



Anssi Sankari

Digitaalinen kaksonen rakennuksen taloteknisten järjestelmien ylläpi- dossa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (YAMK)

Talotekniikan tutkinto-ohjelma

Insinöörityö

7.3.2025

Tiivistelmä

| | |
|-----------------------|---|
| Tekijä: | Anssi Sankari |
| Otsikko: | Digitaalinen kaksonen rakennuksen taloteknisten järjestelmien ylläpidossa |
| Sivumäärä: | 49 sivua |
| Aika: | 7.3.2025 |
| Tutkinto: | Insinööri (YAMK) |
| Tutkinto-ohjelma: | Talotekniikan tutkinto-ohjelma |
| Ammatillinen pääaine: | LVI-tekniikka |
| Ohjaajat: | Lehtori Pasi Partonen Yliopettaja Rauno Holopainen |

Insinööriyössä selvitettiin digitaalisten kaksosten hyödyntämismahdollisuuksia rakennusten taloteknisten järjestelmien ylläpidossa ja energiatehokkuuden parantamisessa. Tutkimuksen tavoitteena oli osoittaa digitaalisten kaksosmallien hyödynnettävyys taloteknisten järjestelmien ylläpidossa ja koostaa tietolähde, joka tarjoaa kattavan näkemyksen digitaalisten kaksosten hyödyistä ja haasteista talotekniikan näkökulmasta.

Opinnäytetyön tutkimusmenetelmiksi valittiin kirjallisuustutkimus ja puolistrukturoitu haastattelututkimus. Työ toteutettiin perehtymällä olemassa oleviin tietomallinnuksen standardeihin, rakentamislainsäädäntöön, ajankohtaisiin energiatehokkuusvaatimuksiin ja tapaustutkimuksiin. Haastattelututkimuksessa haastateltiin kiinteistöalan ammattilaisia, joiden kokemus ja näkemys auttoivat selvittämään teknologian käyttöön liittyviä haasteita ja hyötyjä. Haastatteluiden vastaukset koottiin yhteenvedoksi.

Kirjallisuus- ja haastattelututkimuksen tulkinnan perusteella digitaalisen kaksosen hyödyt ja haasteet tunnetaan ylläpitojärjestelmiä käyttävien ja toteuttavien henkilöiden keskuudessa hyvin ja digitaalisille kaksosille uskotaan rakennusallalla olevan kasvava hyödyntämispotentiaali. Tehokkaiden koneoppimis- ja tekoälyalgoritmien hyödyntämisellä havaittiin olevan suuri potentiaali tietopohjaisen päätöksenteon tukena.

Tutkimuksella voidaan osoittaa, että digitaalisten kaksosten avulla rakennuskannan energiatehokkuutta voidaan parantaa huomattavasti. Kaksosmallin havaittiin myös tukevan kustannusten pitkän aikavälin hallintaa ja huoltotoimenpiteiden suunnittelua.

Avainsanat: digitaalinen kaksonen, ylläpitomalli, energiatehokkuus

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

Abstract

Author: Anssi Sankari
Title: Digital Twin Approach to Maintenance of Building Services Systems
Number of Pages: 49 pages
Date: 7 March 2025

Degree: Master of Engineering
Degree Programme: Building Services Engineering
Professional Major: HVAC Engineering
Supervisors: Pasi Partonen, Senior Lecturer
Rauno Holopainen, Principal Lecturer

The purpose of the project was to define how digital twin technology could be applied to the maintenance of building services systems and used to reduce energy consumption and carbon footprint. The primary goal was to create a framework that describes the use, benefits and challenges to overcome in the use of digital twins.

The research was done by analysing existing building information modelling practices, reviewing industry standards and research literature on digital twins, and interviewing experts in building services engineering. The interviews gave insight into the current situation, known benefits and challenges of digital twins in the maintenance of building services systems.

The study showed that digital twins can provide notable enhancements to energy efficiency and maintenance. The enhancements can be achieved by selecting more precise control methods, using maintenance prediction, and simulating possible usage scenarios.

The project proved that digital twin technology is a promising future asset when used for continuous monitoring and optimization of HVAC and electric systems. The technology supports data driven decision making by providing insight into performance, maintenance and potential systems control improvements. Thus, digital twin technology offers impactful benefits for building services engineering by promoting sustainability and lowering long-term expenses.

Keywords: digital twin, facility management system, energy efficiency

Sisällys

| | |
|---|----|
| Sisällys | 4 |
| 1 Johdanto | 1 |
| 2 Tietomallinnus | 3 |
| 2.1 Tuotemalli ja tuotetiedon hallinta | 4 |
| 2.2 Tietomalli | 4 |
| 2.3 Tietomallin kypsyystaso | 5 |
| 2.4 Tietomallin tarkkuustaso | 7 |
| 2.5 Tietomallin ulottuvuudet | 9 |
| 2.6 Tietomallin vaiheistaminen | 12 |
| 3 Digitaalinen kaksonen | 16 |
| 3.1 Määritelmä | 16 |
| 3.2 Tyypit ja tyyppien käyttötarkoitukset | 18 |
| 3.3 Kategoriat | 20 |
| 3.4 Toteutus | 21 |
| 3.5 Haasteet | 22 |
| 3.6 Toteutettuja kohteita | 24 |
| 4 Kiinteistöhallinta | 27 |
| 4.1 Hiilijalanjälki ja energiankulutus | 27 |
| 4.2 Kustannukset | 30 |
| 4.3 Säästöpotentiaali | 31 |
| 5 Ohjaavat tekijät | 33 |
| 5.1 Rakentamislaki 751/2023 | 33 |
| 5.2 Yleiset tietomallivaatimukset 2012 | 34 |
| 5.3 Fit for 55-valmiuspaketti | 34 |
| 5.4 Rakennusten energiatehokkuusdirektiivi EU/2024/1275 | 35 |
| 6 Haastattelututkimus | 36 |
| 6.1 Haastatteluprosessi | 36 |
| 6.2 Haastattelukysymykset | 37 |

| | | |
|-------|-------------------------------------|----|
| 6.2.1 | Digitaalisen kaksosen määrittely | 37 |
| 6.2.2 | Toteutetut digitaaliset kaksoset | 38 |
| 6.2.3 | Ylläpito ja huolto | 39 |
| 6.2.4 | Hiilijalanjälki ja energiatehokkuus | 40 |
| 6.2.5 | Ongelmat ja haasteet | 41 |
| 6.2.6 | Tulevaisuudenkehitys | 43 |
| 6.3 | Yhteenveto haastatteluista | 45 |
| 7 | Yhteenveto | 47 |
| | Lähteet | 50 |

Lyhenteet

- BIM:** *Building Information Model*. Rakennuksen elinkaaren tietojen esitys digitaalisessa muodossa.
- CAD:** *Computer-Aided Design*. Tietokoneavustettu suunnitteluohjelmisto.
- DTA:** *Digital Twin Aggregate*. Yhdistelmä digitaalisia kaksosmalleja, mitkä luovat järjestelmäkokonaisuuden.
- DTI:** *Digital Twin Instance*. Digitaalisen kaksosen esiintymä, kuten digitaalisesit mallinnettu ja fyysisesti rakennettu ilmanvaihtokone, mitkä siirtävät tietoa välillään.
- DTP:** *Digital Twin Prototype*. Digitaalisen kaksosen prototyyppi, kuten suunnitteluversio uudesta tuotteesta.
- ESG:** *Environmental, Social and Governance*. Arvolla mitataan toimijan ympäristövaikutusten, yhteiskuntavaikutusten ja hallintotavan vastuullisuutta.
- IFC:** *Industry Foundation Classes*. Oliopohjaisen tiedonsiirron standardi tietokoneiden välillä.
- IoT:** *Internet of Things*. Asioiden internet, mikä koostuu laitteistoista, sensoreista, laskentatehosta ja ohjelmistoista, jotka ovat yhteydessä toisiinsa tietoverkkoyhteydellä.
- LOD:** *Level Of Development*. Tietosisällön määrämittäri projektivaiheistuksen mukaan.
- LoD:** *Level of Detail*. Tietosisällön visuaalisesti tarjoaman tiedon laadun mittari.

LOIN: *Level of Information Need*. Tarpeellisen tietosisällön määrittelytapa.

OOP: *Object-Oriented Programming*. Ohjelmointiparadigma, jossa toimijat esitetään objektin ilmentyminä.

1 Johdanto

Tässä opinnäytetyössä selvitetään, miten rakennusten digitaalista kaksosta voidaan hyödyntää kiinteistöjen ylläpidossa, energiatehokkuuden parantamisessa sekä hiilijalanjäljen pienentämisessä taloteknisten järjestelmien näkökulmasta. Työn tavoitteena on ensisijaisesti kuvata teoreettinen perusta digitaalisen kaksosen käsitteelle ja sen keskeiset ominaisuudet, minkä jälkeen esitellä käytännön toteutusmahdollisuuksia sekä näihin liittyviä haasteita.

Teoriatutkimuksella pyritään antamaan lukijalle selkeä kuva uudenlaisen teknologian tuomista mahdollisuuksista talotekniikan kentällä. Haastattelututkimuksen tavoitteena on muodostaa kattava ymmärrys digitaalisten kaksosten teknologian nykytilanteesta alalla. Teoria- ja haastattelututkimuksen tulokinnan tavoitteena on muodostaa vastaukset tutkimuskysymyksiin:

- Miten digitaalinen kaksonen auttaa kiinteistön ylläpitotarpeen ennakoinnissa?
- Miten digitaalinen kaksonen voi auttaa pienentämään hiilijalanjälkeä ja edistää energiatehokkuutta talotekniikassa?
- Mitkä ovat digitaalisen kaksosen keskeiset haasteet, jotka hankaloittavat käyttöönottoa?

