintamallit.

4.1 Talotekniikan reititykset

Reititysten tilantarpeen huomioinnista käydään jatkuvasti keskustelua arkkitehdin ja muiden suunnittelijoiden välillä. Haastatellun talotekniikkasuunnittelijan mukaan usein arkkitehti ei osaa huomioida suunnitelmissaan riittävästi teknisten tilojen ja kuilujen paikkoja ja tilantarpeita, vaan talotekniikkasuunnittelijan tulee informoida arkkitehtia näistä asioista ja osallistua aktiivisesti suunnitelmien kehittämiseen. Lopullinen ratkaisu on eri suunnittelualojen kompromissi.

”Esimerkiksi tietty kuilu pitää olla tietyn teknisen tilan lähellä. Toiminnallisuus tulee ensin ja sitten pyritään sijoittamaan tekniset tilat toiminnallisuuden keskelle. Tässäkin hankkeessa huomattiin, etteivät käytävälevyydet ja -korkeudet ensin riittäneet.” -Suunnittelija

Erään suunnittelijan mielestä suuremmissa rakennushankkeissa teknisten tilojen sijoittelussa ei aina huomioida tarpeeksi hormien ruuhkautumista. Sijoittamalla teknisiä tiloja tasaisemmin voitaisiin optimoida reititysten tilantarvetta.

Vaativammissa hankkeissa päädytään välillä innovatiivisiin taloteknisiin ratkaisuihin. Esimerkiksi kuilujen ahtaus voi ajaa tähän. Yhteistoiminnallinen toteutusmuoto ja sen maksuperusteet voivat edistää innovatiivisten ratkaisujen suunnittelua, koska innovointi voi vaatia esimerkiksi suunnittelijan toteuttamaa simulointia.

”Esimerkiksi tutkittiin, voidaanko yhdistää kerroskohtaisten konehuoneiden katolle menevät poistot samaan hormiin. Ohjelmistot eivät osaa laskea tällaista tapausta, vaan tehtiin laajempaa simulointia, jonka perusteella päädyttiin huomattavasti pienempään kuiluratkaisuun. Allianssi mahdollisti tällaisen hankkeen parhaaksi tehtävän selvityksen, koska kustannus ei jäänyt suunnittelutoimistolle.”

Matalat kerroskorkeudet haastavat reitityksiä ja ohjaavat välillä kalliisiinkin kompromisseihin. Haastatellun urakoitsijan mielestä ainakin paljon talotekniikkaa sisältävissä suurhankkeissa tulisi panostaa reititysten tilanvarauksiin enemmän ja varhain.

4.2 Modulaarisuus ja esivalmistus

Tilaaaja vaatii harvoin esivalmisteiden käyttöä, eikä tarkastelluissa kohteissakaan näin ollut tehty. Esimerkiksi kokenut haastateltu suunnittelija ei ollut koskaan ollut mukana hankkeessa, jossa tilaaja olisi vaatinut esivalmisteiden käyttöä. Osa haastateltavista pohti, että tällaisia vaatimuksia saattaisi tulla esiin lähinnä kokeilunhaluisten rakennuttajien hankkeissa. Julkinen hankinta voi myös rajata tällaisia vaatimuksia julkisella puolella, koska esivalmistevaatimuksia voi olla vaikea perustella tai pisteyttää. Toisaalta tarkastellussa allianssikohteessa hankinnat tehtiin julkisena hankintana, jossa esivalmistuksen innovaatiot oli huomioitu allianssiosapuolten kilpailutuksessa. Teollisten rakennuskohteiden hankkeissa tilaajat vaativat joskus esivalmisteiden käyttöä.

”Ei ole ollut tilaajan tahtotilasta kyse, vaan allianssihankkeen osapuolista. Meillä on hankkeessa tiivis tahtiaikataulu ja halutaan poistaa riskejä ja lyhentää läpimenoaikaa. Tahtituotannosta tulee [esivalmistamiseen ohjaava] paine, että ei voida myöhästyä.” -Suunnittelija

Urakoitsijoilla on vaihtelevia mielipiteitä tilaajan vaatimista esivalmisteista. Esivalmistamiseen erikoistuneet urakoitsijat pitivät hyvänä asiana esivalmisteiden vaatimista sopivissa paikoissa. Toisaalta osa koki esivalmistamisen vaatimisen rajaavan turhaan kilpailua ja ohjaavaan suunnittelua mahdollisesti huonoon ratkaisuun.

”Ei ole niin pitkälle viety, että meillä olisi jotakin pisteyttämistä tai edes ohjeistusta, että milloin ja miten esivalmistetaan. Ohjeistusmateriaali on yleensä aika kapea johtuen mm. reilusti poikkeavista rakennushankkeista” -Tilaaja

Toisaalta osa esivalmisteita hyödyntävistä haastatelluista urakoitsijoista näki, että myös esivalmisteita vaativia tilaajia on olemassa ja vaatimukset saattavat olla yleistymässä. Eräs haastateltu tilaajan edustaja mainitsi allianssihankkeen, jossa varhaisen osapuolten integraation mahdollistamana pohdittiin tahtituotannon ja esivalmistamisen yhteensovittamista jo varhaisessa kehitysvaiheessa.

Urakoitsijoilla on yleensä suurin intressi käyttää esivalmisteita, koska esivalmisteet voivat mm. yksinkertaistaa tahtituotantoa, lyhentää läpimenoaikaa ja vähentää tuotannon kustannuksia. Esivalmisteiden käyttäminen voi auttaa urakoitsijaa pääsemään tilaajan asettamiin kustannus-, aika- ja laatutavoitteisiin. Eräs haastateltu suunnittelija kokikin olevan hieman etäällä esivalmistuspäätöksistä verrattuna urakoitsijan toimintaan.

Esivalmisteiden avulla voidaan myös parantaa työturvallisuutta, koska esivalmisteiden kasaaminen tapahtuu hallituissa tehdas- / tai työpajaolosuhteissa. Esivalmisteita voidaan valmistaa pöydän ääressä, jolloin ergonomia on parempi verrattuna katon tai lattianrajassa tehtäviin asennuksiin. Samoin riittävä tuuletus on helpompi järjestää tehtaalla tai työpajalla. Tulitöissä voidaan taas vaatia työmestalle tulityövahtia, jolloin tulitöiden keskittäminen esivalmistuspisteelle vähentää tulityövahtien määrää.

Toteutusmuodosta ja urakoitsijoiden hankinnan ajoittumisesta aiheutuen urakoitsijat pääsevät vaihtelevasti hankkeissa mukaan ehdottamaan erilaisten esivalmisteiden käyttämistä. Erityisesti allianssissa ja muissa kehitysvaiheen sisältävissä yhteistoiminnallisissa malleissa sekä KVR-hankkeissa urakoitsijoilla on mahdollisuus vaikuttaa esivalmisteiden käyttöön ja reititysratkaisuihin. Joissakin yhteistoiminnallisissa hankkeissa (muissakin kuin alliansseissa) talotekninen urakoitsijaehdokka on ollut yhdessä päätoteuttajaehdokkaan kanssa kehittämässä ratkaisuja yhteiseen tarjoukseen.

KVR-toteutusmuoto on periaatteessa selkein urakoitsijan kannalta, mutta se voi lisätä tilaajan riskiä. Toisaalta allianssissa on helpompi joustaa urakkarajoissa, mikä helpottaa mm. urakkarajojen joustamista useampaan urakkaan liittyvän esivalmisteen tapauksessa. Osassa alliansseja urakoitsija hankitaan suunnittelijoiden hankkimisen jälkeen ja osassa samaan aikaan. Toisinaan kehitysvaihetta viedään pitkälle ilman urakoitsijaa.

Allianssityyppisissä hankkeissa esivalmisteiden käytöstä pyritään päättämään yhdessä osapuolten kesken kehitysvaiheen aikana. Suunnittelijoiden ja urakoitsijoiden välistä jatkuvaa kommunikointia pidetään tärkeänä esivalmistepäätöksissä. Suunnittelijalla tulee olla selkeä käsitys, miten esivalmistus sisällytetään suunnitelmiin hankintoja ja toteutusta varten. Esimerkiksi tietyistä detaljeista voidaan tarvita normaalia tarkemmat selostukset ja kuvat, jotta toleranssit saadaan

huomioitua. Haastatellut suunnittelijat toivoisivatkin selkeää esivalmistamiseen liittyvää suunnittelun ohjausta ja perehdytystä tällaisiin asioihin.

Allianssihankkeissa kehitetään ensin suuri määrä esivalmisteaihioita, minkä jälkeen selvitetään esivalmistamisen vaikutusta aikatauluun, teknisen toteutukseen ja kustannuksiin. Aikataulussa keskeistä on pyrkiä huomioimaan mm. läpimenoajan lyhentäminen ja soveltuvuus tahtituotantoon. Päättöajalla ja taloteknisillä urakoitsijoilla on paras ja ajankohtaisin tietous kustannuksista, jolloin esivalmisteiden kustannusvaikutuksen arviointi jää luontaisesti heille.

Kustannusvaikutuksia arvioidessa tulee huomioida esivalmisteiden ja asennustuotteiden nykyiset markkinahinnat. Lisäksi paikallarakentamista ja esivalmistamista arvioidessa tulee huomioida, mitä töitä esivalmistaminen syrjäyttää ja toisaalta, mitä lisätöitä esivalmistaminen aiheuttaa. Esimerkiksi runkovaiheen karkeiden toleranssien vuoksi esivalmisteita saatetaan rakentaa hieman ylipitkinä, jolloin esivalmisteiden päitä joudutaan sahaamaan työmaalla. Vaihtoehtoisesti työmaalla voidaan tehdä tavanomaista enemmän mittauksia, jolloin asennetun rungon mitat saadaan todennettua, vaikkakin kahden haastatellun urakoitsijan mukaan laserkeilaus on hidas ja kustannustehoton tapa nykyteknologialla ja jää tekemättä kustannussyistä¹. Myös liitoskappaleilla voidaan sovittaa esivalmistetta vaihtelevan kokoihin tiloihin.

Tässä tutkimuksessa tehtyjen haastattelujen perusteella esivalmisteet eivät osoittautu aina paikallarakentamista halvemmaksi². Erityisesti toistuvuus tulee huomioida esivalmistamisessa – toistuvasti hyödynnettävissä oleva monistettava innovaatio voi maksaa itsensä paremmin takaisin. Samoin moduulimittainen suunnittelu parantaa esivalmisteiden toistettavuutta.

On myös tärkeätä, että hankkeessa myös selvitetään mahdollisten moduuli- ja esivalmistajatoimitajien kapasiteetit, jotta moduulien ja esivalmisteiden toimitusvarmuus ja hinta on selvillä.

Esivalmisteita valittaessa on syytä huomioida myös mahdolliset logistiset haasteet, kuten toimitusetaisyydet ja kuljetukseen liittyvät riskit kuten värinä, nostoihin liittyvät rajoitteet sekä potentiaaliset varastointitavat kohteessa tai sen ulkopuolella. Taloteknisiä elementtejä on mielellään haluttu, tai on ollut pakko nostaa rungon sisään jo ennen rungon sulkemista. Se onkin täytynyt ottaa huomioon jo suurempia esivalmisteita harkitessa sekä päätöksenteon, suunnittelun ja hankintojen sovittamisessa.

Tilamoduulit tulee hankkia varhain. Vaativissa hankkeissa, kuten sairaaloissa tilamoduulien (esim. KPH-elementit) valinta vaatii monen näkökulman yhteensovittamisen, mikä on haastavaa:

- Tilaratkaisuun liittyvä päätöksenteko ja riittävät käyttäjätestaukset
- Tilakohtaiset ja ajantasaiset erityisvaatimukset: materiaalit, puhdistettavuus, pintapaloluokat, käyttäjäturvallisuus, jne
- Suunnittelu, hankinnat, valmistaminen
- Asentaminen jo runkovaiheen aikana

”Detaljitason tietoa pitäisi olla tosin paljon varhain, jotta voit esivalmistaa. Kaikki kalustukset ja järjestelmät pitäisi olla päätettynä, jotta voit hankkia esivalmisteena. Pitäisi huomioida kaikki varustukset ja kiinnitykset niille. Hankinnat olisi pitänyt tehdä pari vuotta sitten. Edelleen osa

¹ Taloteknisellä urakoitsijalla on asiantunteva käsitys esivalmisteen vaikutuksista työmaan tehtäviin. Lisäksi taloteknisellä urakoitsijalla on ajankohtainen talotekniikan hintatietous. Tämän vuoksi taloteknisiä esivalmisteita arvioitaessa taloteknisen urakoitsijan mukaan tuominen voi olla merkittävä etu.

² Asiaa on tutkittu tarkemmin tutkimuksessa ”Esivalmistuksen vaikutusten arviointi” (Peltokorpi ym. 2019)

hankinnoista roikkuu. Erikoisjärjestelmät ja erikoisvaatimukset tekevät esivalmisteiden käyttämisestä melkein mahdotonta näiltä osin.”

Esivalmisteita voidaan hankkia erilaisin suunnitelmavaatimuksin. Osa toteutussuunnittelusta voidaan ulkoistaa tehtaalte, jolloin esivalmisteiden hankinta tehdään kevyemmällä suunnitelmalla³. Mikäli suunnittelua ulkoistetaan, tulee esivalmisteiden tilaajan esittää selvät vaatimukset mm. käytetyistä suunnitteluohjelmistoista, jotta tietomallit saadaan yhdistettyä.

Urakoitsija voi myös itse esivalmistaa esimerkiksi yhteiskannakkeita työpajalla, mikä voi vaatia tarkempaa toteutustason detaljointia. Tällöin suunnittelijan ja urakoitsijan tulee yhdessä selvittää tarkemman suunnittelun tarpeet tilannekohtaisesti. Tarkempi detaljointi voi tapahtua myös urakoitsijan toimesta suunnittelijan toimittamien kuvien pohjalta, koska paras käsitys asennustavasta voi olla urakoitsijalla.

Tämän tutkimuksen haastatteluissa nostettiin toleranssit esiin esivalmistamisen haasteina. RunkoRYL:in toleranssit ovat väljemmät kuin SisäRYL:in, mikä aiheuttaa toleranssien hallintaan haasteita. Betonirakentamisen karkeahkot toleranssit haastavat esimerkiksi talotekniikan etukäteen asentamista ontelolaattoihin. Betonielementtien asentamisessa voi olla heittoa ja elementti voi olla hieman kaareva, jolloin talotekniikkaliitosten kytkeminen vaatisi erilaisia säätökappaleita. Myös kittaaminen, palokatkojen tekeminen ja akustiikka voivat muodostua tällöin haasteiksi.

Vaakasuuntaisia käytävämoduuleita on kokeiltu aiemmassa hankkeessa, mutta muutaman haastateltavan mukaan kokemukset eivät olleet hyviä. Erään osapuolen mukaan suunnittelu oli ulkoistettu moduulitehtaalte ja haasteeksi oli muodostunut mm. viemäreiden ja jauhesprinklereiden kallistuksien puutteet, elementtien taipuminen sekä kaatojen osuminen kohdalleen. Tämä johti moduulien muokkaamiseen työmaalla.

Taloteknisten keskuslaitteiden yhteydessä esivalmistus on yleistä. Esimerkiksi IV-koneita ja lämpö- sekä kylmäkeskuksia on koottu etukäteen (pumput, automaatio, sähköt, venttiilit, keskusukset, ...). Keskuslaitteissa on tavoiteltu ”plug and play” -tyyliä, josta on käyty ohjaavia keskusteluja myös tehtaan kanssa.

Haastatelluilla oli myös kokemusta hankkeista, jossa kanavia tehtiin työmaan läheisyydessä kanavantekokoneella. Kanavantekokoneella IV-kanavaa kasataan tiiviinä toimitetusta materiaalista, mikä vähentää merkittävästi raskaiden kuljetusten määrää erityisesti suurilla kanavakoilla.

4.3 Ansaintalogiikat

Haastatteluissa ja työpajoissa tunnistettiin alan työehtosopimusten haastavan esivalmistamisen joustavaa käyttöä. Haastateltavien mukaan alan työehtosopimuksissa asennushinta on sama riippumatta siitä, tehdäänkö taloteknisen osan asennus esivalmisteenä vai paikalla rakentaen. Asennushinta ei huomioi asennuksen helppoutta tai nopeutta. Tällöin urakointiyritys ei hyödy taloudellisesti esivalmisteenä, vaan hyöty jää asentajalle. Esivalmisteen kehittäminen ja suunnittelu maksaa kuitenkin rahaa yritykselle. Tämä yhtälö vähentää yrityksen halukkuutta esivalmistaa.