Tutkimushypoteesina työssä on lause: Digitaaliset kaksoset tarjoavat konkreettisia hyötyjä taloteknisten järjestelmien ylläpitoon ja parantavat rakennusten energiatehokkuutta.

Opinnäytetyön aihe valikoitui vahvasti digitalisoituneen maailman ja digitalisoinnin tulevaisuudennäkymien perusteella, ja ne ohjaavat myös rakennusala digitalisoitumiseen. Digitaaliset kaksoset ovat tutkimuksen ja käytännön hankkeiden perusteella kehittyvä teknologia, jonka avulla kiinteistöjen energiankulutusta voidaan vähentää ja ylläpitoa tehostaa. Tehokkaat hallintajärjestelmät ovat erityisen ajankohtaisia kiristyvien päästötavoitteiden ja kiristyvän kilpailun vuoksi. Yritykset voivat erottautua tarjoamalla kokonaisvaltaisia sekä innovatiivisia älyratkaisuja asiakkailleen.

Tarve työn toteuttamiselle nousee esiin ennen kaikkea kiinteistöjen koko elinkaaren hallinnan toimintamallien epäjärjestelmällisyydestä. EU-tasoiset ja valtionalliset energiatehokkuusvaatimukset, rakennusalan kiristynvä lainsäädäntö ja loppukäyttäjien odotukset energiatehokkaammista ja ympäristöä vähemmän kuormittavista kiinteistöistä edellyttävät rakennusosalta uusia toimintatapoja.

Työssä pyritään tarjoamaan kattavasti tietoa etenkin niistä käytännön asioista, jotka on hallittava, jotta digitaalinen kaksonen saadaan kehitettyä prototyyppi-vaiheesta osaksi päivittäistä kiinteistönhallintaa. Lisäksi työssä nostetaan esiin konkreettisia esimerkkejä digitaalisten kaksosmallien hyödyistä kiinteistönhallinnassa läpi kiinteistöjen elinkaaren.

Opinnäytetyö toteutetaan henkilökohtaisesta mielenkiinnosta uusien teknologioiden tarjoamiin kehitysmahdollisuuksiin talotekniikan saralla ja halusta viedä koko rakennusala lähemmäs muiden alojen kehitystasoa digitaalisten teknologioiden käytössä. Opinnäytetyötä ei toteuteta tilaustyönä tai yhteistoiminnallisesti yritykselle.

2 Tietomallinnus

Nykyaikaisen rakentamisen kulmakivenä on aina toiminut suunnittelu, joka on tehokkaiden tietokoneiden myötä saanut kaksiulotteisten tasokuvien rinnalle kolmiulotteiset esitykset, tietomallit. Kolmiulotteisuus on mahdollistanut suunnitelmien paremman hahmotettavuuden ja havainnollisuuden. Nämä kolmiulotteiset suunnitelmat esiintyvät useissa eri yhteyksissä ja eri sisältöisinä käyttötaroituksensa mukaan. (Mikä on tietomalli? 2020.)

Digitaaliselta kaksoselta odotetaan enemmän. Täydellisen digitaalisen kaksosen tulisi mahdollistaa rakennuksen automaattinen tila- ja olosuhdeseuranta, olosuhteiden ja muutosten simulointi sekä toiminnallisuuden ja vaikutusten ennakointi läpi rakennuksen käyttöiän. Digitaalisen kaksosen tulisi mahdollistaa kaksisuuntainen tiedonsiirto tietomallin ja fyysisen kohteen välillä, jolloin fyysiset vaikutukset reaali maailmassa vaikuttavat tietomallin digitaalisen esitykseen, kun taas digitaalisessa mallissa tehtävät parametrimuutokset vaikuttavat suoraan reaali maailman fyysiseen kohteeseen. Mallin tulisi olla myös dynaaminen ja reagoida automaattisesti muutoksiin tallennetun historiatiedon ja reaaliaikaisesti saadun datan perusteella ennakoivasti. (Digital Twin Consortium Defines Digital Twin 2020.)

Tietojärjestelmänä rakennuksen digitaalinen kaksonen on toistaiseksi standardoimaton tietomallityyppi, jonka lopullinen päämäärä on toimia yhtenä ainoana tarvittavana tietolähteenä läpi rakennuksen elinkaaren. Tämä tavoite on kuitenkin nykytilassa saavuttamattomissa standardoimattomuuden aiheuttamien yhteensovitusongelmien, kuten standardoimattoman yhdenmuotoisen tiedon puuttumisen, mallien yhteensovittamisen sekä tiedonkeruun automatisoinnin puutteen takia. (Seppänen ym. 2023.)

2.1 Tuotemalli ja tuotetiedon hallinta

Suomessa tietomallien kehitystä ja käyttöönottoa on ohjannut 2000-luvun alussa Rakennusteollisuus RT ry:n ProIT Tuotemallit rakennusprosessissa -hanke, jossa määriteltiin yleiset perusteet ja ohjeet tuotemallipohjaiseen suunnitteluun. (Saarinen 2007: 93.)

Tuotemallien tarkoituksena on kuvata rakennuksen tai järjestelmän yksittäisiä osia kolmiulotteisesti samalla liittäen muita tuotteeseen oleellisesti liittyviä tietoja, kuten materia ali-, muoto- ja liitostapatietoja, sekä yhtä oleellisena valmistaja- ja valmistenumerotietoja kuitenkin vain näihin rajoittumatta. Tuotteet tietoineen kuitenkin harvoin ovat suoraan käytettävissä tietomallien lähtötiedoiksi ja vaativat muokkausta käyttötarkoituksen ja käyttöympäristön mukaan. (Niemioja 2005.)

Tuotemallit ovat keskeinen osa tietomallien tietosisältöä, jossa erilaisia tuotteita käsitellään objekteina tai olioina riippuen käytetystä termistöstä. Käytännössä objekti ja olio -sanoja käytetään keskenään vaihtokelpoisina. Tuotemallien objekti- tai olioajattelu lainaa keskeistä rakennettaan vahvasti tietojenkäsittelytieteen ja ohjelmoinnin tuntemasta Object-Oriented Programming (OOP) -paradigmasta, jonka avulla on tarkoitus luokitella esimerkiksi abstrakteja reaali maailman käsitteitä modulaarisina kokonaisuuksina, joista voidaan luoda spesifejä esiintymiä omin tarkennetuin sisältömäärittelyin. (van Nederveen ym. 2009.)

2.2 Tietomalli

Rakennuksen tietomalli, Building Information Model (BIM), on tietovarasto, jonka tarkoituksena on koostaa kaikki rakennukseen liittyvien osien, laitteiden ja tarvikkeiden tiedot sekä ominaisuudet läpi rakennuksen käyttöiän ennakkoon määrittelyssä laajuudessa. Tietovarastona toimimisen ohella tietomallin tärkeimpiä ominaisuuksia on sen esitys koneluettavassa muodossa, jossa tiedon rakenne on tarkkaan määritelty, toisin kuin tasokuvissa, joihin ei talleteta esimerkiksi tuotevalintaan johtaneita ominaisuustietoja. Tiivistettynä rakennuksen tietomalli on digitaalinen esitys fyysisestä rakennuksesta täydennettynä sen

tuotteiden ja tarvikkeiden ominaisuustiedoilla sekä laitteiston mittaustiedoilla, jossa tiedot talletetaan yhteen paikkaan läpi rakennuksen käyttöiän aina rakentamisesta käytöstä poistoon saakka. (van Nederveen ym. 2009.)

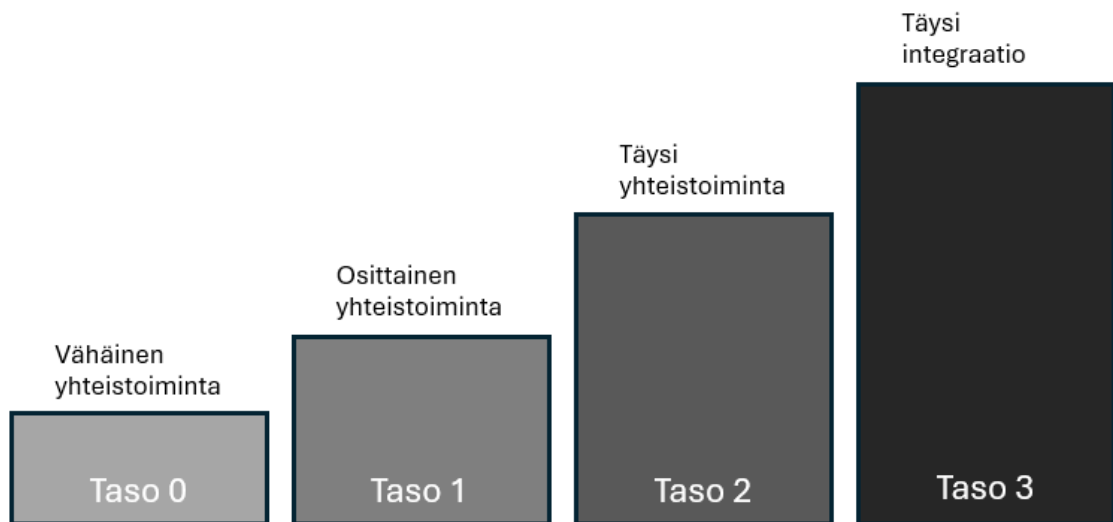
Suomalainen määritelmä rakennuksen tietomallille on

Rakennuskohteen sijaintia, geometriaa ja muotoa kolmiulotteisena mallina kuvaava suunnitelma sekä rakennuskohteeseen liittyvät tiedot esitettynä koneluettavassa tietomallimuodossa (Suomi.fi 2019).

Nykyaikaiset tietomallit perustuvat usein standardoituun IFC (Industry Foundation Classes) tiedonsiirtomalliin, jonka tarkoituksena on mahdollistaa tuotemallien oliomuotoinen tiedonsiirto CAD-järjestelmien välillä ohjelmistosta riippumatta (Industry Foundation Classes (IFC) – An introduction).

2.3 Tietomallin kypsyytaso

Projektiorganisaation kyky hyödyntää ja hallita tietomalleja voidaan kuvata tietomallin maturiteettitason kautta. Korkeampi maturiteettitaso kuvastaa tietomallien integraation tasoa, mikä auttaa hahmottamaan kuinka laajasti tietomalleja hyödynnetään suunnittelusta ylläpitoon ja millä tasolla tietomalli on integroitu projektiin. Maturiteetti kuvataan neljänä tasona luvuin nollasta kolmeen (kuva 1). Jokainen uusi taso laajentaa tietomallien käyttötapoja, lisää tietomalleihin uusia toiminnallisuuksia ja ominaisuuksia sekä pitää sisällään aiempien tasojen laajennukset sekä prosessikäytännöt. (Eischet 2024.)



Kuva 1. Tietomallien maturiteettitasot Oliver Eischetin (2024) kuvausta mukailen.

Tason 0 kypsyystaso viittaa CAD-ohjelmistojen käyttöön ilman standardoituja toimintatapoja ja määriteltyjä prosesseja kaksiulotteisten suunnitelmien piirtämisessä ja tyypilliseen kirjoitetun tiedon siirtämiseen sähköisesti tai fyysisesti. Tällä tasolla suunnitteluprojektista puuttuu koheesio, joka voi vaikeuttaa suunnitteluprosessia merkittävästi. (BIM maturity levels 2024; BIM levels explained.)

Tason 1 kypsyystasosta puhuttaessa viitataan suunnittelutoteutukseen, jossa mukana voi olla kohteen kolmiulotteisia visualisointeja, kuten hankekehitysmalleja ja hahmotusmalleja (BIM maturity levels 2024). Tällä tasolla projektin tiedot säilytetään tavallisesti yhteisessä tietovarastossa ja projektille on määritelty toimintatavat ja prosessit, joita toteutuksessa seurataan (BIM maturity Levels: from stage 0 to stage 3).

Tason 2 kypsyystasoon viitataan, kun projektiorganisaation hyödyntää tietomalleja aktiivisesti suunnittelussa ja tietomallien käytölle on määritelty yhteisesti syötettävien tietojen laajuus. Tiedot syötetään yhteisesti sovitussa muodossa, kuten IFC-standardin mukaisessa muodossa, jolloin kaikilla projektiorganisaation henkilöillä on pääsy samassa muodossa olevaan tietoon. Tasolla 2 ei kuitenkaan edellytä saman tietomallin kanssa työskentelyä. Tällä tasolla korostuu erityisesti yhteistoiminnallisuus, tiedonsiirto ja kommunikaatio. Tärkeänä uutena

mahdollisena ominaisuutena tasolla on aikataulutus tietomallin perusteella. (BIM maturity Levels: from stage 0 to stage 3; BIM maturity levels 2024.)

Tason 3 kypsyystaso edustaa rakentamisen tietomallinnuksen kypsyystasoista korkeinta tasoa, jonka tavoitteena saavuttaa täysi integraatio sekä reaaliaikainen yhteistyö kaikkien projektissa toimivien tahojen kesken. Tällä tasolla tietomalli on yhteiskäyttöinen keskitetty pilvipalvelupohjainen tietomalli, jossa kaikki projektin toimijat käyttävät ja päivittävät samaa tietomallia. Yksi yhteinen tietomalli vähentää suunnittelun ja toteutuksen sisäisiä ja keskinäisiä viiveitä tiedonkulussa, helpottaa kommunikaatiota toimijoiden välillä ja mahdollistaa entistä helpomman yhteentörmäyksien ennakoinnin toteutustapojen välillä. Yksi yhteinen tietomalli mahdollistaa myös suuren yhdenmuotoisen datamassan helpon käsittelyn. Tason 3 tietomallista voidaan puhua myös avoimena tietomallina, joka ei sido tietomallin käyttöä tiettyyn ohjelmistoon vaan on standardoidun tiedonkäsittelymuotonsa takia käytettävissä riippumatta ohjelmistotyökaluista. (Lorek 2022; Complete Guide to BIM Maturity Levels: Navigating the Evolution of Building Information Modeling 2024; BIM Maturity Assessment; Open BIM.)

2.4 Tietomallin tarkkuustaso

Kotimaisessa Yleiset Tietomallivaatimukset 2012 -julkaisussa määritellään hankkeessa käytettävien tietomallien tietosisältö riippuen hankkeen eri vaiheista ja tietomallien hyödyntämistarpeesta hankkeessa. Tietomallien tarkkuus jaetaan kotimaisten tietomallivaatimusten mukaan kolmeen eri tarkkuustasoon, joissa korkeampi taso perii matalamman tason ominaisuudet.

Tason 1 tietomallin käyttötarkoitus on toimia suunnittelijoiden välisenä välineenä siirtää ja kommunikoida tietoa projektilla, jossa rakennuksen tai rakennusosan sijainti ja muoto on mallinnettu vaatimusten mukaisesti ja rakennusosat on nimetty kuvaavasti. (Yleiset tietomallivaatimukset 2012 Osa 3: 3.)

Tarkkuustasolla 2 ensisijaiset käyttötarkoitukset ovat hanke- ja luonnosvaiheiden energiatekniset analyysit ja rakentamisen valmisteluvaiheessa määrälaskenta hankintojen valmistelua varten. Taso edellyttää rakennetyyppien olevan

määritelty ja nimetty oikein sekä mallinnettu tarkkuudella, jolla saadaan tuotetyyppikohtainen kappalemäärä poimittu tietomallista. (Yleiset tietomallivaatimukset 2012 Osa 3: 3.)

Tason 3 tarkkuudella rakennusosien tietojen edellytetään olevan tarkasti määritelty niin, että tuotteen ominaisuudet on kytketty tuotteeseen muodossa, jossa ne voidaan listata. (Yleiset tietomallivaatimukset 2012 Osa 3: 3.)

Tietomallien tarkkuustasolle löytyy maailmanlaajuisesti useita erilaisia määritelmiä, joista esimerkkeinä Level Of Development (LOD), Level of Detail (LoD) ja Level of Information Need (LOIN).

Termi Level Of Development kuvastaa tietomallin sekä tietosisällön tarkastettua ja mietittyä sisältöä toteutuksen eri vaiheissa, kun Level of Detail keskittyy enemmän visuaalisen esityksen oikeellisuuteen. Level Of Development ja Level of Detail termejä käytetään kuitenkin usein hyvin vapaasti keskenään samaa tarkoittavina. (Ellis 2020; BIM Maturity Levels Explained- Level 0, Level 1, Level 2, Level 3; LOD (Level of Detail).)

Kansainvälisen ISO 19650 -standardin mukaan Level of Information Need on tarvittavan informaation vähimmäismäärä, jossa malli tai sen sisältämä mallimuotoinen objekti sisältää juuri sen informaation mitä objektin kanssa työskentelevät sidosryhmät tarvitsevat. Level of Information Need -määrittelyssä kaikkea ylimääräistä tietosisältöä pidetään hukkana. (SFS-EN ISO 19650-1:2019: 30).

2.5 Tietomallin ulottuvuudet

Tietomallin syvyys voidaan jakaa ulottuvuuksiin tietomalliin sisällytetyn tiedon mukaan. Riippuen tietolähteestä, ulottuvuudet jaetaan olemassa oleviin ja korkeellisempiin ulottuvuuksiin alkaen kuudennesta tai kahdeksannesta ulottuvuudesta. Kuudennen ja seitsemännen ulottuvuuden keskinäisestä järjestyksestä löytyy vaihtelevia tietoja, eikä määrittely ole aivan tarkka. Eräs esimerkki ulottuvuusjaosta on seuraava:

- 3D - muoto
- 4D - aika
- 5D - kustannukset
- 6D - kestävä kehitys ja energiatalous
- 7D - ylläpito
- 8D - turvallisuus
- 9D - lean rakentaminen
- 10D - teollistettu rakentaminen. (The 10 dimensions of BIM.)

Tietomallien ulottuvuudet monin paikoin sivuavat toisiaan ja vuotavat toistensa kentälle. Ulottuvuuksia ei tulekaan pitää absoluuttisina vaan kuvaavina termeinä tietomalliin halutulle tietosisällölle. (Ellis 2024; BIM Dimensions – 3D, 4D, 5D, 6D explained 2021; BIM Level of Development | LOD 100, 200, 300, 350, 400, 500.)

Kaikkien kolmatta ulottuvuutta korkeampien ulottuvuuksien kanssa on kuitenkin tärkeätä huomata, että korkeampien ulottuvuuksien hyödyllisyys nojaa aiempien ulottuvuuksien, etenkin kolmannen ulottuvuuden, tietojen oikeellisuuteen. Esimerkiksi 6D- ja 7D-mallit eivät pysty toimimaan oikein, ilman että 3D-malli on ajantasainen ja oikein toteutettu. Kaikki korkeammat tasot hyötyvät aiempien tasojen tarkkuudesta, mutta täydellinen integraatio ei ole pakollista. (BIM Dimensions – 3D, 4D, 5D, 6D explained 2021.)