³ Tällaisia tuoteosakauppoja suositellaan SUKE-mallissa, joka käsittelee erityisesti projektinjohtourakointia. Sama menettely voisi soveltua myös muihin limitetyn suunnittelun ja rakentamisen hankemuotoihin?

”Urakoitsijan on vaikea lupautua paljon ennen kuin asentaja on tiedossa, että tämä asennus saadaan tehtyä halvemmalla esivalmistamien. Siinä kohtaa ei vielä tiedä, suostuuko se asentajaporukka joustamaan normihinnoittelusta.”

Taloteknisten esivalmistamien hyötyjen arvioinnissa tulee siis tuntea vahvasti myös työehtosopimukset. Tässä talotekniikkaurakoitsijalla on vahva tuntemus.

Esivalmistaminen voi siirtää osittain taloteknisiä töitä tehdasolosuhteisiin. Tehtailla osan asennuksista voi tehdä muu henkilö kuin talotekninen asentaja, mahdollisesti halvemmalla tuntikorvauksella. Eräältä esivalmistamiskonsepteja kehittäväältä pääurakoitsijan edustajalta kysyttiin, minkälaisia ajatuksia asennusten siirtäminen tehdastyöntekijöille herättää. Edustajan mukaan suhtautuminen on ollut myönteistä.

Hankkeissa voi tulla tarve innovoida esivalmistamiskäytäntöjä. Esivalmistamien innovointi vaatii aikaa ja rahaa. Yksittäisessä rakennushankkeessa tehty tuotekehitys ei välttämättä maksa itseään takaisin samassa hankkeessa, vaan hyöty pitäisi ulosmitata useamman hankkeen ketjussa. Kohteiden uniikkisuus ja laajamittainen kohdekohtainen räätälöinti haastaa tätä. Jos esivalmistamien tehdas tuotteistaa hankkeessa kehitetyn innovaation, jää hyöty tehtaalle. Tämä ei kannusta urakoitsijaa ja suunnittelijaa innovoimaan omalla tai hankkeen kustannuksella.

Paikallarakennettavasta ratkaisusta siirtyminen esivalmistamiseen voi yhdistää useamman urakan töitä ja hankintoja yhden esivalmistajan vastuulle. Urakkarajojen ja kustannusten uudelleensovittaminen vaatii tällöin sopimista. Haastattelujen perusteella tämän on koettu sujuvan hyvin.

4.4 Case esimerkki esivalmistamien hyödyntämisestä asuinkerrosto- lossa

Yhtenä haastatteluna haastateltiin suomalaisen, mm. esivalmistuksen hyödyntämisessä urakointiyrityksen edustajaa asuinkerrostalojen esivalmistamiseen liittyen. Haastateltu urakoitsija on kehittänyt asuinkerrostalotuotantoonsa konseptia, jossa on erityisesti huomioitu tahtituotannon tarpeet. Esivalmistaminen on keskeinen osa konseptia. Konsepti soveltuu myös esimerkiksi hotellirakennuksiin, mutta monimutkaisempia hankkeita ei tehdä konseptin avulla.

”Esivalmistaminen soveltuu hyvin tahtituotantokonseptiin, koska se vakioi prosessia ja vähentää variaatiota asennuksessa. Asennuksia tulee työmaalla vähemmän verrattuna yksittäisistä osista kasattaviin kokonaisuuksiin. Esivalmistaminen lyhentää kokonaisläpimenoaika ja myös yksittäisten asennusten kestoa, mikä helpottaa tahtituotantoa.”

Urakoitsija käyttää konseptissaan kylpyhuonemuodulleja ja esivalmistamien konehuoneita. Esivalmistamien konehuone on ”kontti”, joka nostetaan rakennuksen katolle. Nousuhormeja rakennetaan Elpo-hormeina, joihin on sijoitettu mm. ilmanvaihtokanavat. Ratkaisuihin on jonkin verran hankekohtaisia eroja. Urakoitsijalla on asuntokirjasto, jonka avulla urakoitsija voi ottaa kantaa suunniteltuihin rakennusratkaisuihin, jotta ne soveltuisivat urakoitsijan konseptiin.

Urakoitsija pyrkii käyttämään kokonaisvastuurakentamista tai projektinjohtourakointia hankkeissa, jotta pääsee vaikuttamaan esivalmistamiseen ja myös muihin suunnitteluratkaisuihin. Urakoitsija tarjoaa hankekehitystä molempiin toteutusmuotoihin, vaikkakin kokonaisvastuurakentamisessa kehitysmahdollisuudet ovat paremmat. Vaikka tilaaja pyytäisi erilaista toteutusmuotoa, saattaa urakoitsija tarjota hankekehitystä vaihtoehtona pyydetylle toteutusmuodolle⁴.

⁴ Tarjouspyyntöjen lähettämisen ajoittuminen hankkeessa vaikuttaa urakoitsijan kehitysmahdollisuuksiin.

Haastateltavan mukaan mm. läpimenoajan merkittävä lyhentyminen konseptin seurauksena saa tilaajan kiinnostumaan vaihtoehtoisesta ratkaisusta.

”Projektinjohtourakoinnissa vaikuttaminen on kokonaisvastuurakentamista hankalampaa, koska suunnittelusopimus on tilaajalla. Mutta niissäkin tapauksissa, jos pystymme tarpeeksi hyvin argumentoimaan vaihtoehtoisen ratkaisun, niin se voi mennä läpi.”

”Me kehitetään hanke sellaiseksi, että se soveltuu meidän tuotantosysteemiimme mahdollisimman hyvin ja sitä kautta pystytään alentamaan kustannuksia. Tällä tavalla myös pystymme voittamaan urakoita.”

Urakoitsija on erottanut taloteknisistä töistä työn ja materiaalien hankinnan. Työt tehdään tällä hetkellä konseptissa tuntitöinä (aliurakoitsijoiden asentajia tai vuokratyöntekijöitä). Pääurakoitsija ohjaa suoraan tuntityöntekijöitä – aliurakoitsijan työnjohtoa ei ole välissä. Tämä on siirtänyt tuotannon ohjauksen painopistettä pois sopimusjohtamisesta takaisin kohti asentajien johtamista ja neuvomista. Työnjohtamisen kulttuurin muuttaminen on vaatinut kouluttamista yrityksen sisällä, koska työnjohtajat ovat tottuneet ohjaamaan aliurakoita sopimusten kautta ja aliurakoitsijoiden työnjohtajia hyödyntäen.

”Jos perinteisesti pääurakoitsijan työnjohtaja istuu puolet ajasta toimistossa, niin nykyisessä mallissa valtaosa ajasta ollaan työmaalla ohjaamassa työtä.”

Tuntihinta on koettu vielä verrattain kalliiksi. Toisaalta esivalmistamisen avulla on pyritty yksinkertaistamaan asennuksia ja tehtaalla tehtävistä asennuksista osa tapahtuu muun kuin taloteknisen asentajan toimesta⁵.

⁵ Tähän liittyen on esitetty pohdintaa työehtosopimuksia käsittelevässä luvussa.

5 Toleranssimittausten tulokset

5.1 Vaihtelu talotekniikka-asennuksissa

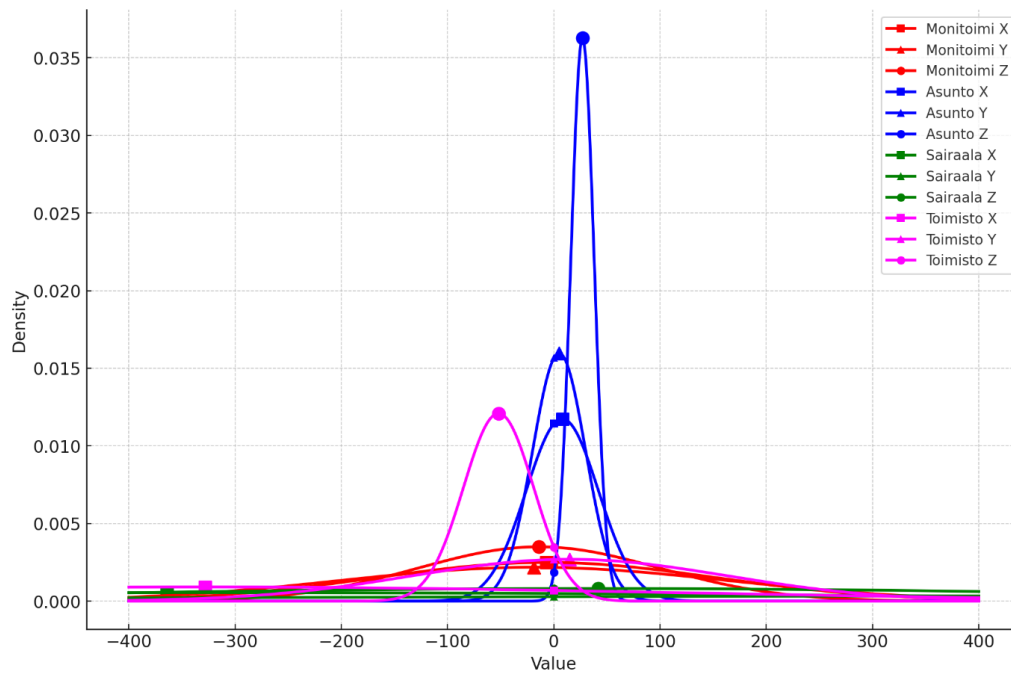
Esivalmisteiden tehokkaaseen käyttöön liittyy olennaisesti asennustarkkuus. Esivalmisteiden muokkaaminen työmaalla syö nopeasti tavoitellut hyödyt kustannuksissa ja aikataulussa. Esivalmisteita joudutaan muokkaamaan, jos esivalmiste ei käy sille suunniteltuun paikkaan. Vaihtelu voi johtua esivalmisteen suunnittelun epätarkkuudesta tai asennusympäristön vaihtelusta, joka estää suunnitelman mukaisen esivalmisteen käytön. Tällainen vaihtelu voi aiheutua lähellä olevista paikalla rakennetuista taloteknisistä järjestelmistä tai rakenteisiin liittyvästä vaihtelusta. Vaihtelusta taloteknisissä asennuksissa on paljon viitteitä aikaisemmissa tutkimuksissa, mutta sen suuruutta ei ole mitattu eikä tiedetä miten projektit eroavat toisistaan vaihtelun määrässä.

Vaihtelu mitattiin neljästä hyvin erityyppisestä kohteesta ja kohteiden välillä oli selkeitä eroja asennusten tarkkuudessa. Tulokset esitetään ensin kootusti kaikista kohteista samassa kuvajasta, jolloin erot projektien välillä korostuvat. Tämän jälkeen esitetään kohteittain mitattu vaihtelu sekä kuvataan esimerkkien avulla vaihtelun syitä ja mekanismeja. Vaihtelu on mitattu kolmen akselin (x,y,z) suuntaisesti ja tulokset kustakin kohteesta esitetään siksi erikseen kolmelle akselille. Tuloksia analysoitaessa on huomattava, että yksittäinen mittaustulos ei välttämättä kerro tietyn rakennustyyppin tai menetelmän yleisestä tarkkuudesta. Erityisesti sairaalakohteessa ja toimistokohteessa mittausta kohdistuu niin rajattuun osa-alueeseen, että rakennustyyppikohtaisia johtopäätöksiä ei voida tehdä.

Kokonaisuutena tarkimpia asennukset olivat asuntokohteessa ja vähiten tarkkoja kaukokylmän teknisessä tilassa. Ääripäiden välillä toiseksi paras tarkkuus saavutettiin monitoimirakennuksessa ja toiseksi huonoin tarkkuus saavutettiin toimistorakennuksen putkirungoissa. Sairaalan osalta mittaustulos kertoo asennustarkkuudesta teknisissä tiloissa kuten lämmönjakohuone ja kaukokylmän tekninen tila.

Voidaan esittää arvio, että suurella otannalla tulokset noudattaisivat normaalijakaumaa. Tästä syystä tulokset on Kuvassa 6 sovitettu normaalijakaumaan. Kuva 6 kertoo mitatun vaihtelun kohteittain ja suunnittain. Jakauman huippukohta kuvaa havaintojen keskiarvoa ja ideaalisesti sen tulisi olla nollapoikkeaman kohdalla. Nollasta poikkeava keskiarvo kertoo systemaattisesta virheestä. Jakauman leveys kertoo kuinka lähellä keskiarvoa havainnot ovat olleet. Ideaalisesti jakauma on mahdollisimman kapea, jolloin asennukset noudattavat tarkasti suunniteltua sijaintia.

Kuvasta 6 nähdään, että asuntokohde on saavuttanut kokonaisuutena parhaan tarkkuuden sekä lähellä nollaa olevalla keskiarvolla että kapealla jakaumalla. Vastaavasti toimistokohteen z komponentti on saavuttanut pienen hajonnan, mutta sen keskiarvo on kauempana nollasta. Keskiarvon tarkka arvo sekä hajontaa kuvaava keskihajonta kullekin kohteelle ja suunnalle on ilmoitettu taulukossa 3. Keskiarvo kuvaa sitä kuinka kaukana suunnitellusta asennukset keskimäärin olivat ja keskihajonta kuvaa hajontaa siten että 68 % kaikista havainnoista on +/- yhden keskihajonnan etäisyydellä keskiarvosta, 95% havainnoista on +/- kahden keskihajonnan etäisyydellä keskiarvosta ja 99,7 % havainnoista on +/- kolmen keskihajonnan etäisyydellä keskiarvosta.



Kuva 6. Vaihtelu projekteissa kuvattuna normaalijakaumana.

Taulukko 3. Vaihtelun keskiarvo ja keskihajonta projekteittain x, y ja z-akselien suuntaisesti.

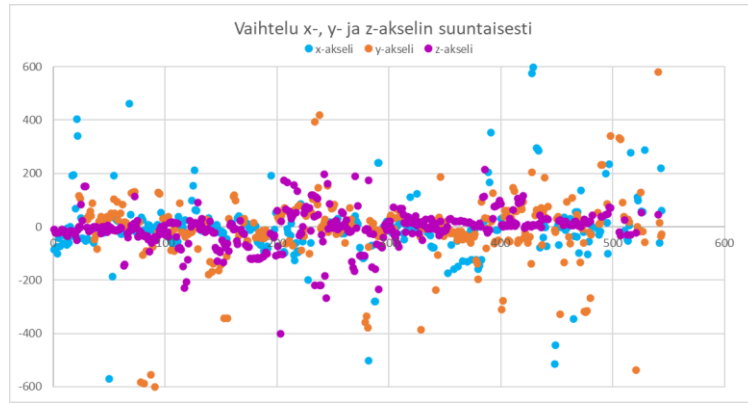
	Monitoimi			Asunto			Sairaala/kaukokylmä huone			Toimisto/putkirungot		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Keskiarvo	-7	-19	-14	8	5	27	-364	727	42	-328	15	-52
Keskihajonta	160	183	114	34	25	11	719	1160	493	437	148	33

Kaikissa projekteissa z-akselin suuntainen vaihtelu oli pienempää kuin x- ja y-akselien suuntainen vaihtelu (keskihajonta oli pienin). Asennusten osumatarkkuus (keskiarvo), ei kuitenkaan aina ollut paras z-akselin suuntaisesti.

Seuraavissa osioissa esitetään kustakin kohteesta mitattu vaihtelu yksityiskohtaisesti. Vaihtelua kuvataan kohdekohtaisesti kuvaajalla, jossa y-akselilla on mitattu poikkeama millimetreissä. Yksi piste kuvaa yhtä havaintoa. Lisäksi kuvaajissa on esitetty mittausten perusteella laskettu keskiarvo ja keskihajonta.