Kolmiulotteinen tietomalli on digitaalinen geometrinen malli, jossa suunnittelukohte esitetään leveys-, korkeus- ja syvyysakseleilla. Malli on käytännöllinen

pohja, johon voidaan liittää prosessin edetessä lisätietoja ja näin rikastaa suunnittelukohteen esitystä. (BIM Dimensions – 3D, 4D, 5D, 6D explained 2021.)

Neliulotteinen tietomalli yhdistää aiemmin tehtyyn kolmiulotteiseen malliin aikatekijän, joka mahdollistaa rakentamisen vaiheittaisen ajastuksen sekä seurannan visuaalisesti (BIM Dimensions – 3D, 4D, 5D, 6D explained 2021.)

Viisiulotteinen tietomalli lisää malliin tiedon kustannuksista, joita projektissa muodostuu. Mallin avulla tarkempi hinnoittelu on mahdollista malliin liitettyjen osien perusteella. Kustannustietoa käsitellessä on erittäin tärkeätä tiedostaa mitä kustannustietoa mallissa käytetään, koska erityyppisten kustannusten keskinäinen sekoittaminen vääristää merkittävästi mallin tarjoamaa tietoa. (BIM Dimensions – 3D, 4D, 5D, 6D explained 2021.)

Kuusiulotteisuus lisää tietomalliin rakennuksen käytöstä kertyneet elinkaaritiedot, joiden avulla voidaan arvioida rakennuksen ilmastollista kestävyyttä sekä energiataloudellisuutta ja -tehokkuutta läpi rakennuksen käyttöiän. Tietojen lisääminen mahdollistaa esimerkiksi käyttökustannusten ennakkoinnin. (What are BIM Dimensions – 3D, 4D, 5D, 6D, and 7D BIM Explained | Definition & Benefits.)

Seitsemäs ulottuvuus yhdistää kaikki aiemmat ulottuvuudet yhdeksi malliksi, jonka pohjalta kiinteistön ylläpitotarvetta pystytään ennakoimaan ja tulevaisuuden käyttötilanteita simuloimaan käytöstä saatujen historiatietojen ja todellisesta käytöstä saatavan reaaliaikaisen sensoridatan perusteella. Nämä tiedot lisäämällä ja kaksisuuntaisen ohjauksen mahdollistamalla malli muuttuu staattisesta mallista dynaamiseksi malliksi, digitaaliseksi kaksoseksi. (7D BIM – BIM Driven Handover – Bim For Operation & Maintenance – Digital Twins.)

Kahdeksas ulottuvuus lisää turvallisuustiedot geometriseen malliin, mikä mahdollistaa riskien ennakoimisen ja rakentamiseen liittyvien turvallisuustoimenpiteiden määrittämisen. Sen avulla voidaan visualisoida rakennustyömaa ennen rakentamisen aloittamista ja analysoida mahdolliset skenaariot vaarojen ja ongelmien ehkäisemiseksi. Tämä tukee kokonaisvaltaista työmaatilanteen

hahmottamista, yksityiskohtaisten ja ajantasaisien turvallisuussuunnitelmien laatimista sekä työn luonteen mukaisten turvallisuusratkaisujen tunnistamista. Lisäksi työntekijöitä voidaan kouluttaa virtuaalitodellisuuden avulla, mikä voi vähentää onnettomuusriskejä merkittävästi (The 10 dimensions of BIM.).

Yhdeksäs ulottuvuus, lean-rakentaminen, keskittyy projektin toteuttamisen optimointiin ja prosessien digitalisointiin. Ulottuvuus painottaa resurssien tehokasta hallintaa ja jätteiden minimointia jatkuvan seurannan avulla. Näin mahdollistetaan materiaalien maksimaalinen hyötykäyttö ja autetaan varmistamaan rakennushankkeen pysyminen aikataulussa ja budjetissa (The 10 dimensions of BIM.).

Kymmenennen ulottuvuuden tavoitteena on tehostaa rakentamisen tuottavuutta yhdistämällä uutta teknologiaa sekä monipuolisia tietotyyppejä. Tarkoituksena on edistää teollistettua ja standardoitua rakennustapaa lyhentäen rakentamisaikaa, optimoiden työmaiden kustannuksia ja parantaen työturvallisuutta entisestään. Teollinen rakentaminen kohottaa myös rakentamisen laatua mahdollistamalla tuotannon vaiheiden tarkan hallinnan standardoitujen prosessien avulla ja hyödyntämällä kehittyneitä digitaalisia infrastruktuureja. Rakentamisen teollistaminen vähentää myös sääolosuhteiden vaikutusta työmaahan verrattuna paikalla rakentamiseen (The 10 dimensions of BIM.).

2.6 Tietomallin vaiheistaminen

Rakennusprojektin useat erilaiset vaiheet tarvitsevat erilaisia tietoja, jolloin myös tietomallit voidaan vaiheistaa kulloinkin käynnissä olevan vaiheen mukaisiksi. Vaiheistamiselle ei ole olemassa standardia tai tarkkaa ohjeistusta, jonka mukaan vaiheistaminen tulisi toteuttaa. Vaiheistaminen onkin tehokkainta jakaa osiin, jotka palvelevat projektin tilannetta parhaiten havainnollisuutensa sekä tietosisältönsä puolesta. Yleisesti vaiheistaminen voidaan tehdä seuraavasti:

- vaatimusmäärittely
- ehdotussuunnittelu
- yleissuunnittelu
- toteutussuunnittelu
- hankinta
- toteutus
- vastaanotto
- ylläpito. (Yleiset tietomallivaatimukset 2012 Osa: 6–11.)

Uuden rakennushankkeen ensimmäinen tietomalli on yleisesti vaatimusmalli, joka laaditaan tilaajan kanssa tehdyn tarvekartoituksen perusteella muodostettujen tilakohtaisten vaatimusten sekä ulkopuolisten rajoitteiden, kuten voimassa olevien lakien ja viranomais määräysten, perusteella. Vaatimusmalli on vähintään taulukko- tai tietokantamuotoinen esitys tarpeista, jonka pohjalta kolmiulotteista tietomalliesitystä voidaan alkaa toteuttamaan. (Yleiset tietomallivaatimukset 2012 Osa 1: 6.)

Ehdotussuunnitteluvaiheen tietomallien tavoitteena on käydä läpi erilaiset toteutusmahdollisuudet suunnittelualojen edustajien kesken ja varmistaa selkeä tiedonkulku projektin keskeisten toimijoiden välillä. Arkkitehtisuunnittelun tärkeimpänä työvaiheena on tuottaa muille suunnittelualoille riittävän tarkat pohjatiedot omien erikoisalojensa suunnittelun aloittamiseksi. Tiedoista on ilmevä ainakin tilat ja massoittelu sekä ulkovaipan tyyppi. Rakennesuunnittelun tehtävänä on koostaa arkkitehdin tietojen pohjalta alustava rakennusosamalli sekä tehdä rakennusosittain tarvittavat tutkimukset koko rakennuksen laajuudessa.

Talotekniikan ja muiden erikoisalojen suunnittelu tuottaa tässä vaiheessa tietoa järjestelmävalinnoista, järjestelmien palvelualueista sekä tilavaraustarpeista arkkitehtisuunnittelun tilavarausten ja vaatimusten perusteella. Yhdistämällä suunnittelualojen tuottamat tiedot toisiinsa saadaan suunnitelmien yhteensovitus testattua koordinoitusti. (Yleiset tietomallivaatimukset 2012 Osa 1: 6–7; Yleiset tietomallivaatimukset 2012 Osa 4: 5.)

Yleissuunnitteluvaiheeseen siirrytään, kun ehdotussuunnitteluvaiheessa on valittu perusratkaisu, joka on tilaajan sopivaksi toteama. Yleissuunnittelussa valittua perusratkaisua täydennetään suunnittelualoittain. Arkkitehdin tehtävänä on laatia lopullisen tilasuunnittelun lisäksi rakennusosamallit kantavista rakenteista, sisä- ja ulkoseinistä sekä ikkunoista ja ovista. Rakennesuunnittelija tarkastaa ja arvioi arkkitehtisuunnitelman toteutettavuutta sekä tekee rakennejärjestelmälle mitoitus- ja arvioi valitun järjestelmän vaikutuksia muihin suunnittelualoihin. Talotekniset ja erikoissuunnittelualat määrittelevät vähintään keskeiset tilavaraustarpeet järjestelmien teknisille runkoasennuksille siinä tarkkuudessa, että vaikutukset muihin suunnittelualoihin on suunnitelmasta havaittavissa. Viimeistään yleissuunnittelussa aloitetaan myös energia-analyyysien teko. Yleissuunnitteluvaiheen tärkein tehtävä on tuottaa yhteensovitettua ja mahdollisimman ristiriidatonta tietoa suunnittelualojen toisiinsa kohdistamista vaatimuksista. (Yleiset tietomallivaatimukset 2012 Osa 1: 8.)

Toteutussuunnittelu toistaa yleissuunnitteluvaiheen prosessia iteratiivisesti sillä erotuksella, että toteutussuunnitteluvaiheen suunnitelmien tarkkuus- ja tietosisältövaatimus kasvaa merkittävästi. Arkkitehtisuunnittelu tarkentaa rakennusosamalliaan niin, että mallista ilmenee rakennusosat mittatarkasti siinä muodossa kuin ne on tarkoitus projektissa toteuttaa. Rakennesuunnittelu tarkentaa ja tarkastaa alansa mitoituksia sekä laatii malliin tarkat toteutustavat rakennusosittain. Talotekninen suunnittelu sekä muiden erikoisalojen suunnittelu tarkentaa suunnitelmiaan kuvaamaan rakennuksen teknisiä järjestelmiä kattavasti huomioiden kaikkien komponenttien tilavaraukset. Alakohtaisista malleista koostetaan yhdistelmämalli, jossa esitetään havainnollistavassa muodossa alakohtaiset suunnitelmat ja jonka avulla voidaan tehdä reikä- ja reittivaraussuunnittelu, tilavarausten varmistus sekä yhteentörmäysten tarkastelu

suunnittelualojen välillä sekä alan omien suunnittelutoteutusten sisällä. (Yleiset tietomallivaatimukset 2012 Osa 1: 9.)