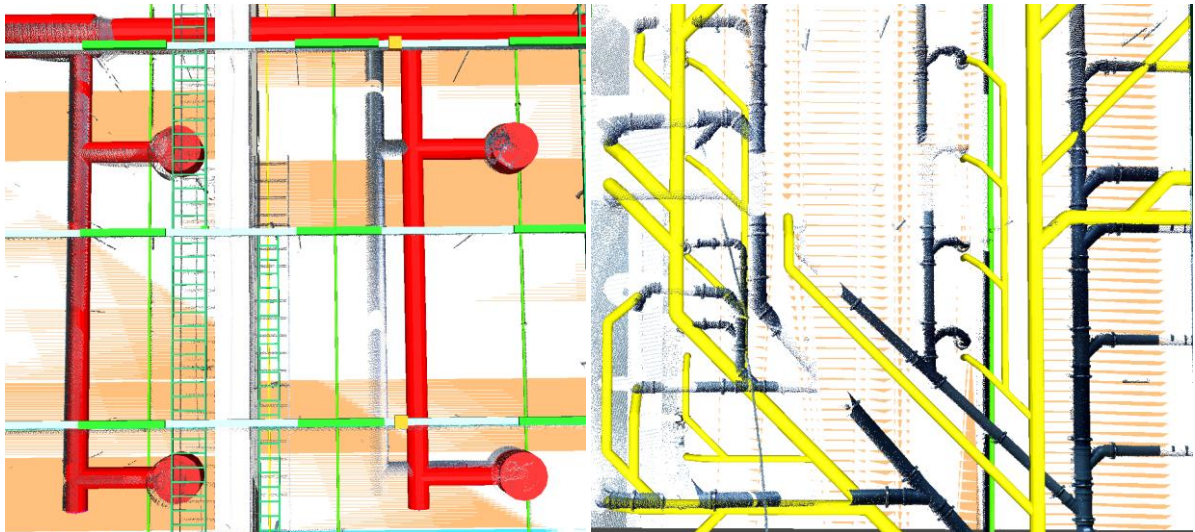
5.1.1 Monitoimirakennus

Monitoimirakennuksessa mitattiin talotekniikka-asennukset yhdessä kerroksessa. Yleisesti ottaen suunniteltuja reittejä oli noudatettu, vaihtelua esiintyi asennuksen tarkassa sijainnissa. Mitattu vaihtelu akseleittain on esitetty Kuvassa 7. Kuvassa pisteet kuvaavat yksittäisiä mittauksia. Siniset pisteet kuvaavat x-akselin suuntaisia mittauksia, oranssit y-akselin suuntaisia ja violetit z-akselin suuntaisia. Kaikissa suunnissa mitattuna keskiarvo on lähellä nollaa (-7, -19, -14). Keskihajonta on vaakasuunnassa suurempaa kuin korkeussuunnassa. Keskihajonta suunnittain on 160, 183, 114.



Kuva 7. Talotekniikka-asennuksien vaihtelu monitoimirakennuksessa x, y ja z akselien suuntaisesti. Yksi piste on yksi mittaus. Siniset pisteet kuvaavat x-akselin suuntaisia mittauksia, oranssit y-akselin suuntaisia ja violetit z-akselin suuntaisia.

Asennukset oli tehty enimmäkseen suunnitelmaa noudattaen, suunniteltuun sijaintiin ja suunnitellulla geometrialla. Kuvassa 8 on esimerkki ilmanvaihtoasennuksesta, jossa on noudatettu suunnitelmaa, mutta sijainnissa on vaihtelua. Kuvan oikealla puolella on selkeä poikkeama pystysuuntaisen kanavan sijainnissa suhteessa suunnitelmaan. Kanavaan kytketyt päätelaitteet on kuitenkin asennettu lähelle niiden suunniteltua sijaintia. Tälle kanavareitin muutokselle ei aineiston perusteella ollut määritettävissä selkeää syytä. Toisaalta suunnitelma ja mittaus eivät myöskään osoita, että sijainnin muutoksella olisi ollut vaikutusta muihin asennuksiin.

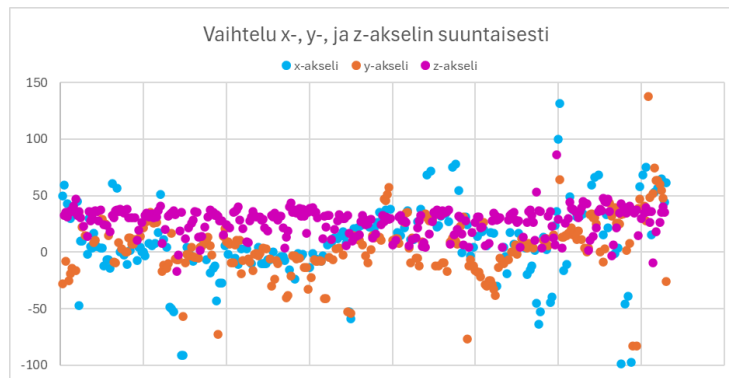


Kuvat 8 ja 9. Vasemmalla, kuvassa 8. Esimerkki asennuksen ja suunnitelman erosta. Suunnitelmaa on noudatettu tarkasti, ja ainut silmiinpistävä ero on oikeanpuoleisen pystysuuntaisen tuuloilmakanavan sijainnissa. Oikealla, kuvassa 9. Esimerkki viemäriasennusten poikkeamista. Vaihtelua on sekä viemäripisteiden sijainneissa (pientä) että viemärien reitityksissä (suurta).

Esimerkki suuremmasta ja harvinaisemmasta poikkeamasta on kuvassa 9, jossa alakattoon asennetut viemärit on asennettu suunnitelmasta poiketen. Viemäripisteiden paikat vastaavat enimmäkseen suunnitelmaa, näissäkin on vaihtelua. Mutta erityisesti reitit on suunniteltu kokonaan uudestaan asennusta tehtäessä. Myöskään viemärien tapauksessa ei ole selvästi nähtävissä, että suunnitelmasta poikkeava asennus olisi johtanut poikkeamiin muissa asennuksissa. Kyseisten viemäriasennusten kohdalla oli vaihtelun mahdollistavaa tilaa sekä vaakasuunnassa että korkeussuunnassa.

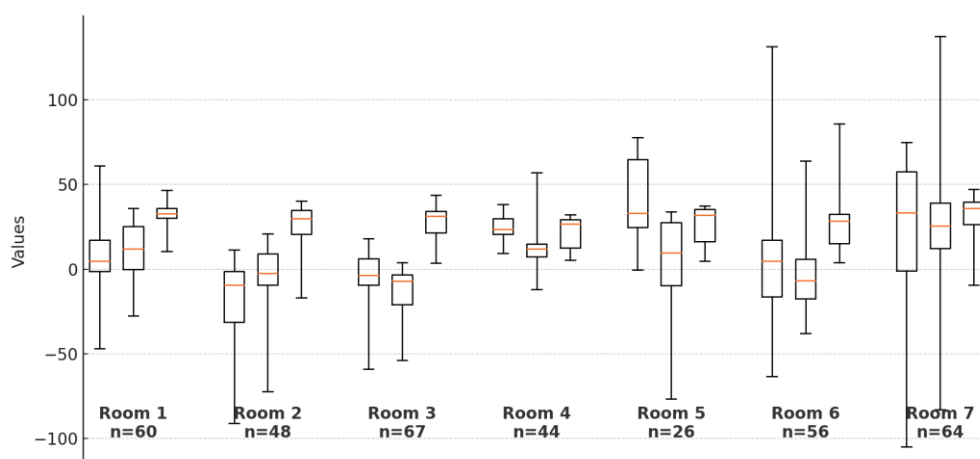
5.1.2 Asunto

Asuntokohteen vaihtelu oli mitatuista kohteista pienin. Kohteessa mitattiin ilmanvaihtoasennuksia, jotka oli esivalmistettu. Asennusta verrattiin IFC-muotoiseen esivalmistussuunnitelmaan. Yhden kerroksen, seitsemän asunnon, kokonaisvaihtelu on esitetty akseleittain Kuvassa 10. Kuvissa pisteet kuvaavat yksittäisiä mittauksia. Siniset pisteet kuvaavat x-akselin suuntaisia mittauksia, oranssit y-akselin suuntaisia ja violetit z-akselin suuntaisia. Kaikissa suunnissa mitattuna keskiarvo on lähellä nollaa (8, 5, 27). Keskihajonta on vaakasuunnassa suurempaa kuin korkeussuunnassa. Keskihajonta suunnittain on 34, 25, 11.



Kuva 10. Talotekniikka-asennuksien vaihtelu asuntorakennuksessa x, y ja z akselien suuntaisesti. Yksi piste on yksi mittaus. Siniset pisteet kuvaavat x-akselin suuntaisia mittauksia, oranssit y-akselin suuntaisia ja violetit z-akselin suuntaisia.

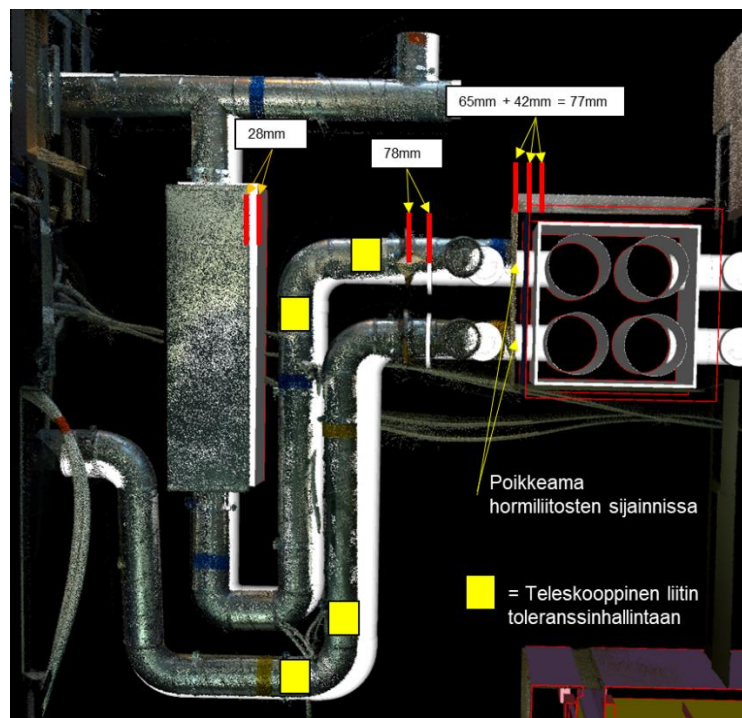
Asuinrakennuksissa asennukset jakautuvat selvästi itsenäisiksi kokonaisuuksiksi asuinhuoneistoittain ja huoneistojen välillä on eroja tarkkuudessa. Kuvassa 11 esitetään vaihtelu huoneistoittain kolmen akselin suuntaisesti. Kuvaajassa vaihtelu on esitetty huoneistoittain aina järjestyksessä x, y ja z akseli, oranssi viiva on keskiarvo. Keskimäinen 50 % havainnoista on laatikon sisällä siten että 25 % havainnoista on keskiarvon ja laatikon yläosan välissä ja 25 % on keskiarvon ja laatikon alaosan välissä. Jäljelle jäävä 50 % havainnoista on viivojen esittämällä osalla ja viivojen päätepisteet ovat äärimmäiset havainnot.



Kuva 11. Vaihtelu asuntokohteessa eriteltynä huoneistoittain. Jokaisen huoneiston osalta poikkeama x, y ja z akselien suuntaisesti. Oranssi viiva kuvaa keskiarvoa ja havaintojen keskimäinen 50 % on laatikon sisällä siten että 25 % on keskiarvon ylä- ja alapuolella.

Kanava-esivalmisteet oli jaettu osamoduuleihin, jotka yhdistettiin työmaalla. Tiettyjen osamoduulien väliin on suunniteltu liukujatko toleranssinhallintakeinona. Merkittävä vaihtelun lähde asennuksissa oli liitos hormielementtiin. Liitos pitää tehdä siihen kohtaan missä kanavalähtö on eikä liitoksen paikkaan voi vaikuttaa työmaalla. Tästä syystä vaihtelu oli suurempaa lähellä hormeja ja pieneni liukujatkojen ansiosta siirryttäessä kauemmas hormista. Huomattavaa on, että pystysuuntainen vaihtelu jatkuu samansuuruisena niin kauan kun tehdään suunniteltu korkeuden muutos, eikä se pienene vaakasuuntaisilla liukujatkoilla. Esimerkki tästä on Kuvassa 12.

Kuvasta nähdään, että hormiin liittyy useita vaihtelumekanismeja: valmistustoleranssi, asennustoleranssi ja suunnitelmaepätarkkuus. Valmistustoleranssi liittyy hormilähtöjen paikkaan hormissa. Lähdöt ovat väärissä paikoissa sekä sivuttaissuuntaisesti että pystysuuntaisesti. Asennustoleranssi tarkoittaa, että hormielementti on asennettu työmaalla väärään paikkaan. Suunnitteluepätarkkuus tarkoittaa, että esivalmistussuunnittelussa on mallinnettu hormi pienemäksi kuin rakennesuunnitelmassa, mikä vaikuttaa komponenttien vaakasuuntaiseen etäisyyteen hormin pinnasta. Kuvassa vaakasuuntaisesti näiden mekanismien kokonaispoikkeama on esitetty säätöpellin paikan poikkeamana, joka on 78 mm. Hormin kokoon ja paikkaan liittyvien poikkeamien summa on 77 mm, mikä selittää käytännössä kokonaan säätöpellin sijaintipoikkeaman. Lopulta säätöpellin jälkeisellä liukujatkolla on saatu vaihtelua vähennettyä siten, että samassa kanavajärjestelmässä myöhemmin tuleva äänenvaimennin on vaakasuunnassa enää 28 mm poikkeavassa sijainnissa.



Kuva 12. Esimerkki vaihtelun lähteistä ja toleranssinhallintakeinoista ilmanvaihdon esivalmisteen asennuksessa.

Aikaisemmassa tutkimuksessa on tunnistettu tässä kohteessa käytettyyn esivalmistusmenetelmään liittyvät kolme vaihtelumekanismia, kiertopoikkeama, etäisyyspoikkeama ja korkopoikkeama. Kiertopoikkeama kuvaa hormielementin kiertymistä pysty akselinsa ympäri. Etäisyyspoikkeama kuvaa eroa kahden liitospisteen etäisyydessä suunnitelman ja asennuksen välillä (esim. hormi ja kph-elementti). Korkopoikkeama kuvaa eroa kahden liitospisteen korkeuden muutoksessa suunnitelman ja asennuksen välillä. Näiden poikkeamatyyppien vahvistamiseksi ja

poikkeaman suuruuden määrittämiseksi tehtiin mittauksia. Mittauksien tulokset on esitetty Taulukoissa 4 ja 5.

Taulukko 4. Etäisyyspoikkeama ja korkopoikkeama seitsemästä asunnosta mitattuna. Viiva tarkoittaa, että mittauksen suorittaminen ei ollut mahdollista.

	Distance deviation [mm]		Elevation deviation [mm]
	X	Y	Z
Apartment 1	59	-14	-83
Apartment 1	30	-30	21
Apartment 2	6	-2	-2
Apartment 2	11	1	-9
Apartment 3	-	-	-
Apartment 4	-31	14	17
Apartment 5	-44	16	7
Apartment 6	19	-9	15
Apartment 6	-38	11	-33
Apartment 7	-8	-1	-2
Apartment 7	-3	-6	-1

Etäisyyspoikkeama ja korkopoikkeamat ovat merkittäviä vaihtelun lähteitä. Niihin sisältyy hormin ja kylpyhuone-elementin valmistustoleranssi sekä asennustoleranssi. Etäisyyspoikkeama ja korkopoikkeama kuvaavat muutosta kahden liitospisteen välisessä etäisyydessä. Tästä syystä poikkeama hormielementin liitoksessa ei johda esimerkiksi korkopoikkeamaan, jos kylpyhuone-elementin valmistuksessa tai asennuksessa on tehty yhtä suuri ja samansuuntainen virhe. Tällaisessa tapauksessa korkopoikkeama on nolla, mutta jokaisella asennetulla kanavalla on korkeussuuntainen poikkeama suhteessa suunnitelmaan.