Hankintavaiheen tietomallien on nimensä mukaisesti tarkoitus tukea urakkatarjousten laatimista sekä alustavaa työsuunnittelua kohteelle. Malli tarjoaa visuaalisen avun hankekokonaisuuden hahmottamiseen, jonka lisäksi mallin perusteella voidaan tuottaa suoraan määrällistä tuotteille ja tarvikkeille, mikä tukee tarkkojen ja pieni hävikkisten hankintojen tekemistä. Alustava työsuunnittelu mallin perusteella mahdollistaa tarkemman aikataulutuksen sekä työresurssitarpeen määrittelyn. Yhdessä nämä tiedot mahdollistavat tarkempien työ- ja materiaalikustannusten laskemisen, mikä näyttäytyy tarkempina tarjouksina. (Yleiset tietomallivaatimukset 2012 Osa 1: 10.)

Toteutusvaiheessa mallia voidaan käyttää kahdessa eri tarkoituksessa, tiedon välittämisessä ja tiedon tuottamisessa. Tietoa välittävät tietomallit tuottavat rakennusprojektiin tietoa, kuten määräluetteloita, aikatauluohjausta ja työvaiheohjausta. Näitä tietoja hyödyntämällä projektissa pystytään välttämään päällekkäisen työn tekemistä sekä järjestelemään työvaiheita tehokkaasti, niin että työvaiheet eivät ole toistensa tiellä. Tiedon tuottaminen tietomalleihin työmaavaiheessa tapahtuu dokumentoimalla projektia esimerkiksi seuraamalla asennustöiden etenemistä ja päivittämällä mallissa esitettyjä rakennusosia valmiiksi. Vastaavasti materiaali- ja tarvikemuutosten päivitys tietomalliin tuottaa malliin uutta tietoa, joka on varmistettava oikeelliseksi sekä päivitettävä mallin varsinaiseksi tiedoksi. (Yleiset tietomallivaatimukset 2012 Osa 1: 9.)

Rakennusprojektin vastaanottovaiheessa, kun kaikki tuotteet ovat lopullisia, eikä materiaali muutoksia enää tule, koostetaan olemassa olevista tiedoista toteumamalli. Mallin tietojen tarkastuksen tekevät tavallisesti erikoisalojensa vastuusuunnittelijat. Toteumamalliin dokumentoidaan nimensä mukaisesti rakennusprojektin toteutunut lopullinen tilanne, joka pitää sisällään viimeisimmän tiedon tuotteista ja tarvikkeista sekä päivitetyn version rakenteellisesta toteutuksesta. (Yleiset tietomallivaatimukset 2012 Osa 1: 10.)

Ylläpitomalli on jatkojalostettu versio toteumamallista, josta rajataan pois huolto- ja ylläpitotöihin kohdentamaton tieto, jotta malli vastaa käyttötapauksen tarpeisiin. Mallin tietopohjaksi koostetaan rakennuksen osien ja laitteiden tekninen dokumentaatio, huoltoraportit sekä käyttö- ja huolto-ohjeet. Tämän lisäksi malliin voidaan tuoda valvonta-alakeskukseen kerätty järjestelmien trendi- ja historiatieto. Nämä tiedot lisäämällä mallia on mahdollista käyttää rakennuksen energiatehokkuuden optimointiin sekä simulointeihin. (Yleiset tietomallivaatimukset 2012 Osa 12: 2–3.)

3 Digitaalinen kaksonen

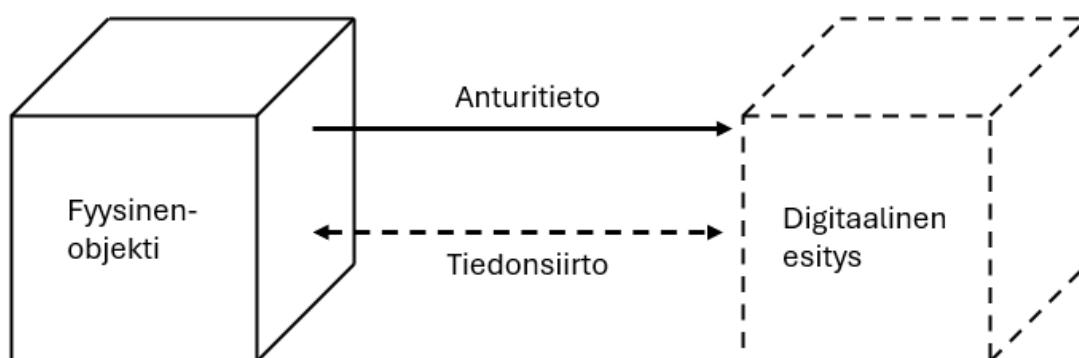
3.1 Määritelmä

Vuonna 1993 julkaistussa David Gelernter'n teoksessa *Mirror Worlds: or the Day Software Puts the Universe in a Shoebox...How It Will Happen and What It Will Mean* esitellään käsite Mirror World, peilimaailma, joka kuvastaa digitaalista kaksosta korkeammalla abstraktiotasolla.

Nykymuotoisen digitaalisen kaksosen konseptin kehittäjänä pidetään Michael Grievesia, joka vuoden 2005 teoksessaan *Product Lifecycle Management: Driving the next generation of lean thinking* esitteli konseptin informaation peilausmallina, joka koostuu kolmesta pääosasta:

- fyysinen tuote
- virtuaalinen tuote
- data-anturi. (Grieves 2005.)

Grievesin mukaan nämä kolme osaa (kuva 2) ovat tuotteen elinkaaren hallinnassa keskeisessä roolissa.



Kuva 2. Digitaalisen kaksosen konseptinäkömää Michael Grievesin (2005) esitystä mukaillen.

Nimeksi teknologialle digitaalinen kaksonen on vakiintunut John Vickersin käytettyä nimitystä Digital Twin vuonna 2010 NASA:n Technology Roadmap -raportissa.

Ensimmäisen tarkemman määritelmän digitaaliselle kaksoselle antoivat Michael Grieves ja John Vickers vuoden 2013 teoksessaan Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems seuraavasti:

Digital Twin (DT)—the Digital Twin is a set of virtual information constructs that fully describes a potential or actual physical manufactured product from the micro atomic level to the macro geometrical level. At its optimum, any information that could be obtained from inspecting a physical manufactured product can be obtained from its Digital Twin (Grieves & Vickers 2013: 95.).

Erään tarkentavan yleismääritelmän digitaaliselle kaksoselle on laatinut Digital Twin Consortium, joka kuvaa digitaalisen kaksosen olevan reaaliaikainen virtuaalinen esitys reaali maailman ilmentymästä tai prosessista, jolla on ennalta määritetty tarkkuus ja päivitystaajuus sekä kyky ennustaa tulevaa simulaatioin (Digital Twin Consortium Defines Digital Twin 2020). Vaihtoehdoisen määritelmän on laatinut buildingSMART, jonka mukaan digitaalinen kaksonen on fyysisen ominaisuuden digitaalinen esitys, jossa fyysinen ja digitaalinen maailma on yhteydessä toisiinsa ja vaihtavat säännöllisesti tietoa käyttönsä aikana (Enabling an Ecosystem of Digital Twins 2019).

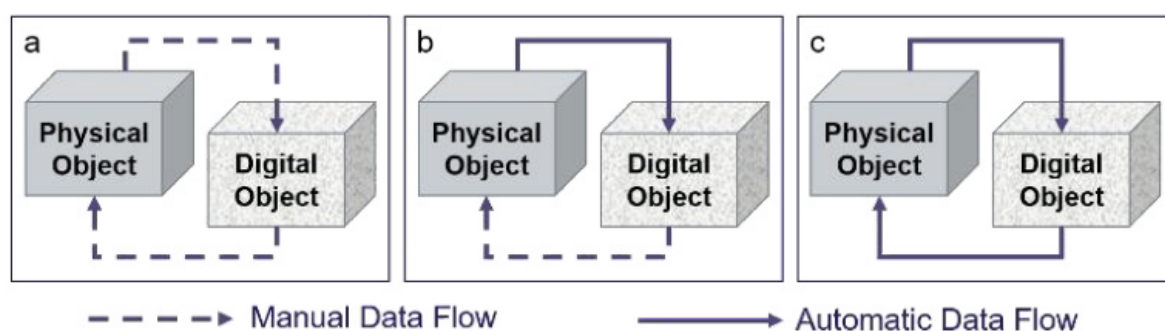
Kotimainen Sanastokeskuksen ylläpitämä TEPA-termipankki määrittelee digitaalisen kaksosen seuraavasti:

reaali maailman kohteesta tehty virtuaalinen malli, johon on sisällytetty kohteen olennaiset ominaisuudet sekä sen nykymuodossa että aiemmissa muodoissa (TEPA-termipankki.)

Yhteenvetona, digitaalinen kaksonen on virtuaalinen malli, jolla voidaan kuvastaa fyysistä objektia, järjestelmää tai prosessia. Malli kerää fyysisen kohteen toiminnasta reaaliaikaista anturitietoa ja tallettaa tietoa historiatiedoksi, mikä mahdollistaa fyysisen kohteen käyttäytymisen ja tilan seurannan, hallinnan, simuloinnin ja optimoinnin.