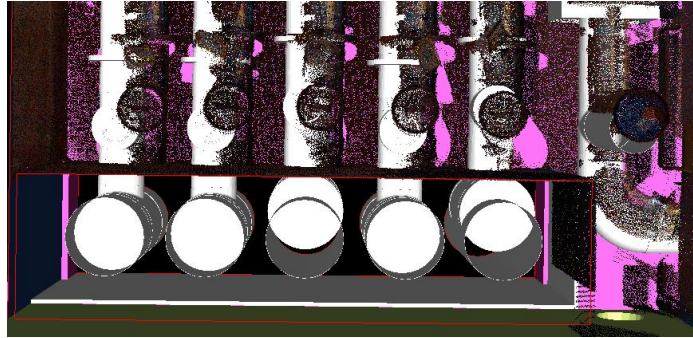
Taulukko 5. Poikkeamat hormin koossa ja sijainnissa, sekä kiertopoikkeama. Viiva tarkoittaa, että mittauksen suorittaminen ei ollut mahdollista.

	Difference in size [mm]		Difference in location [mm]		Rotation [°]
	length	width	X	Y	
Apartment 1	0	3	3	13	0.21
Apartment 2	1	-	5	-5	0
Apartment 3	-	1	6	-27	0.47
Apartment 4	2	2	22	-12	0.26
Apartment 5	2	-	41	31	0.39
Apartment 6	-	2	-5	8	0.43
Apartment 7	-	-	8	7	0.09

Aineiston perusteella betonisten hormielementtien valmistustoleranssi on pieni, eikä tästä aiheudu merkittävää ulkoista vaihtelua tate-esivalmisteille. Asennustoleranssi sen sijaan on suurempi ja vaikuttaa tate-esivalmisteiden asentamiseen ja valmistamiseen. Kiertopoikkeama on aineiston perusteella pieni, eikä vaikuta esivalmistamiseen olennaisesti.

Vaihtelumekanismeja havainnollistetaan Kuvassa 13, jossa esivalmisteet ovat suunnitelman mukaiset (esivalmisteet), hormi on suunnitellun kokoinen ja suunnitellulla paikalla. Kanavat eivät kuitenkaan ole suunnitelluilla paikoilla, koska kanavalähtöjen paikat eivät vastaa suunnitelmaa. Tämä voi johtua joko hormin valmistustoleranssista tai siitä että suunnittelussa elementin

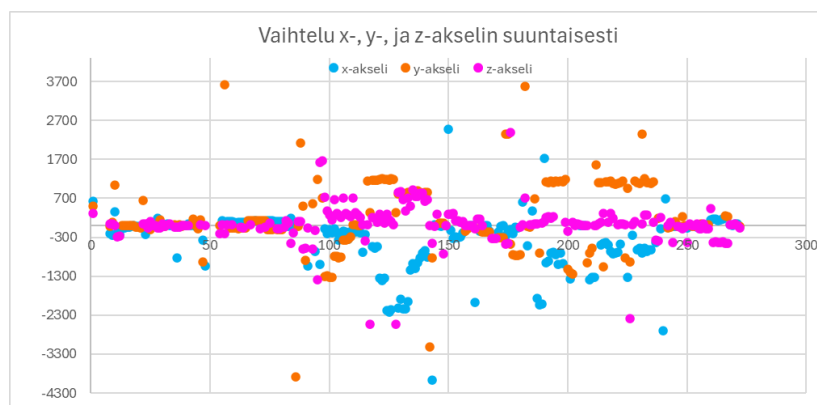
valmistusta kanavalähtöjen paikkaa on muutettu, mutta muutoksia ei ole viety takaisin lvi-suunnittelijalle. Toinen poikkeaman lähde on esivalmistesuunnitelman epätarkkuus. Kuvassa pystysuuntainen poikkeama johtuu epätarkkuudesta kanavanousun sijainnista esivalmistussuunnitelmassa. Kuvassa vaakasuuntaista poikkeamaa ei voida poistaa työmaalla ilman suunnanmuutosta. Kuvassa vaakasuuntainen poikkeama voidaan poistaa liukujatkolla tai muokkaamalla esivalmistetta työmaalla.



Kuva 13. Poikkeama kanavalähtöjen sijainnissa siirtyy suoraan poikkeamaksi kanava-asennuksessa. Vaakasuuntaiset poikkeamat johtuvat poikkeamista kanavalähtöjen sijainneissa. Kuvassa valkea on suunnitelma ja harmaa on asennus.

5.1.3 Sairaala, kaukokylmän tekninen tila

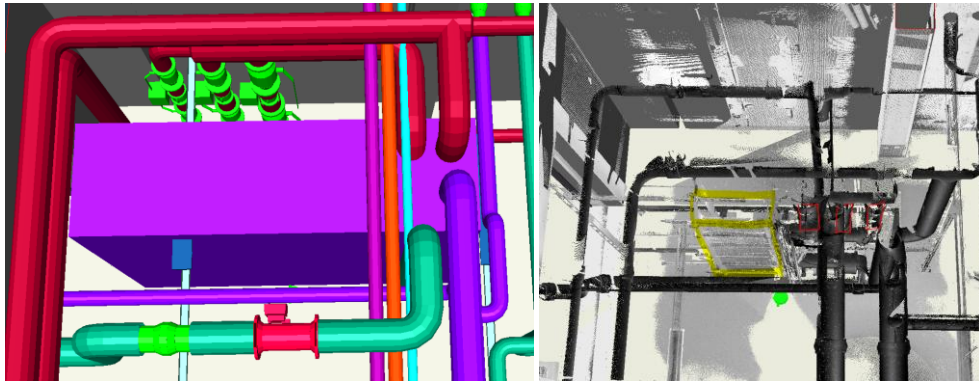
Sairaalakohteesta tässä raportissa esitetään tulokset kaukokylmän teknisen tilan osalta. Vaihtelu oli hyvin suurta johtuen asentajan tekemästä asennussuunnittelusta sekä LVI-suunnitelman tarkkuustasosta. LVI-suunnitelma on esimerkiksi lämmönsiirrinpakettien osalta tilavaraustyyppinen ja tästä syystä asentajan on ollut pakko tehdä muutoksia suunniteltuihin putkireitteihin. Toisaalta putkireittejä ja laitteiden sijainteja on muutettu myös ilman ilmeistä syytä. Kaukokylmän teknisestä tilasta mitattu kokonaisvaihtelu on esitetty Kuvassa 14. Kuvissa pisteet kuvaavat yksittäisiä mittauksia. Siniset pisteet kuvaavat x-akselin suuntaisia mittauksia, oranssit y-akselin suuntaisia ja violetit z-akselin suuntaisia. Mitattu keskiarvo poikkeaa vaakasuunnassa huomattavasti nolasta, mutta pystysuunnassa se on melko lähellä nollaa (-364, 727, 42). Myös keskihajonta on suurta. Keskihajonta suunnittain on 719, 1160, 493.



Kuva 14. Talotekniikka-asennuksien vaihtelu kaukokylmätilassa x, y ja z akselien suuntaisesti. Yksi piste on yksi mittaus. Siniset pisteet kuvaavat x-akselin suuntaisia mittauksia, oranssit y-akselin suuntaisia ja violetit z-akselin suuntaisia.

Kaukokylmän teknisessä tilassa oli kolme tehdasvalmisteista lämmönsiirrinpakettia, jotka sisälsivät viiden verkoston varusteet lukuun ottamatta pumppuja ja energiamittareita.

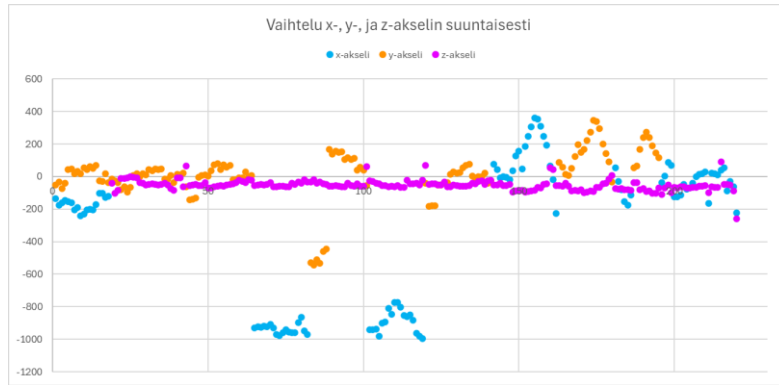
Lämmönsiirtimet ja säätöventtiilit oli esitetty tietomallissa tilavarauksina ja sillä oletuksella, että säätöventtiilit eivät sisälly lämmönsiirrinpakettiin. Tästä syystä lopullisessa asennuksessa on jouduttu muuttamaan putkireittejä vastaamaan lämmönsiirrinpakettien kytkentäpisteitä ja säätöventtiilien sijaintia. Ero suunnitelman ja asennuksen välillä on havainnollistettu Kuvissa 15 ja 16. Kuvista nähdään, että esivalmistuksen lisäksi putkireittejä ja laitteiden sijainteja on muutettu myös ilman näkyvää syytä. Putkireitin muutoksesta esimerkkinä on kuvan alareunassa vaaka-suuntainen vihreä putki, joka oli reititetty n 3,5 m alaspäin kuvan lukusuunnassa sekä punaisella esitetyt kaukokylmän ensiöpuolen putket on reititetty vierekkäin eikä päällekkäin. Vihreään putkeen kiinnitetty punainen energiamittari on siirretty useita metrejä (n. 5,2 m) eri kohtaan ja pumpujen toiselle puolelle. Suunnitelmassa näkyy kuvan yläladassa kolme säätöventtiiliryhmää seinän vieressä. Nämä säätöventtiilit on asennettu osana esivalmistettua lämmönsiirrinpakettia ja niiden sijainnit on osoitettu punaisilla suorakaiteilla asennuksessa. Suuri violetti laatikko suunnitelmassa kuvaa lämmönsiirrintä. Asennettu lämmönsiirrin on korostettu keltaisella. Asennettu lämmönsiirrin on huomattavasti suunniteltua pienempi. Teknisessä tilassa asennukset olivat tarkimmillaan läpivientien läheisyydessä ja reiteillä, jotka johtivat suoraan läpivienteihin.



Kuvat 15 ja 16. Esimerkki poikkeamista kaukokylmähuoneessa. Vasemmassa värikkäässä kuvassa on suunnitelma tietomallin mukaan ja oikealla mustavalkea kuva on asennus. Oikeanpuoleisessa kuvassa keltaisella on korostettu lämmönsiirrin ja punaisella kolme säätöventtiiliä.

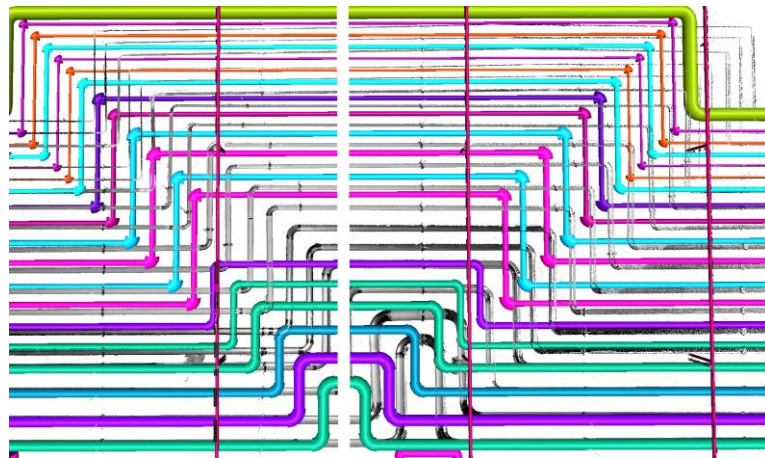
5.1.4 Toimisto

Toimistokohteesta mitattiin runkoputkiston vaakaosuudet yhdestä kerroksesta. Putkisto sisälsi käyttövesiputkia, jäähdytysputkia, lämmitysputkia, sprinkleriputkia ja viemäreitä. Kokonaisuutena putkimatto oli hyvin lähellä suunniteltua sijaintia ja visuaalisesti arvioituna asennus oli tarkka. Mittaus kuitenkin osoitti suurempaa vaihtelua, koska suunnitellulla paikalla oleva putki ei ollut aina sille paikalle tarkoitettu putki. Putkimatto oli suunniteltu asennettavaksi ylimmäksi ja lähelle kattoa. Putket oli asennettu suunniteltua lähemmäs kattoa ja korkeussuuntainen vaihtelu oli pientä. Suuret poikkeamat x- ja y- suunnissa, erityisesti x- suunnassa vaikuttavat merkittävästi keskiarvoon ja keskihajontaan. Nämä suuret poikkeamat johtuvat erosta lämpölaajenemista varten tehdyn lenkin asennuksessa. Mitattu kokonaisvaihtelu on esitetty kuvassa 17. Kuvissa pisteet kuvaavat yksittäisiä mittauksia. Siniset pisteet kuvaavat x-akselin suuntaisia mittauksia, oranssit y-akselin suuntaisia ja violetit z-akselin suuntaisia. Mitattu keskiarvo poikkeaa x-suunnassa huomattavasti nolasta, mutta y- ja z-suunnissa se on melko lähellä nollaa (-328, 15, -52). Vastaavasti keskihajonta x-suunnassa on suurta. Keskihajonta suunnittain on 437, 148, 33.

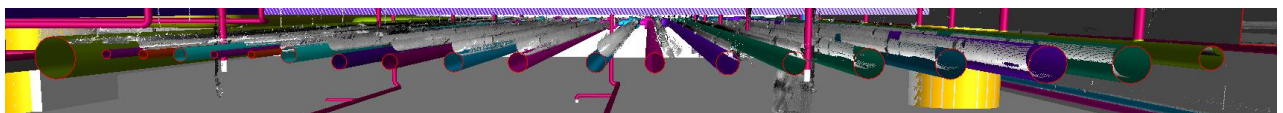


Kuva 17. Talotekniikka-asennuksien vaihtelu toimistorakennuksen runkoputkistossa x, y ja z akselien suuntaisesti. Yksi piste on yksi mittausta. Siniset pisteet kuvaavat x-akselin suuntaisia mittauksia, oranssit y-akselin suuntaisia ja violetit z-akselin suuntaisia.

Sekä x- että y-suunnassa on selvä poikkeama keskiarvosta, joka johtuu Kuvassa 18 esitetystä lämpölaajenemista varten suunnitellusta ja rakennetusta mutkasta ja poikkeamista siinä. X-suunnassa poikkeamia on enemmän, koska asennuksen geometrian takia y-akselin suuntaisia putkia on kaksinkertainen määrä, ja nämä putket myös poikkesivat sijainniltaan eniten. Nämä suuret poikkeamat vaikuttavat myös keskiarvoon ja keskihajontaan. Kuvaajista on nähtävissä, että poikkeamia lukuun ottamatta on saavutettu huomattavasti keskiarvoa ja keskihajontaa parempi asennustarkkuus. Putkilenkille tulevat ja siitä lähtevät putket seurasivat suunnitelmaa paremmin (kuva 19).



Kuva 18. Sijaintipoikkeama putkilenkissä.

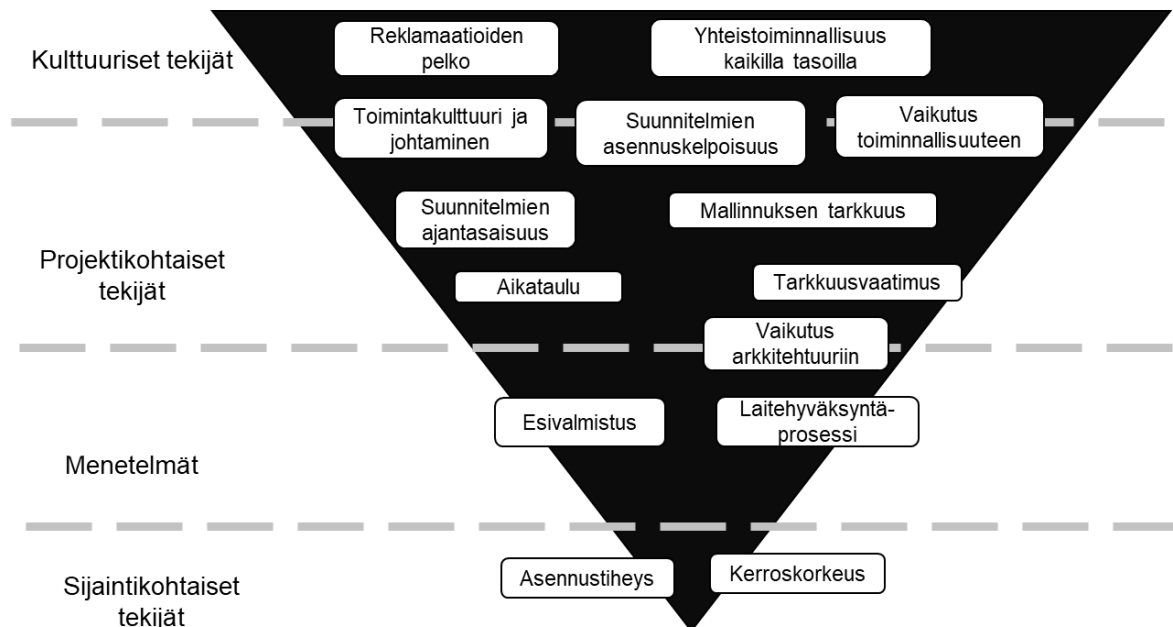


Kuva 19. Esimerkki poikkeamasta runkoputkistossa.