Digitaalinen varjo

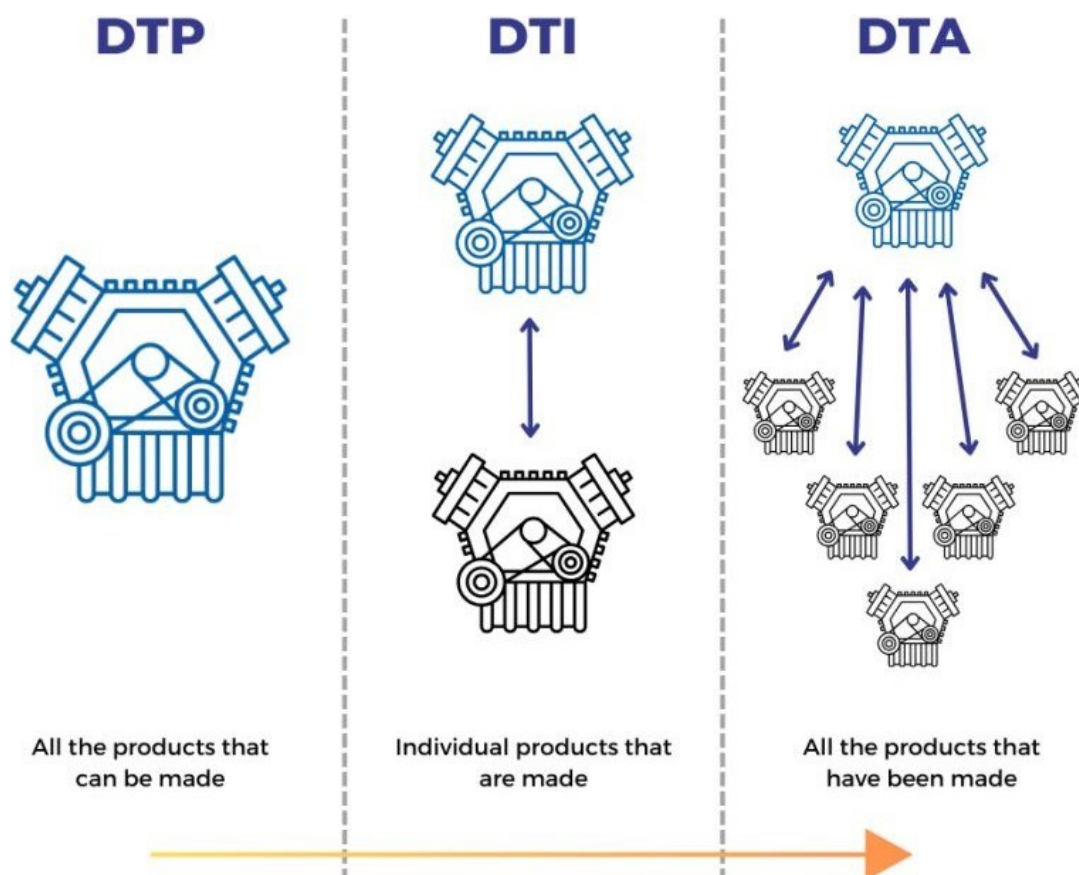
Digitaalisiin kaksosiin kytkeytyy myös terminä digitaalinen varjo (kuva 3). Digitaaliset varjot ovat reaktiivisia digitaalisia esityksiä mallinnetusta kohteesta, jotka keräävät dataa kohteen toiminnasta reaali maailman sensorien avulla, kuten digitaalinen kaksonen. Digitaalisena varjona mallinnuskohde esitetään tavallisesti riittävällä tarkkuudella halutun tiedon välittämiseksi. Poikkeamana digitaalisesta kaksosesta mallin automaattinen tiedonsiirto on vain yksisuuntaista. Digitaalisia varjoja käytetään yleisesti päätöksenteon ja seurannan tukena, kuten kiinteistöjen toteumamalleja. (Martinescu 2023.)



Kuva 3. Digitaalisten mallien tiedonsiirto (Yildiz ym. 2020).

3.2 Tyypit ja tyyppien käyttötarkoitus

Digitaalisten kaksosten konseptista voidaan erottaa kuvassa 4 olevat mallit: digitaalinen kaksosprototyyppi DTP (Digital Twin Prototype), digitaalinen kaksoskappale DTI (Digital Twin Instance) ja digitaalisten kaksosten aggregaatti DTA (Digital Twin Aggregate). (Mateev 2024: 188.)



Kuva 4. Digitaalisen kaksosen prototyyppi (DTP), digitaalisen kaksosen ilmentymä (DTI) ja digitaalisen kaksosen kokonaisuus (DTA) (Twindustry 2024).

Digitaalisen kaksosen prototyyppiä (DTP) käytetään, kun teknologiaa hyödynnetään prototyyppien luomiseen esimerkiksi suunniteltavasta järjestelmä- tai rakennusosasta. Suunniteltavasta objektista luodaan malli, mitä muokataan useiden kehityskierrosten myötä ja verrataan aiemmin laadittuun malliin, tavoitteena parantaa suunnittelun lopputulosta. (Mateev 2024: 188.)

Digitaalisen kaksosen ilmentymä (DTI) luodaan kuvaamaan järjestelmää viimeisimmässä muodossaan ja toimimaan järjestelmän esityksenä tämän elinkaaren ajan. Kaksoskappale vastaa kuvattua järjestelmää 1:1 suhteessa digitaalisen ja reaali maailman järjestelmän välillä. Kaksosessa esitetään kuvattun järjestelmän tiedot sekä ominaisuudet, esimerkiksi sähköteho, paino ja materiaalit. (Mateev 2024: 189.)

Digitaalisten kaksosten kokonaisuus (DTA), nimensä mukaisesti koostaa useampia digitaalisia kaksokappaleita yhteistoiminnalliseksi kokonaisuudeksi, muodostaen järjestelmien järjestelmän. Yhteen sidotusta järjestelmäkokonaisuudesta voidaan kerätä yksittäisten järjestelmäosien tuottamaa dataa, mahdollistaen tilastollisten analyysien laatimisen ja koneoppimisen sulauttamisen järjestelmäkokonaisuuteen. (Mateev 2024: 189.)

3.3 Kategoriat

Kiinteistöjen digitaaliset kaksokset voidaan jakaa käyttötarkoituksensa mukaan kahteen eri kategoriaan, operationaalisiin ja rakenteellisiin kaksosiin.

Operationaaliset kaksokset on yleisesti tarkoitettu tuotteen tai järjestelmän toiminnan seuraamiseen ja optimointiin, joka mahdollistaa mallinnetun kohteesta saadun datan perusteella tehokkaamman ylläpidon, ongelmadiagnostiikan, tulevien ylläpidollisten tehtävien ennakkoinnin ja ennakoivan suunnittelun. Operatiivinen kaksonen käsittelee ensisijaisesti seuratun prosessin tuottamaa dataa tietolähteenä. (Kortelainen ym. 2022.)

Rakenteelliset kaksokset on tarkoitettu nimensä mukaisesti havainnollistetun järjestelmän rakenteellisen toteutuksen esittämiseen sekä järjestelmäosien välisen yhteistoiminnan varmistamiseen ja seurantaan. Rakenteellinen kaksonen käsittelee tavallisesti malliin tallennettua fyysisten ominaisuuksien tietoa, kuten mittoja ja materiaaleja. (Kortelainen ym. 2022.)

3.4 Toteutus

Ylläpitomalleja käsittelevässä kirjallisuudessa kiinteistön digitaalisen kaksosen toteuttamiseen esiintyy useita eri lähestymistapoja, riippuen kiinteistön tyypistä ja halutusta toimintaperiaatteesta. Kirjallisuuden perusteella yleisiä lähestymistapoja taloteknisten kaksosmallien toteutuksessa ovat

- simulaatiopohjainen malli
- reaaliaikainen dataohjattu malli
- kiinteistön hallintajärjestelmään liitetty malli.

Simulaatiopohjainen malli koostetaan tavanomaisesti suhteellisen staattisista tiedoista, kuten rakennuksen energiankulutuksen suunnittelutiedoista tai käytön aikana kerätystä historiadatasta (Jiao ym. 2023). Datan perusteella tehtävällä simuloinnilla voidaan tuottaa useita eri tavoin parametrisoituja skenaarioita kiinteistön järjestelmien toiminnasta ja näissä tapahtuvista muutoksista (Verma ym. 2024).

Reaaliaikainen dataohjattu malli voidaan toteuttaa hyödyntäen esimerkiksi IoT-laitteilta kerättäviä sensoritietoja, joita kerätään kohteesta aktiivisesti käyttöhetkellä. Käyttöhetken mukaisen tiedon perusteella kaksosmalliin tuodaan nykyhetken näkymä mitattujen parametrien mukaisesti, ja tämän perusteella koostetaan todellisten kulutustietojen perusteella optimointiratkaisut, joilla energiatehokkuutta voidaan parantaa. (Morkunaite ym. 2024.)

Kiinteistön hallintajärjestelmään liitetyn kaksosmallin toimintaperiaate on koostaa kiinteistön taloteknisten järjestelmien tuottamat datavirrat yhtenäiseksi tiedoksi, jonka perusteella olemassa olevat talotekniset järjestelmät ohjataan kommunikoimaan toistensa kanssa. Kaksosmalli toimii täten siihen liitettyjen datavirtojen pohjalta älyohjauksena kiinteistön energiankulutuksen optimoinnissa ja järjestelmien toiminnan seurantatyökaluna. (Hauer ym. 2024.)