5.2 Vaihtelun suuruuteen vaikuttavat tekijät

Mittausten perusteella vaihtelua oli merkittävästi. Vaihtelun suuruuteen vaikuttavia tekijöitä arvioitiin työpajassa konsortion jäsenten kanssa. Työpajan osallistujille annettiin tehtäväksi listata vaihtelun suuruuteen vaikuttavia tekijöitä. Työpajassa tunnistetut tekijät yhdisteltiin kokonaisuuksiksi. Tämän jälkeen tekijät luokiteltiin kulttuurisiin tekijöihin, projekti-kohtaisiin tekijöihin,

menetelmiin ja sijaintikohtaisiin tekijöihin. Työpajan tulosten perusteella ryhmitelty ja luokiteltu tulos on esitetty Kuvassa 20.



Kuva 20. Työpajassa tunnistetut vaihtelun suuruuteen vaikuttavat tekijät jaoteltuna kulttuurisiin-, projektikohtaisiin- menetelmäkohtaisiin- ja sijaintikohtaisiin tekijöihin.

Kulttuuriset tekijät ovat tekijöitä toiminnan taustalla. Nämä vaikuttavat jollain tavalla kaikkiin projekteihin ja niiden muuttaminen on hidasta ja vaikeaa. Reklamaatioiden pelko vaikuttaa toleranssivaatimuksen asettamiseen. Suunnittelija ei uskalla vaatia suunnitelman noudattamista, koska tietää, että nykyisissä suunnitelmissa ei ole riittävästi tietosisältöä eikä asennettavuustarkastelua tarkan asennuksen mahdollistamiseksi. Vastaavasti tilaaja pelkää, että tarkkuusvaatimus johtaa lisätyölaskuihin, kun suunnitelmaa ei voikaan noudattaa täsmällisesti. Kulttuurisesti on suuri muutos siirtyä asentajan tekemästä toteutussuunnittelusta suunnittelijan tekemään suunnitteluun. Yhteistoiminnallisuus kaikilla tasoilla viittaa ylätasen yhteistyön jalkauttamista asentajatasolle. Esimerkiksi yhteistoiminnallisissa projekteissa yhteistyötä tehdään projektin johtotasolla, mutta asentajatasolla ei välttämättä silti työskennellä eri tavalla kuin normaaleissa projekteissa. Tämä voi näkyä suoraan vaihteluna, jos suunnitelmia ei noudateta.

Osa tekijöistä on kulttuuristen ja projektikohtaisten tekijöiden välimaastossa. Näihin voidaan osittain vaikuttaa projektikohtaisesti. Toimintakulttuuri ja johtaminen vaikuttavat vaihtelun suuruuteen. Jos tarkkuutta vaaditaan, sitä myös saadaan. Suunnitelmia ei voi noudattaa, jos ne eivät ole asennuskelpoisia. Tällöin on myös vaikea perustella, miksi suunnitelmia pitäisi yrittää noudattaa. Asennuksissa poikkeamien hyväksymiseksi painotetaan järjestelmän toimintaa, jos muutos ei vaikuta toimintaa, se hyväksytään helposti. Tällöin kuitenkin jää piiloon ja huomiotta rakentamisen sujuvuus, jota poikkeamat haittaavat merkittävästi.

Projektikohtaiset tekijät ovat sellaisia tekijöitä, joihin voidaan vaikuttaa projektikohtaisesti ja jotka vaihtelevat projektista toiseen huolimatta taustalla vaikuttavista kulttuurisista tekijöistä. Suunnitelmien ajantasaisuus viittaa työmaalla käytössä olevien suunnitelmien ajantasaisuuteen ja siihen nopeuteen, jolla muutokset saadaan työmaan tiedoksi. Jos asennus ja asennustarkastus tehdään eri suunnitelmilla, vaihtelua esiintyy varmasti. Aikataulu liittyy työhön käytettävissä olevaan aikaan ja siihen että vaihtelua hyväksytään enemmän, jos se mahdollistaa aikataulussa

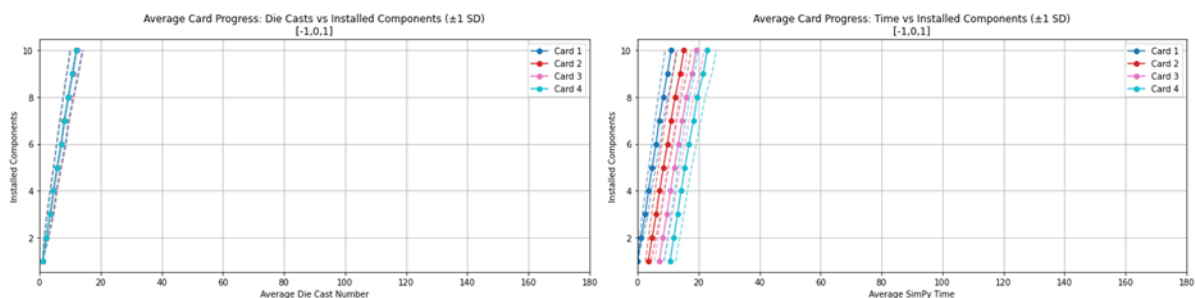
pysymisen esimerkiksi muuttamalla asennusjärjestystä. Mallinnuksen tarkkuus viittaa esimerkiksi kannattukseen joka suunnitelmista puuttuessaan voi vaikuttaa suunnitelmien rakennettavuuteen. Sen lisäksi että suunnitelmaa on mahdollista noudattaa, tulee sen noudattamista vaatia, tarkkuusvaatimus vaikuttaa saavutettavaan lopputulokseen. Vaatimus tarkkuudesta voi tulla varsinaisen toleranssivaatimuksen lisäksi vaikka asennuksen vaikutuksesta arkkitehtuuriin, yksinkertaisimmillaan laitteiden sijainti vaikuttaa alakattojen korkeuteen tai otsapinnan sijaintiin.

Menetelmät vaikuttavat tarkkuuteen. Esivalmistus edellyttää suurempaa tarkkuutta taloudellisen kannattavuuden aikaansaamiseksi. Laitehyväksyntäprosessi viittaa hyväksynnän ajankohtaan ja mahdollisten muutosten viemistä suunnitelmiin. Jos muutoksia ei viedä suunnitelmiin, tulee suunnitelmien tarkasta noudattamisesta mahdotonta.

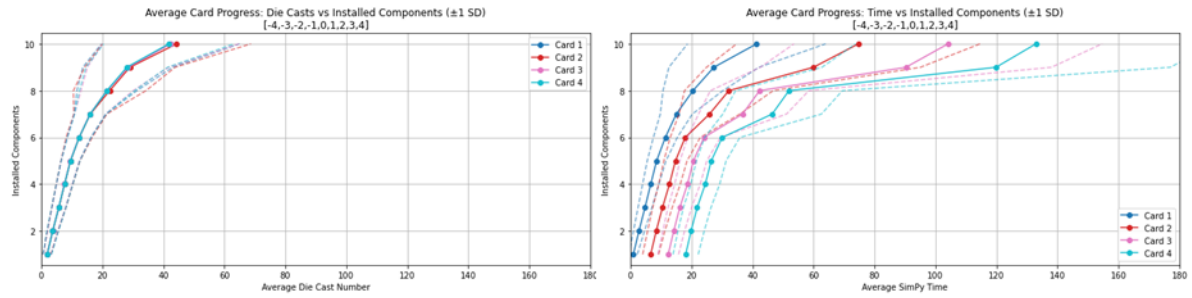
Sijaintikohtaiset tekijät vaikuttavat tarkkuuteen. Samoilla menetelmillä voidaan suuren asennustiheyden tiloissa saada parempi tarkkuus kuin pienen asennustiheyden tiloissa. Asentajat ymmärtävät suurissa ja väljissä tiloissa että poikkeamilla ei ole vaikutusta muihin asennuksiin, jolloin suuremmat poikkeamat hyväksytään helpommin. Kerroskorkeus vaikuttaa suoraan asennustiheyteen ja vastaavasti matalissa tiloissa tulee kiinnittää enemmän huomiota jäljelle jäävään tilaan muille asennuksille ja vapaaseen korkeuteen asennusten alapuolella.

5.3 Simulointi

Vaihtelun merkitystä toisiaan seuraavien työvaiheiden ja koko projektin kannalta tutkittiin simuloimalla neljää peräkkäistä asennussijaintia ja viittä peräkkäistä työryhmää eri suuruisilla vaihteluilla. Simuloinneista tehtiin kaksi eri sarjaa, joista ensimmäisessä simulointi ajettiin yhden kerran. Toisessa sarjassa simulointeja ajettiin 1000 kertaa ja näistä esitetään tuloksena keskiarvot ja keskihajonnat tarvittujen heittojen määrästä ja projektin kokonaiskestosta. 1000 simuloinnin tulokset pienellä ja suurella vaihtelulla on esitetty kuvissa 21, 22, 23 ja 24. Kuvissa nähtävä ero tarvittujen heittojen määrän ja projektin keston välillä johtuu odotusajoista. Työryhmä voi työskennellä ainoastaan, jos sitä edeltävässä puskurissa on työtä vedettäväksi työskentelyalueelle. Pieni lisäys tarvittavassa iteroinnin määrässä kussakin asennussijainnissa kasvaa lopulta pitkiksi odotusajoiksi viimeisissä työvaiheissa. Vaihtelu työvaiheiden kestossa ja tarvittavien heittojen määrässä kasvaa suhteessa sallitun vaihtelun määrään.



Kuvat 21 ja 22. Tuhannen simuloinnin keskiarvo ja keskihajonta vaihtelulla [-1, 0, 1]. Vasemmalla tarvittava heittojen määrä kunkin asennussijainnin valmistumiseksi ja oikealla projektin kokonaiskesto huomioiden työvaiheiden yhtäaikaisuuden.



Kuvat 23 ja 24. Tuhannen simuloinnin keskiarvo ja keskihajonta vaihtelulla [-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4]. Vasemmalla tarvittava heittojen määrä kunkin asennussijainnin valmistumiseksi ja oikealla projektin kokonaiskesto huomioiden työvaiheiden yhtäaikaaisuuden.

6 Yhteenveto ja johtopäätökset

6.1 Talotekniikan modulaarisuus ja esivalmistus

Tilaajan ja rakennuttajan rooli esivalmistepäätöksissä aiheutti keskustelua. Esivalmistevaatiimuksia ei välttämättä esitetä, vaan esivalmisteteet nähdään enemmänkin yhtenä mahdollisuutena, joka voidaan pitää avoimena esimerkiksi myöhempää urakoitsijan kanssa laadittavaa esivalmistusohjelmaan saakka. Mikäli esivalmistusta vaaditaan, voi tästä muodostua tarjousvaltti esivalmistuskäytännöille urakoitsijoille.

Esimerkiksi Kaliforniassa, missä isoissa hankkeissa esivalmistetaan suuri osa talotekniikasta, tilaajat käynnistivät muutoksen edellyttämällä esivalmistusasteen nostoa. He olivat valmiit hyväksymään korkeammat kustannukset ensimmäisessä hankkeessa mutta edellyttivät jatkuvasti alenevia kustannuksia hanke hankkeelta. Esimerkiksi sairaalahankkeissa on saavutettu 20–30 % säästö työtunneissa talotekniikan osalta (Khanzode ym. 2008). Riittävä esivalmistamisen skaalautuvuus helpottaa kustannussäästöjen löytämistä, vaatien useiden hankkeiden sitoutumista esivalmistamisasteen nostamiseen. Mahdollisena haasteena on tunnistettu Suomen (ja läheisten maiden) markkinan rajallinen koko verrattuna esimerkiksi Kaliforniaan, minkä vuoksi aiheesta voisi tehdä markkina-analyysin.

Peltokorven ym. (2019) raportin mukaisesti esivalmistuksen hyötyjä tulisi arvioida mahdollisimman kokonaisvaltaisesti, koska pelkkä rakentamisen kustannus ei välttämättä ole paikallarakentamista halvempi. Tämän tutkimuksen perusteella arvioitavia näkökulmia voisivat olla ainakin:

- Kustannusvaikutus, rakentaminen ja elinkaari
- Aikataulujen läpimenoajan lyhentyminen
- Asennusten vakioituminen ja vaihtelevuuden vähentyminen
- Tehtävien syrjäytyminen työmaalta ja lisätehtävien aiheutuminen työmaalle (lisämitaukset, esivalmisteteiden muokkaaminen työmaalla, ...)
- Tulityövahtien määrä – osa hitsauksista pajalla
- Logistiikkaan, nostoihin ja säilöntään liittyvät rajoitteet runkovaiheessa
- Käyttäjätietokien ajoittuminen riittävän varhain tilamoduulien hankinnan kannalta, onko mahdollista
- Detaljoinnin tarve, esivalmistaminen vs. paikallarakentaminen

Avainurakoitsijoiden (päätoeuttaja, talotekniikka) varhainen hankinta on suositeltavaa, koska nykyisissä ja suositelluissa toimintamalleissa on monia urakoitsijan ohjausta kaipaavia toimintoja. Esimerkiksi urakoitsijat voivat toimia esivalmisteselvityksissä ja -päätoöksissä neuvoa antavana tahona. Esivalmisteteet voivat esimerkiksi vaikuttaa tahtituotannon toteuttamiseen, läpimenoajan lyhentämiseen, jne. Tämän vuoksi toteutusmuodolla on suuri merkitys esivalmisteteiden valitsemisessa.

Suunnittelun ohjauksella ja päätöksentekoprosesseilla on keskeinen merkitys esivalmistamisen onnistumiseen. Esimerkiksi tilaelementtejä koskevia kaluste- ja varustepäätöksiä voidaan joutua tekemään haastavan varhain. Tilaelementtejä koskevissa päätöksissä tulee hankkia riittävät päätöksenteon lähtötiedot varhain, jotta päätökset saadaan jäädytettyä hyvissä ajoin. Aiempien hankkeiden toteutettuja ratkaisuita voidaan mahdollisesti hyödyntää lähtötietoina.

Optimaalinen reitityksen sijoittaminen riippuu kohteen kokonaisuudesta, eikä parhaasta sijoittamistavasta ole helppoa sanoa yhtä parasta tapaa jokaiselle järjestelmälle. Paras reititysratkaisu löytyy yleensä mm. kustannusten, läpimenoajan lyhentämistarpeen, käytettävissä olevan tilan, tuotannon etenemisen optimoinnin, esivalmistamismahdollisuuksien, asennettavuuden, huollettavuuden, ynnä muiden näkökulmien kompromissina.

Talotekniikka-alan työehtosopimuksissa on kehitettävää, jotta talotekniikan esivalmistamisesta hyötyisivät asentajien lisäksi myös yritykset. Tämä nostetaan jatkotutkimusehdotuksena.

Alla olevassa taulukossa 6 on ristiinverrattu esivalmistusten, reititysten, toleranssien, avoimen rakentamisen ja muuntojouston sekä tahtituotannon välisiä näkökulmia vertailumatriisina.

Kaikki valitut näkökulmat kytkeytyvät toisiinsa, ja tässä taulukossa on pohdittu suuntaa antavasti näitä kytköksiä.

Taulukko 6. Esivalmistuksen, reititysten, toleranssien, avoimen rakentamisen ja muuntojouston sekä tahtituotannon välisiä kytköksiä.