Yhteistä esitetyille mallipohjaisten digitaalisen kaksosten toteutustavoille on tekoäly- ja koneoppimisalgoritmien kytkeminen malliin datankäsittelyn ja päätöksenteon tueksi. Koneoppimisalgoritmit, kuten neuroverkot, ovat valvotun

oppimisen muodossa tehokkaita luokittelemaan datasta löydettyjä yhteyksiä ja valvomattoman oppimisen tilassa tunnistamaan uusia yhteyksiä datapisteiden välillä. (Ardebili ym., 2024: 32–33, 55.)

Useista olemassa olevista rakennuksista ei ole tietomallimuotoista lähtötietoa saatavilla, jolloin voidaan käyttää esimerkiksi fotogrammetriaa ja laserkeilausta tai näiden yhdistelmää. Saatujen materiaali-, mitta- ja sijaintitietojen avulla voidaan kohteesta luoda tietomalli tai digitaalinen varjo tuomalla kuvaajaan mukaan anturitietoja. (Volk ym. 2014; Digital Twins in Construction.)

3.5 Haasteet

Tekniset haasteet

Digitaalisten kaksosten käyttöönottoa hidastavat tekijät voidaan jaotella kahteen päätekijään, sosiaalisiin ja teknisiin haasteisiin. Pääosan haasteista on tunnistettu olevan luonteeltaan teknisiä. (Ato Ghansah 2024: 15.)

Kaksosmallien suunnittelu, kehitys ja käyttöönotto on toistaiseksi jäsentelemättömän prosessi, eikä toteutukselle ole vakiintuneita käytäntöjä tai yleisesti hyväksyttyä ohjeistusta ohjaamaan toteuttajia läpi kehitys- ja käyttöönottoprosessin. Järjestelmällisen toteutuksen puute voi aiheuttaa digitaalisten kaksosten jäämisen yksittäisiin projekteihin, ja mallin integroiminen muihin järjestelmiin voi olla puutteellista. (Ato Ghansah 2024: 17.)

Haasteellisena ongelmana esiintyy myös teknologioiden välisen datan integroiminen kaksosmalliin erilaisissa muodoissaan. Tiedot on usein tallennettu useaan eri tietovarastoon keskenään eri muodossa, mikä vaikeuttaa yhtenäisen ja luotettavan tiedon saamista kaksosmallin käyttöön. Eri muodoissa tallennettu tieto hankaloittaa myös tietojen synkronointia sekä mallin ja kohteen välistä palautesilmukoiden ylläpitoa. (Aldabbas 2023; Feng ym. 2021.)

Datan kerääminen kaksosmallin käyttöön vaatii huomattavan määrän antureita, jotka keräävät datan kohteesta. Anturien suuri määrä vaikuttaa suoraan

kohteen ylläpitoon kasvaneena työmääränä rakennusten oletetun pitkän käyttöiän myötä. (Feng ym. 2021.)

Mittaukseen käytettävä suuri määrä antureita voi tuottaa mitattavasta suureesta päällekkäistä dataa, mikä on tunnistettava ja hallittava eri järjestelmäosien välillä. (Ato Ghansah 2024: 16.)

Sosio-ekonomiset haasteet

Digitaalisten kaksosten kehittäminen muodostaa alkuvaiheessa huomattavia kehitys- ja integraatiokustannuksia, jotka voivat olla este uuden teknologian käyttöönotolle. Rakennusalalla ja kiinteistökehityksessä kustannustehokkuus on merkittävä kannattavuuden ja menestyksen mittari, eivätkä uuden teknologian takaisinmaksuaika ja investointikustannukset välttämättä kohtaa. (Ato Ghansah 2024: 17.).

Kaksosmallin toteuttaminen vaatii järjestelmällistä yhteistyötä ja selkeää kommunikaatiota mallin toteuttajien ja käyttäjien välillä. Käyttäjien tarpeet ja vaatimukset voivat olla jatkuvasti muuttuvia, mikä lisää toteuttajien työmäärää sekä vaikeuttaa toteuttajien työtä ja täten vaikuttaa järjestelmätoteutuksen kustannuksiin. (Ato Ghansah 2024: 17.)

Reaaliaikainen tiedonsiirto reaali maailman ja kaksosmallin välillä sekä suuren datamäärän käsittely vaativat merkittävän määrän laskentatehoa ja ylläpityötä, mikä kasvattaa kaksosmallien kustannusrakennetta merkittävästi. (Aldabas 2023; Feng ym. 2021.)

Keskitetty kaksosmallit ovat myös riskitekijä kyberhyökkäyksien ja tietoturvan osalta, jolloin myös datan suojaaminen ja ihmisten yksityisyys ovat tärkeässä roolissa kaksosmallien käyttöönoton huomioimisessa (Feng ym. 2021). Digitaalisten kaksosten haavoittuvuus korostuu erityisesti IoT-järjestelmien (Internet of Things) taustajärjestelmissä, web-käyttöliittymissä ja fyysisissä laitteistoissa (Li ym. 2020).

Kaksosmallien käyttöönottoa hankaloittaa myös puute henkilöstöstä, jolla on riittävä osaamistaso mallin tarjoaminen tietojen ja analytiikan tehokkaaseen hyödyntämiseen (Kaewunruen ym. 2021.). Nykyhetkellä henkilöstön osaamisen ja kaksosmallien välillä on huomattava osaamiskuilu, mikä on kurottava umpeen täydennys- ja uudelleen koulutuksella (Skills and Competencies for the National Digital Twin).

3.6 Toteutettuja kohteita

University of Cambridge, Englanti

Cambridgen yliopiston Institute for Manufacturing rakennukselle on laadittu pilotointivaiheen digitaalinen kaksonen, mikä on liitetty rakennuksen olemassa oleviin kiinteistönhallinta- ja omaisuudenhoitojärjestelmiin. Kiinteistönhallintajärjestelmällä hallinnoidaan muun muassa rakennuksen ilmanvaihtoa, lämmitystä, sähköjärjestelmiä sekä turvallisuuslaitteistoa. Omaisuudenhoitojärjestelmällä ylläpidetään tietoa suoritetuista huolto- ja ylläpitotoimenpiteistä, joita rakennukselle on suoritettu. (Lu ym. 2020.)

Rakennuksen digitaaliseen kaksoseen on toteutettu pumppujen toimintapoikkeamien havainnointijärjestelmä, olosuhdeseuranta tiloille, huoltotoiminnan optimointijärjestelmä, huoltojen sekä korjausten priorisointityökalu ja energiankulutusta ennakoiva järjestelmä (Lu ym. 2020).

Toteutetulla pumppujen toimintapoikkeamia tunnistavalla järjestelmällä pystyttiin havaitsemaan pysähtymisen lisäksi poikkeavia värinäarvoja, mitkä voivat auttaa tunnistamaan vikatilanteita (Lu ym. 2020).

Huoltotoiminnan optimointiin käytettiin koneoppimisalgoritmeja, joihin syötettiin biomassaboilerista kiinteistönhallintajärjestelmällä kerättyä dataa ja huolto- sekä vikatilalokeja. Algoritmien avulla kohteeseen saatiin luotua järjestelmä, mikä ennakoiki boilerin vikatiloja, jotka aiheuttavat lämpötilan laskemisen boilerissa. (Lu ym. 2020.)

i4Helse ja Tvedestrand -lukiot, Norja

i4Helsen ja Tvedestrandin lukiorakennuksia on käytetty digitaalisen kaksosen toteutuksen testaamiseen. Molempiin rakennuksista on asennettu jälkiasennuksena useita sensoreita, jotka keräävät rakennuksista esimerkiksi lämpötilasta, ilmanpaineesta sekä ilman virtaamasta dataa ja lähettävät nämä rakennuksen tietomallin käyttöön. Rakennuksille on laadittu järjestelmät muun muassa vikaantumisen tunnistamiseen ja huoltotarpeen ennakointiin. (Hosamo ym. 2023.)

Vikaantumisen tunnistava järjestelmä esittää kunkin seuratun taloteknisen järjestelmän aktiivisen tilan, jota verrataan aiemmin kerättyihin vikatilannetietoihin. Toteutuksella havaittiin useita virhetilanteita, kuten samanaikainen lämmitys ja jäähdytys, moottoriventtiilin jumiutuminen, paine-eroantureiden irtikytkentä ja ilmanvaihtokoneen käynti ilmapirran ollessa liki olematon. (Hosamo ym. 2023.)

Huoltotarvetta ennakoiva järjestelmä koulutettiin käyttäen testikohteista kerättyä dataa. Ennakoivalla järjestelmällä ennusteen tarkkuuden havaittiin olevan 97-prosenttisesti oikein, kun tunnistamiseen käytettiin neuroverkkoja. Testin perusteella havaittiin, että huoltotarpeeseen voidaan järjestelmän avulla varautua etukäteen, mikä parantaa huollon resurssien käyttöä. (Hosamo ym. 2023.)

Shanghai East Hospital, Kiina

Shanghaissa, Tongjin yliopistolliselle sairaalalle, on toteutettu digitaalinen kaksosen, joka on vuonna 2020 julkaistun tutkimuksen mukaan ollut aktiivisesti ylläpitokäytössä yli vuoden. Kaksosmalliin on integroitu energiankulutuksen seuranta kattaen veden- ja sähkönkulutuksen, huoltotoimien seuranta, tilankäyttöseuranta ja rakennuksen yleinen hallintanäkymä. (Peng ym. 2020.)

Kiinteistön toiminnan seurantajärjestelmästä kerättävällä datalla voidaan todentaa automaattisesti esimerkiksi poikkeavia sähkötalustilanteita ja ennustaa ilmanvaihtojärjestelmien vikatilanteita. (Peng ym. 2020.)