	Esivalmistus	Reititykset	Toleranssit	Avoin rakentaminen - muuntojousto	Tahtituotanto
Esivalmistus					
Reititykset	Reitityksiä voidaan esivalmistaa. Reititykset ja esivalmistus tulee yhteensovittaa osana suunnittelua.				
Toleranssit	Toleranssien hallinta on keskeistä esivalmistamisessa – toleranssivaatimukset voivat olla erityisen tiukkoja.	Toleranssienhallinta on keskeistä reititysten asentamisen onnistumiselle ilman törmäyksiä.			
Avoin rakentaminen - muuntojousto	Esivalmistamisessa tulee huomioida kiinteän ja muuntuvan osan jaottelu, koska kiinteä osa rakennetaan ensin.	Reititykset jaetaan kiinteän ja muuntuvan osan reitteihin. Tilojen pinta-asennukset lisäävät joustavuutta.	Muuntojoustossa huomioidaan talotekniikan tilantarve, jonka toteutuminen varmistetaan toleranssienhallinnalla		
Tahtituotanto	Esivalmistamisella voidaan tasata tahtivaunujen kestoja tai siirtää töitä pois tahtituotannosta. Esivalmistusaikataulu ja tahtiaikataulu tulee yhteensovittaa.	Reititysten tuotantoa palvelevalla sijoittelulla voidaan helpottaa tahtituotannon toteuttamista. Tahtituotannon ulkopuolisten reittien (kellari, vesikatto, hormit, ...) asentaminen tulee yhteensovittaa tahtiaikataulun kanssa.	Toimiva toleranssien hallinta takaa osaltaan tahtituotannon sujuvuuden. Heikko toleranssienhallinta vaikeuttaa asentamista, mikä rikkoo tai estää tahdin noudattamisen.	Kiinteän ja muuntuvan osan tahtiaikataulut voidaan laatia erikseen, koska kiinteä osa rakennetaan ensin. Tai kiinteä osa voidaan poistaa tahtituotannosta. Muuntuvan osan tahtituotantoa voi haastaa käyttäjien myöhäinen selviäminen, tai vähäinen tilojen toistuvuus.	

6.2 Avoimen rakentamisen puumalli

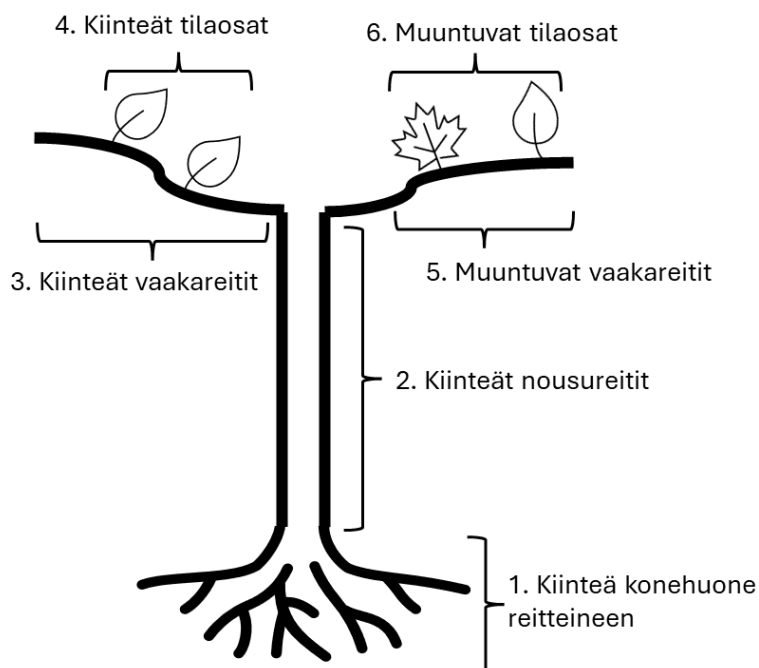
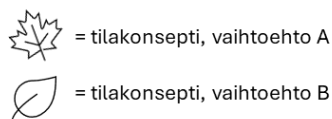
Osana tutkimusta laadittiin talotekniikan avointa rakentamista kuvaava “puumalli” (kuva 23), jolla pyritään havainnollistamaan yksinkertaisella esitystavalla taloteknisten järjestelmien osien kytköstä toisiinsa.

Puumalli kuvaa taloteknisen järjestelmän konehuoneina (juuret), nousureitteinä (runko), kiinteinä ja muuntuvina vaakareitteinä (erilaiset oksat) sekä kiinteinä ja muuntuvina tilaosina (erilaiset lehdet).

Haastattelujen perusteella käyttäjien päätöksenteko painottuu vahvasti tilaosiin (lehtiin), joita kehitetään rakennushankkeen eri vaiheissa. Tilaosiin liittyvien päätösten kytkös puun muihin osiin jää helposti huomaamatta, jolloin suurehkojenkin muutosten saatetaan kuvitella vaikuttavan ainoastaan tilaosiin (lehtiin) ja oksiin (käytäväreitteihin). Huomio pitäisi saada käännettyä muihinkin järjestelmien osiin:

“Yksittäisen tilan muuntaminen muuntojoustosuunnitelmasta ei tässä tapauksessa muuta vain puun lehtiä, vaan kaikki menee uusiksi runkoa ja juuria myöten. Tarvitaan tehokkaampi IV-kone ja enemmän tilaa kanaville.”

Puumalli tarjoa siis yksinkertaisen analogian esimerkiksi havainnollistamaan avoimen rakentamisen talotekniikan vaiheistumista tai suunnitelmamuutoksen vaikuttavuutta. Suunnitelma-
muutosten vaikuttavuutta voidaan esittää tarkemmin esimerkiksi värjäämällä alueita pohjakuviin tai laskemalla kustannusarvioita. Puumallia voitaisiin käyttää esimerkiksi tilaajien ja käyttäjien keskusteluissa sekä opetuskäytössä.



Suunnittelun ja rakentamisen (tahtituotannon) on edettävä avoimen rakentamisen mukaisessa järjestyksessä.

Hankkeissa on raportoitu, että käyttötiloja on rakennettu ennen kaikkia taloteknisiä edellytyksiä.

Tällöin yritetään saada aikaan lehtiä ennen runkoa.

Kuva 23. Avoimen rakentamisen ja taloteknisen järjestelmän pilkkomista kuvaava puumalli.

6.3 Asennustarkkuus

Esivalmistuksen kannalta olennaista on noudattaa tarkemmin suunnitelmia. Suunnitelmasta poikkeamisen syyt voidaan jakaa kahteen alaluokkaan: suunnitelmasta johtuviin syihin, jotka estävät suunnitelman noudattamisen ja suunnitelmasta riippumattomiin syihin, joille ei ole

yleispätevää selitystä. Molemmista alaluokista esitettiin esimerkkejä mitattujen tulosten yhteydessä. Teknisessä tilassa lämmönjakokeskuksiin liittyvät putkitukset erosivat suunnitelmasta, koska suunnitelma ei ottanut huomioon lämmönjakokeskusten esivalmistusta, suunnitelmaa oli mahdotonta noudattaa. Toimistorakennuksen putkilenkin tapauksessa taas suunnitteluista reiteistä poikkeamiselle ei ollut nähtävissä mitään ilmeistä syytä, vaan suunnitelmaa olisi ollut mahdollista noudattaa. Seuraavissa osioissa käsitellään tarkemmin suunnitteluun liittyviä vaihtelumekanismeja sekä suunnitteluun liittymättömiä vaihtelumekanismeja.

Suunnitelmiin liittyvät epätarkkuudet voidaan jakaa kolmeen kategoriaan. Ensimmäinen kategoria on puuttuvat objektit. Tämä viittaa sellaisiin objekteihin, jotka asennetaan, mutta joita ei ole suunniteltu, esimerkiksi kannatusjärjestelmä. Toinen kategoria on poikkeava geometria, mikä tarkoittaa sellaista objektia, joka on suunniteltu, mutta jonka suunniteltu geometria ei vastaa asennettavan objektin geometriaa. Esimerkki tällaisesta objektista on putken kulmaosa, jonka taittosäde voi poiketa suunnitellusta. Kolmas kategoria on puutteellinen rakennettavuus, mikä tarkoittaa sellaista suunnitelmaa, joka ei ole asennettavissa suunnitellulla tavalla. Puutteellinen rakennettavuus voi liittyä kahteen ensimmäiseen kategoriaan, jolloin epätarkkuudet johtavat siihen, että suunnitelmasta tulee mahdoton toteuttaa. Puutteellinen rakennettavuus voi kuitenkin ilmetä myös ilman kahden ensimmäisen kategorian poikkeamia. Esimerkiksi asennuksen tekeminen voi olla mahdotonta, koska tarvittavat työkalut eivät mahdu tilaan. Nämä kolme poikkeamatyyppiä voivat olla puutteita taloteknisissä suunnitelmissa tai rakennesuunnitelmissa.

Talotekniikkasuunnitelmien puutteita selittää osittain tilattava toteutussuunnittelun suunnittelun tarkkuustaso. Toteutussuunnittelun tarkkuustaso on muodostunut historialliselle pohjalle, jossa talotekniikkasuunnittelija tuotti paperisia tasopiirustuksia, joissa esitettiin kaaviomaisesti asennettavat järjestelmät ja niiden sijainnit rakennuksessa. Siirtyminen tietomalliaikaan ei ole merkittävästi muuttanut suunnittelun ja asennuksen suhdetta ajoilta. Suunnittelu tuottaa edelleen ensisijaisesti tasokuvia, joissa tekniikka on esitetty kaksiulotteisesti viivoilla. Suunnittelun tarkkuus tussilla piirtämiseen verrattuna on parantunut ja suunnitelmien yhteensovituksista tehdään huomattavasti enemmän tietomallia hyväksikäyttäen. Työmaalla asentajilla on kuitenkin edelleen vapaus ja tarve tehdä asennussuunnittelu itse ja poiketa joskus jopa merkittävästi suunnittelijan ratkaisusta. Tämä kulttuurinen tausta selittää osaltaan niitä poikkeamia, jotka syntyvät ilman suunnitelmiin liittyvää syytä. Näitä poikkeamia voidaan hyväksyä vedoten asentajan kokemukseen ja siihen että muutokset eivät vaikuta järjestelmän toimintaan.

Tarkkuusvaatimusten asettaminen edellyttää tarkkaa detaljoitua rakennettavissa olevaa suunnitelmaa. Detaljisuunnittelulla on useita kulttuurisia ja teknisiä hidasteita. Tarkan taloteknisen suunnitelman laatimisen hidasteena ovat puuttuvat osakirjastot. Osakirjasto tulisi olla valmistajakohtaisesti kaikista komponenteista siten että osien geometria vastaa täysin asennettavien osien geometriaa. Tällä hetkellä yritykset, jotka tekevät tarkkaa suunnittelua, mallintavat itselleen osakirjaston mittaamalla ostettujen osien geometrian. Osien geometrian vaikutuksesta kertoo se, että kahden eri valmistajan T-haara ilmanvaihtoasennuksessa ei ole keskenään vaihdettavissa. Taloteknisten komponenttien lisäksi detaljoidussa suunnitelmassa tulisi esittää lisäksi kannatussuunnitelma. Kannatukset vaikuttavat rakennettavuuteen ja yhteensovitukseen. Kannatusten suunnittelu vaatii kuitenkin kantavuuteen liittyvää osaamista, jota talotekniikkasuunnittelijoilla ei perinteisesti ole.

Asuntokohde on esimerkki siitä, että tarkka suunnittelu ja valmistaminen ei poista vaihtelua kokonaan. Toleranssin hallinnan näkökulmasta tämä tarkoittaa, että jäljelle jäävä sallittu vaihtelu tulee kompensoida hallitusti ja suunnitellusti. Ja tämän mahdollistamiseksi ulkoisen vaihtelun mekanismit ja suuruudet tulee olla tiedossa.

Tässä raportissa esitetty simulointi osoittaa, että vaihtelun minimoimisella on hyötyjä rakentamisen prosessin kannalta. Työvaiheiden keston vakiointi edellyttää vaihtelun hallintaa ja näkyy sekä aikatauluvarmuutena että kokonaisaikataulun mahdollisena lyhentymisenä. Näiden hyötyjen aikaansaaminen vaatii suuria muutoksia koko rakentamiseen. Kuka tilaa tarkemman suunnittelun, kuka tekee tarkemman suunnittelun, kuka ylläpitää osakirjastoja ja miten rakennustyöstä saadaan asennustyötä?

6.4 Talotekniikan toleranssivaatimukset

Tällä hetkellä talotekniikka-asennuksille ei ole yleisiä toleranssivaatimuksia. Tarkkuusvaatimukset tai niiden puute on projektikohtaisesti päätettävissä. Aikaisemman tutkimuksen perusteella asennustarkkuuteen ja suunnittelutarkkuuteen panostetaan yhteistoiminnallisissa projekteissa ja esimerkkejä asennustarkastuksista on raportoitu. Luvussa 4.3 raportoidut mittaustulokset kuitenkin osoittavat, että asennuksien tarkkuudessa on suurta vaihtelua. Asennustarkkuuden parantamiseksi tulee asettaa toleranssivaatimuksia ja valvoa näiden vaatimusten toteutumista. Tulosten perusteella voidaan myös todeta, että talotekniikka-asennuksien sijaintitarkkuuden parantaminen ei onnistu pelkästään vaatimalla talotekniikka-asentajalta tarkempaa työtä. Tarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä on useita.

Toleranssivaatimukset voivat perustua koko alaa koskeviin standardeihin, määräyksiin tai projektikohtaisiin ohjeisiin. Toleranssivaatimuksien tulee olla perustellut siten, että vaatimuksia noudattamalla aikaansaadaan halutulla tavalla toimiva lopputulos sujuvasti ilman että vaaditaan liiallista tarkkuutta. Lisäksi toleranssivaatimuksen tulee huomioida vaatimusta toimeenpanevan prosessin kyvykkyys. Vaatimus, joka on mahdoton täyttää, ei paranna lopputulosta. Vastaavasti talotekniikka-asennuksissa toleranssivaatimuksia tulee arvioida näistä kolmesta näkökulmasta; 1) asennettu järjestelmä toimii halutulla tavalla (halutut sisäolosuhteet, suunnitellut virtaamat, ei melua), 2) suunnitteluratkaisua ei tarvitse muuttaa asentamisen mahdollistamiseksi (käytössä olevat menetelmät riittävät aikaansaamaan halutun tarkkuuden) ja 3) rakentaminen on sujuvaa (vaadittu tarkkuus ei vaadi kohtuuttoman suurta työpanosta eikä toisaalta mahdollista vaihtelua joka estää seuraavaa työvaihetta noudattamasta suunnitelmaa).

Mittausten perusteella voidaan esittää projektikohtaisesti kuhunkin kohteeseen sopiva toleranssivaatimus. Lähtökohtana analyysissä on, että mitattu tarkkuus voidaan aikaansaada vastavissa projekteissa. Analyysia varten aineistosta poistetaan suuret poikkeamat, jotka selvästi voitaisiin poistaa toleranssivaatimuksilla. Esimerkiksi toimistorakennuksen tapauksessa on oletettavaa, että kuvassa 18 näkyvä asennus olisi voitu tehdä yhtä tarkasti kuin sitä edeltävät ja seuraavat asennukset. Projektikohtaiset prosessikyvykkyudet ja niiden perusteella määritellyt toleranssivaatimukset on esitetty taulukossa 7. Prosessikyvykkyys ja toleranssivaatimus on saatu poistamalla yhden keskihajonnan päässä keskiarvosta olevat havainnot alkuperäisestä datasta ja määrittämällä tämän jälkeen keskihajonta datalle, josta äärimmäiset havainnot on poistettu. Toleranssivaatimus on saatu valitsemalla prosessikyvykkyudesta vaakasuunnassa pienempi arvo ja korkeussuunnassa prosessikyvykkyys on yhtä suuri kuin toleranssivaatimus.

Taulukko 7. Toleranssivaatimukset mitatun prosessikyvykkyyden perusteella projekteittain.

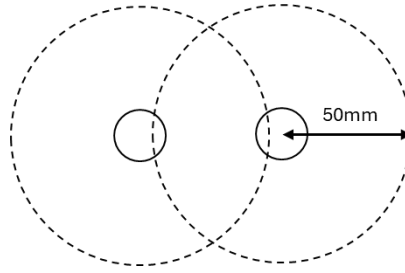
	Keskihajonta eli prosessikyvykkyys			Toleranssivaatimus vaakasuunnassa	Toleranssivaatimus korkeussuunnassa
	X	Y	Z		
Asunto	15	13	5	+/- 13mm	+/- 5mm
Toimisto	65	45	15	+/- 45mm	+/- 15mm
Monitoimirakennus	51	61	44	+/- 51mm	+/- 44mm
Sairaala	328	534	180	+/- 328mm	+/- 180mm

Toleranssivaatimusten määrittämiseen mitatun prosessikyvykkyyden perusteella liittyy ongelmia. Missään mitatussa kohteessa ei ole ollut käytössä toleranssivaatimuksia. Tällöin mitattu tarkkuus ei kerro siitä, mihin prosessi pystyy parhaimmillaan, vaan siitä mihin prosessi pystyy ilman vaatimuksia. Suuri vaihtelu kohteiden välillä on myös osoitus siitä, että samoilla tai samankaltaisilla menetelmillä voidaan päästä hyvin erilaiseen tarkkuuteen. Asuntokohteessa tilaa asennuksille oli niin vähän, että muiden kohteiden keskihajonta ei olisi ollut mahdollinen muuttamatta suunnitteluratkaisua.

Mittausten perusteella, satunnaisuuden takia, x- ja y-akseleille saadaan eri suuruiset poikkeamat ja prosessikyvykkyydet. Ei kuitenkaan ole perusteltua olettaa, että toleranssivaatimuksen tulisi olla suuntariippuvainen vaakatasossa. Tulokset antavat viitteitä siitä, että ahtaammissa tiloissa on tarpeen saavuttaa ja voidaan saavuttaa korkeampi tarkkuus. Korkeuspoikkeaman osalta parempaa tarkkuutta selittää se, että viitepiste (katto) mittausta varten on lähempänä, ja korkeussuunnassa tilaa on yleensä vähemmän käytettävissä kuin vaakasuunnassa.

Esimerkit ja mittaukset osoittavat, että joissain tapauksissa asentaja ei voi vaikuttaa poikkeaman suuruuteen. Esimerkiksi kanava tulee asentaa hormilähtöön kiinni, jolloin hormilähdön paikka määrittää kanavan poikkeaman. Tällöin ratkaisuna voi olla asettaa toleranssivaatimukset osakohtaisesti ja sallia suurempi poikkeama läpivienneissä ja hormiliitoksissa. Kaukokylmän teknisen tilan osalta asentajalta voidaan vaatia huomattavasti tarkempaa asennusta, kuin mittaus osoittaa. Toimisto ja monitoimirakennuksen kanssa vertailukelpoinen tarkkuustaso on saavutettavissa, koska työmenetelmät ovat samat. Teknisten tilojen asennustarkkuuden parantamisen edellytyksenä on kuitenkin suunnitelman tarkkuustason ja rakennettavuuden parantaminen.

Tarkkuusvaatimuksena taso +/- 50 mm vaikuttaa helposti saavutettavalta ja voi olla toleranssivaatimuksena liian löysä. Tällainen vaatimus antaisi perusteen vaatia suurien poikkeamien korjausta ja voisi siksi parantaa asennustarkkuutta sekä poistaa suuriin poikkeamiin liittyviä haittoja. Toisaalta tämän tasoinen toleranssivaatimus asettaa enemmän vaatimuksia suunnittelulle ja avaa mahdollisesti tilaisuuden todeta suunnitelma asennuskelvottomaksi koska kahden laitteen välinen tila ei mahdollista erisuuntaista ja yhtäaikaista suurimman sallitun vaihtelun toteuttamista. Ongelma on havainnollistettu kuvassa 24.



Kuva 24. Kahden putken välinen etäisyys ei mahdollista +/- 50 mm vaihtelua, molemmat asennukset voivat olla vaatimuksen täyttäviä ja silti törmätä.

6.5 Talotekniikan modulaarista rakentamista tukeva rakentamishankeprosessi

Tutkimuksen lopputuloksena kuvassa 25 esitetty prosessikaavio, jossa on esitetty suosituksia rakennusvaiheittain ja erilaisista tutkimuksen kannalta keskeisistä näkökulmista. Keskeisiksi näkökulmiksi valikoitui päätöksentekoprosessi, yhteistyö, talotekninen suunnittelu, avoin rakentaminen sekä muuntojousto, esivalmistus ja toleranssit. Kaavio luotiin tutkimuksen empiirisen osion sekä työpajoista saadun ohjauksen pohjalta. Lisäksi vaikutteita otettiin mm. muuntojoustavuuden tutkimuksesta (Saari 2001, Saari ym. 2007), SUKE-mallista (Kruus ym. 2006; Kiiras ym. 2007), Suunnitteluprosessi 2.0-mallista (Seppänen ym. 2024), SKOL-mallista (Järvinen 2018; Järvinen 2021) ja aiemmassa TH5-tutkimuksessa laaditusta mallista (Keskiniva ym. 2024)

Toteutus suunnittelu ja rakentaminen on esitetty samassa laatikossa, koska ne usein limittyvät hankkeissa. Näin kaavioon on saatu toteutus suunnittelun ja rakentamisen tehtäviä kronologisesti limitettynä.

Hankevaiheet	Hankesuunnittelu		Ehdotussuunnittelu		Yleissuunnittelu		Toteutussuunnittelu + rakentaminen	
PÄÄTÖSPROSESSI		Hanke-suunnitelman hyväksyminen.			Suunnitteluratkaisuiden valinta	Yleissuunnitelmien jäädyttäminen ja lukitseminen porrastetusti. Hold-alueiden tunnistaminen ja niiden edistäminen. Kiinteää osaa toteutusvalmiuteen.		Toteutussuunnitelmien jäädyttäminen ja lukitseminen porrastetusti. Lähinnä muuntuva osa.
Yhteistyö Tilaaaja, käyttäjä, toteutusorganisaatio	Hankkeen tavoitteet	Yleiset suunnittelulinjat ja käyttäjävaatimukset	Integrointisuunnitelman laadinta	Ehdotussuunnitelmien läpikäynti ja kehittäminen, käyttäjätestaus	Toiminnan kuvaukset ja käyttäjävaatimusten tarkennus	Tilakaaviot ja tilojen sijoittelu	Yleissuunnitelman / tilakonseptien "käyttäjättestaus". Myös kiinteitä tiloja. + niiden kehittäminen	Tarvittaessa muuntuvan osan toteutustason "käyttäjättestauksia"
TALOTEKNINEN SUUNNITTELU	Hankkeen tavoitteiden määrittäminen ja suunnittelun vaatimukset talotekniikan osalta		TATE-järjestelmävaihtoehtotarkastelut		Kiinteän peruosan TATE- järjestelmäsuunnitelmat (reititykset, laitteistot, tilavaraukset)		Vaiheittain muuntuvan osan toteutussuunnitelmien laadinta, Laitehyväksynnät, detaljointi	
		Tilavaatimusten määrittäminen TATE:n osalta	Urakoitsijan antama kustannus-, asennettavuus- ja tuotetietous toteutusmuodon mukaisesti					
AVOIN RAKENTAMINEN MUUNTOJOUSTO		Muuntojoustosuunnitelma (täydentyy ehdotussuunnittelussa)			Suunnitelmapaketin jako + muuntuvan osan tilakonseptit	Kiinteän peruosan suunnitelmia, detaljointi	Kiinteän osan suunnitelmat (detaljointi) + rakentaminen + Muuntuvan osan toteutussuunnitelmat(detaljointi)	Muuntuvien osien rakentamisen aloittaminen
	Joustava tilaohjelma		Vaihtoehtoisten talotekniikkakonseptien hahmottelu		Konehuoneiden, kiinteiden nousuhormien ja kiinteiden kerrostasojen vaakareittien suunnittelu		Vaiheittain muuntuvan osan TATE-ratkaisujen suunnittelu (käytävät, muuntuvat tilat)	
ESIVALMISTUS		Esivalmistusselvitys: onko esivalmisteista hyötyä, esivalmisteiden järjestelmien analysointi ratkaisuna, tavoitteet			Esivalmistusohjelma: määritetään käytettävät esivalmisteet, aloitetaan esivalmistajien valinta	Esivalmistesuunnitelmat (detaljointi) + esivalmisteiden asennus <<tilaelementit pienet pajaesivalmisteet>>		
							Kiinteän osan esivalmisteet	Muuntuvan osan esivalmisteet
TOLERANSSIT	Mitä tarkkuusvaatimuksia seuraa aikataulusta, esivalmisteiden käytöstä tai muuntojoustosta? Yleiset tarkkuusvaatimustasot: runko, hormit, esivalmisteet, paikalla rakentaminen.				Tate-esivalmisteisiin liittyvien rakennus- ja laiteosien toleranssien tarkentaminen	Mittaussuunnitelma: Toleranssien noudattamisen varmistaminen mittaamalla ja raportointi	Toteutussuunnittelussa riittävät suojaetäisyydet ja tilavaraukset, toleranssivaatimukset huomioiden. Detaljointi: Asennuskohtaiset valmistus ja asennustoleranssit. Toleranssien yhteensovitus, toleranssinhallintakeinot. Varmistetaan toleranssien täyttyminen mittaussuunnitelman mukaisesti. Dokumentoidaan poikkeamat ja niiden juurisyyt. Poistetaan ongelma tulevista asennuksista.	

Kuva 25. Tutkimuksessa kehitetty kaavio, jossa on sovitettu aikajanelle yhteen rakennushankkeen vaiheet ja esivalmistamisen sekä toleranssien kannalta olennaisia näkökulmia.

Seuraavaksi kuvataan tarkemmin kaavion sisältö ja perustelut suosituksille.

Hankesuunnitteluvaihe

Hankesuunnittelussa tehdään tyypillisiä hankesuunnitteluun kuuluvia päätöksiä, hankkeen tavoitteita ja suuntaviivoja määrittäen.

Esivalmistusselvitys voidaan tehdä hankesuunnittelun aikana. Building 2030 -tutkimuksessa ”Talotekniikan esivalmistus: esteet, mahdollistajat ja prosessi” (Peltokorpi ym. 2018) on suositettu, että tilaaja hankkii selvityksen taloteknisten järjestelmien esivalmistuksesta ja niiden hyödyistä. Tässä yhteydessä määritellään mahdolliset esivalmisteet ja arvioidaan niiden hyödyt. Esivalmistuksen vaikutuksen arviointiin on laadittu ohjeistus toisessa Building 2030 -raportissa ”Esivalmistuksen vaikutusten arviointi” (Peltokorpi ym. 2019). Tarvittaessa esivalmistusselvityksen tekemiseen voidaan hankkia konsultointia. Esivalmistevalinnat tehdään myöhemmin yleisuunnittelussa valmistuvassa esivalmistusohjelmassa. Esivalmistusselvitys siis alustaa myöhemmän esivalmisteohjelman laatimista.

Muun muassa tiukka aikataulu, muuntojoustovaatimukset ja esivalmistaminen voivat asettaa tiukkojakin vaatimuksia toleransseille. Yleiset tarkkuusvaatimustasot voidaan asettaa jo hankesuunnitteluvaiheessa mm. rungolle, hormeille, esivalmisteille ja paikalla rakentamiselle.

Käyttäjyhteistyön organisointiin tulee panostaa. Hankkeen alkupäässä keskiössä on arvon määrittäminen. Toimiva käyttäjyhteistyö tukee päätöksentekoprosessia, antaen ja jäädyttäen lähtötietoja suunnittelua varten. Riittävällä käyttäjyhteistyöllä pyritään kuulemaan käyttäjiä ja toisaalta minimoimaan muutostarpeita suunnittelun edetessä. Käyttäjyhteistyössä on hyvä tunnistaa myös päätöksenteon tarvitsemat lähtötiedot, joita voivat olla esimerkiksi suunnittelijan laatimat luonnostelmat tai selvitykset.

SUKE-mallin mukaisessa avoimessa rakentamisessa laaditaan joustava tilaohjelma osana hankesuunnittelua. Joustava tilaohjelma ohjaa päätöksentekoa rajaamaan tulevien tilojen käyttötapaauksia tietyn vaihteluvälin sisään. Joustavan tilaohjelman lukitsemisen jälkeen ohjelmasta poikkeavien tilankäyttötapauksien tuomista suunnitelmiin tulisi välttää, koska tämä johtaa suunnitelmamuutoksiin. Mitä myöhemmin hanketta tilankäyttötapauksia halutaan muuttaa ohjelmasta poikkeavaksi, sitä suurempi on muutoksen haitallinen vaikutus mm. kustannuksiin ja aikatauluun. Joustava tilaohjelma mahdollistaa varhaisten tavoitehinta-arvioiden laskemisen, mikä tukee päätöksentekoa kustannusohjauksen kautta. Tavoitehinta-arvioiden laskemiseen on Suomessa saatavilla kaupallisia ohjelmistoja.

Hankesuunnitteluvaiheessa voidaan myös aloittaa muuntojoustosuunnitelman laatiminen, jossa kuvataan mm. tarkempia tavoitteita ja rajauksia kiinteille ja muuntuville osille. Muuntojoustosuunnitelma ohjaa hankeosapuolia pohtimaan tarkoituksenmukaista muuntojoustoa jo hankesuunnitteluvaiheessa. Muuntojoustosuunnitelman laatiminen auttaa myös rajaamaan ja kohdistamaan vaihtoehtoisia tilankäyttötapoja tiloittain ehdotussuunnittelun aikana. Esimerkkinä tietty opetusluokka voitaisiin haluta vaihtaa elinkaaren aikana ATK-luokaksi, mutta ei laboratorioksi.

Tämän raportin suosituksessa muuntojoustosuunnitelma on täydentyvä dokumentti, koska muuntojoustoön liittyviä suurempia päätöksiä saatetaan tehdä ainakin tilakaavioiden ja muuntuvan osan tilakonseptien laatimiseen saakka. Muuntojoustosuunnitelma saattaa siis elää ehdotussuunnittelun aikana. Muuntojoustosuunnitelman laatiminen helpottaa mm. varhaisten esivalmistepäätösten tekemistä, koska esimerkiksi kylpyhuone-elementti saattaa sopia paremmin

kiinteään osaan, kun taas paikalla rakennettuna kylpyhuone voitaneen sijoittaa vaihtoehtoisesti muuntuvaan osaan.

Ehdotussuunnittelu

Ehdotussuunnittelussa keskeistä on tuottaa vaihtoehtoisia yleisratkaisuja rakennuksen muodosta ja sijoittumisesta tontille vaatimusten rajoissa. Ehdotussuunnittelun lopuksi valitaan paras kriteerit täyttävä ratkaisu yleissuunnittelua varten. Taloteknisen suunnittelun kannalta keskeistä ehdotussuunnittelussa on vaihtoehtoisten talotekniikkakonseptien ja järjestelmävaihtoehtojen tarkastelu ja hahmottelu.

Esivalmistusohjelmassa määritetään esivalmistettavat rakennusosat kohteen erityispiirteet ja nykyinen markkinatilanne huomioiden. Esivalmistusohjelma on hankkeen aikana täydentyvä dokumentti. Pääpiirteittäin esivalmistusohjelma tulee laatia hyvissä ajoin hanketta. Building 2030 -raportissa esivalmistusohjelma suositetaan laadittavaksi yleissuunnitteluvaiheessa.

Muun muassa talotekniikkaa sisältäviä tilamoduuleita (KPH-elementit, ...) asennetaan jo runkovaiheessa, minkä vuoksi tällaiset esivalmistepäätökset, valinnat ja suunnittelu tulee tehdä mahdollisimman varhain. Tämän tutkimuksen suosituksessa esivalmistusohjelmaa aloitetaan laatimaan jo ehdotussuunnitteluvaiheessa, vaihtoehtoisten ehdotussuunnitteluratkaisuiden sallimissa rajoissa. Aiemmin laadittu esivalmistusselvitys tukee esivalmistusohjelman laatimista.

Esivalmistusohjelman avulla varmistetaan, että suuret ja useita käyttäjäpäätöksiä sisältävät runkovaiheen tilaelementitkin saadaan suunniteltua, hankittua, tuotettua ja asennettua aikataulussa. Tähän liittyen esimerkiksi KPH-elementin kalusteiden ja varusteiden käyttäjäpäätöksien ajoittaminen riittävän varhaiseksi todettiin haastatteluissa haastavaksi ainakin sairaalahankkeissa.

Avainurakoitsijoiden (pää toteuttaja, talotekniset urakoitsijat) varhainen hankinta on suotavaa, jotta varmistetaan mm. riittävä esivalmistusosaaminen ja kustannustietous esivalmistusohjelman laatimiseksi. Urakoitsijoilla saattaa olla vahva tahtotila tiettyjen esivalmisteiden käyttämiseen mm. tuotannon sujuvoittamiseksi, mikä perustelee myös varhaista urakoitsijahankintaa.

Integroitisuusunnitelma viittaa integroiduista projektitoteutuksista lähtöisiin olevaan toimintamalliin, jossa erityisesti yhteistoiminnallisten hankkeiden osapuolet tuodaan yhteen tekemään töitä hankkeen parhaaksi mm. yhteisellä sopimuksella ja toimintamalleilla.

Yleissuunnittelu

Yleissuunnittelussa kehitetään ja tarkennetaan valittua ehdotussuunnitteluratkaisua. Talotekniikan kannalta keskeistä on mm. määrittää talotekniset järjestelmät, tilat, pääkanavat ja putkireitit sekä laatia talotekniikkaselostus ja sitä täydentävä järjestelmäselostus. Huomioitavia seikkoja ovat mm. talotekniikan ja muiden suunnitelmien ja hankintojen paketointi, talotekniikan kiinteän ja muuntuvan osan jaottelu sekä kiinteän osan suunnittelu toteutustasolle. Kiinteä osa rakennetaan ensimmäisenä ja limitettynä toteutussuunnittelun kanssa, minkä vuoksi sen tarkka suunnittelu suositellaan aloitettavaksi yleensä hyvissä ajoin yleissuunnittelun loppuvaiheessa tai erillisessä yleissuunnittelun täydennysvaiheessa. Kiinteän osan toteutussuunnittelu voi jatkua toteutussuunnitteluvaiheessa porrastettuna.

Talotekniikan esivalmisteisiin liittyvät rakennus- ja laiteosien toleranssit tarkennetaan. Toleranssien noudattamisen varmistamista varten laaditaan mittaussuunnitelma.

SUKE-mallin mukaisesti yleissuunnitteluvaiheessa laaditaan sopiva määrä muuntuvan osan tilakonsepteja, noudattaen joustavan tilaohjelman lukuarvoja (ilmanvaihtuvuus, neliöt, ...). Tilakonsepteissa pyritään toteutussuunnitelmatasoon jo tässä vaiheessa. Tilakonseptien avulla mitoitetaan kiinteä perusosa. Esimerkiksi, jos tiettyyn tilaan on laadittu kolme erilaista tilakonseptia, tulee kiinteän osan pystyä vastaamaan kaikkien näiden konseptien taloteknisiin tarpeisiin.

Yleissuunnittelussa voi tapahtua yleissuunnitelman ja tilakonseptien käyttäjätestausta, joilla todennetaan ja kehitetään ratkaisujen toimivuutta. Tilakonsepteja voidaan käyttäjätestata virtuaalitodellisuudessa tai rakennettujen mallitilojen muodossa. Esimerkiksi vanerista rakennettu tila auttaa hahmottamaan tilan kolmiulotteisuutta. Myöhemmin hankkeessa mallitila voidaan rakentaa myös oikeilla tuotteilla. Käyttäjätestaukset ja kiinteän osan suunnittelu tulee ajoittaa siten, että tilakonseptien kehittämisestä seuraisi mahdollisimman vähän iterointia kiinteän osan suunnitelmiin. Ideaalitulanteessa prosessi voisi edetä esimerkiksi seuraavasti:

Hankesuunnittelu

- Joustava tilaohjelma

Yleissuunnittelu

- tilakaaviot
- tilakonseptien laadinta (kiinteät + muuntuvat tilat)
- VR
- tilakonseptien kehittäminen (kiinteät + muuntuvat tilat, karkea kehittäminen)
- vanerimallitilat (kiinteät + muuntuvat)
- mallitilojen käyttäjätestaus (kiinteät + muuntuvat)
- tilakonseptien kehittäminen (kiinteiden reittien talotekniikka lukkoon, kiinteät tilat lukkoon)
- kiinteän osan suunnittelu kiinteän osan rakentamista varten

Toteutussuunnittelu

- kiinteän osan rakentaminen porrastettuna
- mallitilat oikeilla tuotteilla (muuntuvat)
- tilakonseptien kehittäminen (muuntuvat tilat, lähinnä pieniä tuotevaihtoja)
- muuntuvan osan rakentaminen porrastettuna

Sairaalahankkeissa myös tahtituotannon aikamääreitä on kokeiltu mallitilan rakentamisen yhteydessä.

Yleissuunnitteluvaiheen esivalmistesuunnittelussa kiinnitetään erityistä huomioita rungon ja kiinteän osan rakentamisen mahdollistamiseen. Suuret rungon ja kiinteän osan esivalmisteet asennetaan limitettynä toteutussuunnittelun kanssa. Esimerkiksi tilaelementit asennetaan jo rungon yhteydessä. Lisäksi suuria ja vaikeasti haalattavia esivalmisteita voidaan tarvittaessa nostaa varastoon rungon sisään rungon ollessa vielä auki. Tiettyjä pienempiä kiinteän osan esivalmisteita voidaan asentaa ja täten detaljoida myöhemmin.

Esivalmistesuunnittelu edistyy yleissuunnittelun ja kiinteän osan toteutussuunnittelun etene-
misen sekä yleissuunnitelman ja tilakonseptien testausten asettamassa tahdissa.

Tahtituotannosta voidaan laatia alustava tahtikonsepti urakoitsijan ja/tai osaavan rakennuttajan
toimesta. Tahtikonseptissa ennakoidaan tahtituotannon tarpeita. Tahtituotannon ennakkoedel-
lytykset varmistetaan suunnittelun aikatauluttamisessa ja paketoinnissa. Tahtikonseptissa tun-
nistetaan sellaiset rakennusvaiheet ja lohkot, jotka valmistetaan tahtituotantona. Esivalmista-
misen näkökulmasta tunnistetaan mahdollisuus sujuvoittaa tai mahdollistaa tahtituotanto mm.
siirtämällä tahtiin sopimattomia työsuorituksia pois kohteesta. Avoimen rakentamisen näkökul-
masta kiinteän ja muuntuvan osan tahtituotanto eriytetään, mikä tulee huomioida kiinteän ja
muuntuvan osan rajauksessa. Talotekniikan palvelualueiden soveltuvuus (esim. hajautettu vs.
keskitetty ilmanvaihto) tahtituotantoon tulee myös huomioida.

Kiinteän osan tahtiaikataulu laaditaan kiinteän osan suunnitelmien valmistumisen myötä.

Toteutussuunnittelu ja limitetty rakentaminen

Toteutussuunnitteluvaiheessa rakennetaan rakennuksen runko ja kiinteät osat lohkoittain. Kiin-
teän osan esivalmistaminen voi olla myös pienimuotoisempaa, kuten esimerkiksi yhteiskannak-
keiden valmistamista urakoitsijan työpajalla.

Toteutussuunnittelussa ja rakentamisessa huomioidaan riittävät suojaetäisyydet ja tilavarauk-
set toleranssivaatimukset huomioiden. Lisäksi huomioidaan asennuskohtaiset valmistus- ja
asennustoleranssit, sekä toleranssien yhteensovittaminen ja toleranssinhallintakeinot.

Toteutussuunnitteluvaiheessa tilojen käyttäjien tarkentuessa laaditaan muuntuvien osien toteu-
tussuunnitelmat. Toteutussuunnitelmia voidaan vielä käyttäjätestata aiemmin lukitun ja tuotan-
tovaiheessa olevan kiinteän osan sallimissa rajoissa. Toisin sanoen kiinteän osan muuttumista
tulee välttää.

Esivalmistesuunnittelun näkökulmasta toteutussuunnitteluvaiheessa laaditaan erityisesti
muuntuvien osien esivalmistesuunnitelmia, mutta myös vielä rakentamatta olevien kiinteiden
osien esivalmistesuunnittelua voidaan tehdä. Esimerkiksi pienimuotoista pajaesivalmistusta
ajatellen voidaan laatia detaljointeja sekä kiinteälle että muuntuvalle osalle.

Muuntuvaan osaan kuuluu varsinaiset muuntuvat käyttötilat ja samoin siihen voi kuulua myös
käytävän talotekniikkaa (riippuen kohdekohtaisesta kiinteän ja muuntuvan osan rajanvedosta).

Muuntuvan osan tahtiaikataulu laaditaan muuntuvien osien lukitsemisen ja toteutussuunnitte-
lun etenemisen salliessa. Tämän vuoksi päätöksenteko, suunnittelu, hankinnat ja rakentaminen
tulee integroida huolellisesti aikatauluttamalla.

Muuntuva osa rakennetaan viimeisenä.

7 Lähteet

Heljo, J. (2005). Reititysten taloudellinen merkitys. RIBS-menetelmä: rakennuksen avoimen reititysjärjestelmän kehittäminen. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakentamistalouden laitos.

Järvinen, T. (2018). Tietomallinnus rinnakkaisen suunnittelun ja toteutuksen hankkeissa. Saatavilla: https://skol.teknologiateollisuus.fi/sites/skol/files/skol_tate_mallitrinnakkainen_suunnittelu2018_esitys.pdf

Järvinen, T. (2021). TATE-mallinnus rinnakkaisen suunnittelun ja toteutuksen hankkeissa. Versio 1.1. Saatavissa: https://skol.teknologiateollisuus.fi/sites/skol/files/inline-files/SKOL_TATE_mallitrinnakkainen_suunnittelu2021.pdf

Keskiniva, K., Junnonen, J.-M., Saari, A. (2020). Teolliset esivalmisteet tahtituotantomallilla toteutettavalla korjausrakennustyömaalla: NOHEVA-tutkimuksen raportti. Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka

Keskiniva, K., Sormunen, P. & Saari, A. (2024). TH5 Talotekniikkatoteutuksen uudet mallit – talotekniikkaohjattu rakentaminen. Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka.

Khanzode, A., Fischer, M., & Reed, D. (2008). Benefits and lessons learned of implementing building virtual design and construction (VDC) technologies for coordination of mechanical, electrical, and plumbing (MEP) systems on a large healthcare project. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 13(22), 324-342.

Kiiras, J., Kruus, M., Hämäläinen, A., Lindroos, H., Saari, A., & Salmikivi, T. (2007a). SUKE: Malli talotekniikan suunnittelun ja hankintojen ohjaukseen projektinjohtohankkeissa. Helsinki: Rakennustieto Oy.

Kruus, M., Kiiras, J., Raveala, J., Saari, A., & Salmikivi, T. (2006). SUKE- Malli suunnittelun ohjaukseen projektinjohtohankkeissa.

Peltokorpi, A., Lavikka, R., Kokko, L. & Seppänen, O. (2018) Building 2030: Talotekniikan esivalmistus: esteet, mahdollistajat ja prosessi: Loppuraportti. Rakennustekniikan laitos. Helsinki: Aalto-yliopisto.

Peltokorpi, A., Lavikka, R. & Chauhan K. (2019) Building 2030: Esivalmistuksen vaikutusten arviointi: Loppuraportti. Rakennustekniikan laitos. Helsinki: Aalto-yliopisto.

Rantala, E. (2003). INSTALLAATIO- JA RAKENNUSTEKNIIKAN KOHERENSSISTA PERUSINSTALLAATIOTEKNIIKAN INTEGROIMISEEN, Väitöskirja, Teknillinen korkeakoulu, Espoo.
<http://lib.tkk.fi/Diss/2003/isbn9512267853/isbn9512267853.pdf>

RIL 239-2008 (2008). Talotekniikan reititysohje - modulaarinen installaatiotekniikka. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

RT 03-10525 (1993). Rakennusten ja rakennusosien mittajärjestely. Helsinki: Rakennustieto Oy

RT 103447 (2022). Putkistojen ja kanavien kannatus. Helsinki: Rakennustieto Oy

Saari, A., (2001). Tavoitteiden asettaminen rakennuksen muunto- ja käyttöjoustavuudelle, Teknillisen korkeakoulun rakentamistalouden laboratorion selvityksiä 36, Espoo.
https://cris.tuni.fi/ws/portalfiles/portal/107143990/Arto_Saari_TKK_raktal_lab_selv36.pdf

Saari, A., Kruus, M., Hämäläinen, A, Kiiras, J., (2007). Flexibuild – a systematic flexibility management procedure for building projects, *Facilities*, 25 (3/4), 104-114.
<https://doi.org/10.1108/02632770710729692>

Seppänen, O., Lappalainen, E., Bárány, S., Mäki-Petäys, L. (2024). Building 2030: Suunnittelu-prosessi 2.0 Loppuraportti. Rakennustekniikan laitos. Helsinki: Aalto-yliopisto.

Liite 1 – Haastattelukysymykset

Haastattelut käydään keskustelunomaisesti. Kysymykset ovat suuntaa antavia keskustelun ohjaajia.

1. Mitä talotekniikan esivalmisteita on käytetty hankkeessa?
2. Miten määriteltiin, onko esivalmistuksesta hankkeelle hyötyä?
3. Missä vaiheessa määrittely tehtiin?
4. Kuka määrittelyn teki?
5. Miten päätösprosessi eteni esivalmistuksessa?
6. Mitä haasteita nousi esiin esivalmistusprosessissa?
7. Millä tavalla sopimusmallit vaikuttavat esivalmistukseen?
8. Onko hankkeen esivalmistusprosessi toteutunut Building 2030 -hankkeessa esitetyn prosessin mukaan?
9. Millaisella logiikalla reititykset päätetään nykyprosessissa ja ketkä siihen osallistuvat? Toimiiko prosessi ja miten sitä voisi kehittää?
10. Tutkitaanko erilaisia reititysten vaihtoehtoja? Jos tutkitaan, niin missä vaiheessa?
11. Esimerkiksi arkkitehti-, rakenne- ja talotekniikkasuunnittelun yhteensovittaminen
12. Vaakareititysten haasteet ja hyvät ratkaisut? Esim. Huonekorkeus ja risteilyt
13. Kuinka suuri potentiaali hankkeiden aikana/elinkaareissa on säästää kustannuksia tutkimalla vaihtoehtoisia reititysvaihtoehtoja? (Millainen käsitys, onko potentiaalia --- ei tarvitse kvantifioida tässä)
14. Huomioidaanko avoin rakentaminen reititysten suunnittelussa? Miten? Haasteita ja ratkaisuja?
15. Huomioidaanko tahtituotanto reititysten suunnittelussa? Pitäisikö? Haasteita ja ratkaisuja? Rakennuttajan tahtikonsepti tai (TATE)urakoitsijan antama varhainen suunnittelunohjaus?
16. Miten suunnittelija pystyy parantamaan omaa tekemistään reititysten suunnitteluun liittyen? Miten muut osapuolet pystyisivät parantamaan tekemistään esimerkiksi reitityssuunnittelun edellytyksiin liittyen?
17. Liittyykö reititysten suunnitteluun tai reitityksiin muita toistuvia ongelmia?
18. Osallistuvatko urakoitsijat reititysten suunnittelun ohjaukseen esimerkiksi alliansseissa? Miten? Onko heistä hyötyä?
19. Kuinka keskeistä avoimen rakentamisen huomioiminen on esimerkiksi sairaaloissa? Miksi? Muuttuvatko tilojen käyttötapaukset merkittävästi elinkaaren aikana?
20. Mitä reitityksiin liittyviä haasteita asennusvaiheessa on kohdattu?
21. Esivalmistusohjelma? Onko käytetty? Pitäisikö? Mitä pitäisi sisältää?
22. Ylipäätään modulaaristen reititysten eduista ja haasteista? Esim. kustannusvaikutukset, aikatauluvaikutukset, asennettavuus, suunnittelun yhteensovittaminen, elinkaarinäkökulma
23. Miten suunnittelija pystyy parantamaan omaa tekemistään moduulien suunnitteluun liittyen?
24. Tuleeko jotakin muuta aiheeseen liittyvää mieleen?