Kohteelle on toteutettu huoltotoiminnasta saatujen tietojen pohjalta järjestelmä, jolla ryhmitellään huoltotyöt luonteessa mukaan kategorioihin, jolloin

kategorisoinnin mukaan voidaan tunnistaa esimerkiksi toistuvia huoltotöitä. Esimerkkitapauksessa vioittuneista hanoista löydettiin yhteiseksi tekijäksi sama valmistaja, ja tämän perusteella hanat korvattiin toisen valmistajan tuotteilla. Vaihdoilla varmistettiin sairaalan normaalin päivittäistoiminnan jatkuvuus. (Peng ym. 2020.)

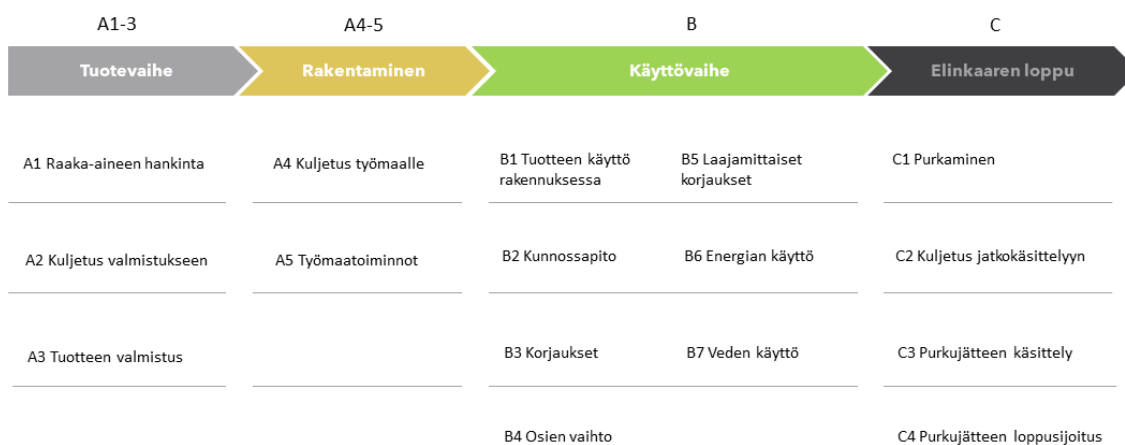
Ilmanvaihtolaitteiston vikatilanteita ennustetaan neuroverkkototeutuksella, mikä vertaa nykytilasta saatua dataa historiadataan ja tunnistaa aiemmin havaittujen poikkeamien perusteella mahdollisia vikatilanteita. Mikäli vikaantumistodennäköisyyden raja-arvo ylittyy datavertailun perusteella, antaa järjestelmä ennakkovaroituksen mahdollisesta vikatilasta, jotta ongelmiin voidaan reagoida ajoissa. (Peng ym. 2020.)

Tulosten perusteella kohteeseen toteutettu digitaalinen kaksonen on madaltanut vuosittaista kokonaisenergiankulutusta noin prosentilla, vähentänyt vikatilanteita ja korjauksia yli kymmenellä prosentilla sekä lisännyt kiinteistönhallinnan tyytyväisyyttä kymmenellä prosentilla. (Peng ym. 2020.)

4 Kiinteistöhallinta

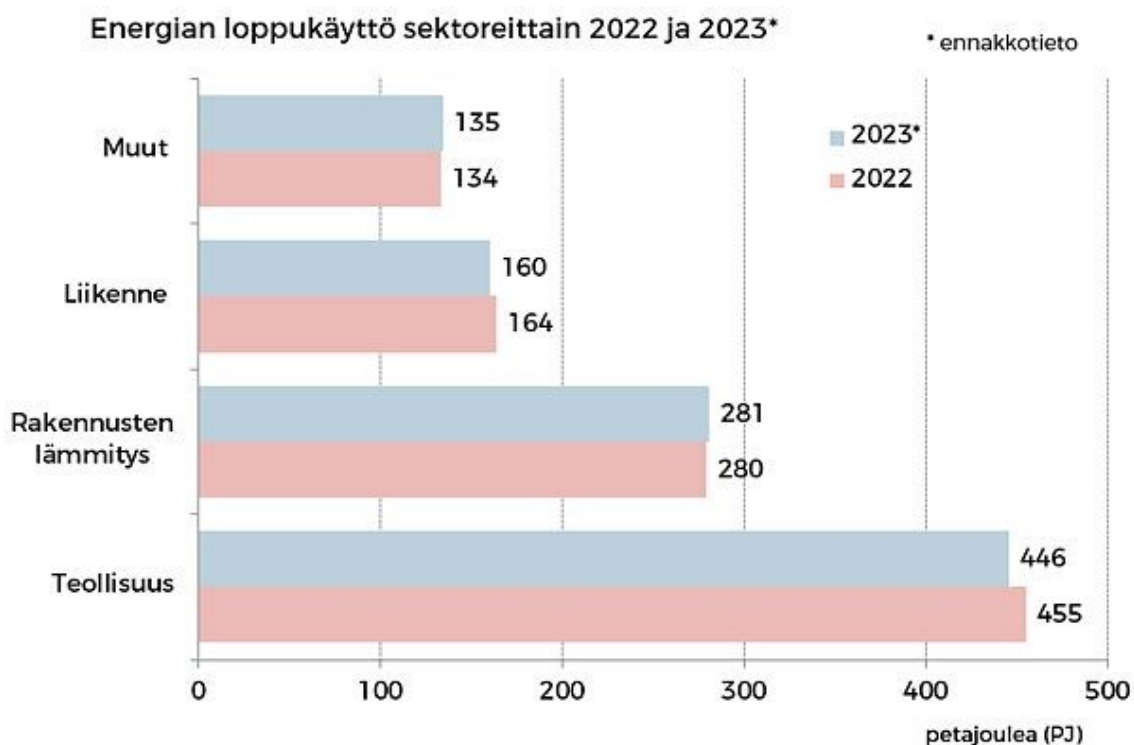
4.1 Hiilijalanjälki ja energiankulutus

Kiinteistön elinkaaren hiilijalanjäljen muodostuminen voidaan jakaa neljään osaan: tuotevaihe (A1–3), rakentaminen (A4–5), käyttövaihe (B1–7) ja elinkaaren loppuvaihe (C1–4). Vaiheiden sisällöt on esitetty yksityiskohtaisesti kuvassa 5. (Mistä rakennusten hiilijalanjälki koostuu?)



Kuva 5. Rakennuksen hiilijalanjäljen muodostuminen (Mistä rakennusten hiilijalanjälki koostuu?).

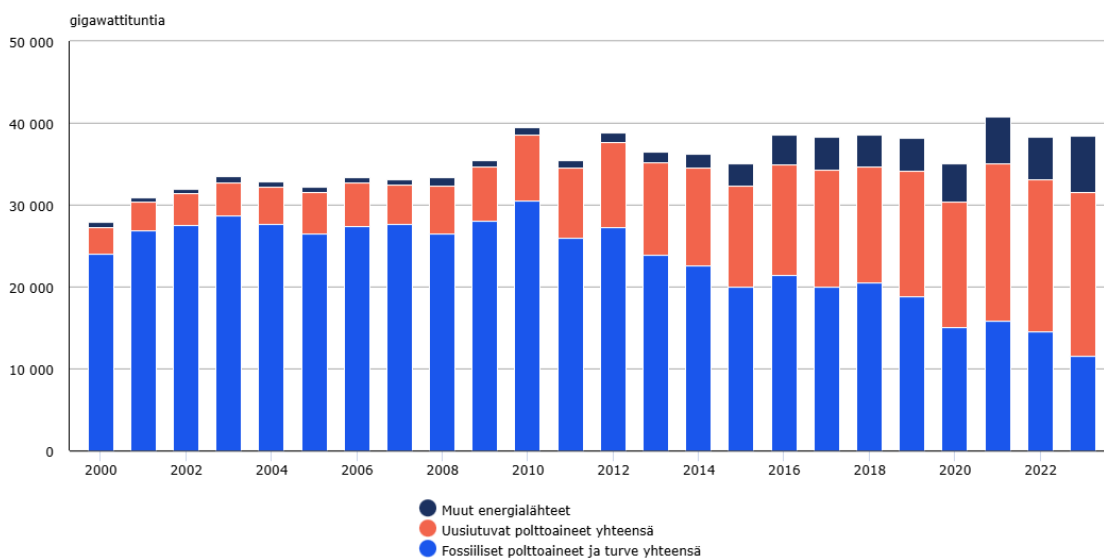
Rakennusten suurin päästölähde on tällä hetkellä prosentuaalisesti käyttövaiheen energiankulutus, mikä muodostuu käytetystä sähköstä, kaukolämmöstä ja erillislämmityksestä, muodostaen jopa noin 64 prosenttia rakennuksen elinkaaren päästöistä (Mistä rakennusten hiilijalanjälki koostuu?). Motivan laatiman tau-lukon (kuva 6) mukaan vuonna 2023 rakennusten lämmitykseen on kulunut 281 petajoulea energiaa, mikä yksikkömuunnoksen kautta vastaa noin 78,1 terawat-tituntia kulutettua energiaa.



Kuva 6. Energian loppukäyttö sektoreittain 2022 ja 2023 (Energian loppukäyttö 2024).

Suomessa rakennusten lämmittämiseen kului käytetystä energiasta noin 27,5 prosenttia vuonna 2023, mikä aiheutti merkittävän osan rakennetun ympäristön kasvihuonekaasupäästöistä. Rakennusten energiankulutuksessa on suuri säästöpotentiaali automaatiojärjestelmillä ja taloteknisten järjestelmien säädöllä (Energiatehokkuus.). Kaukolämpöä on Suomessa Tilastokeskuksen julkaiseman taulukon (kuva 7) mukaan tuotettu vuonna 2023 noin 38 500 gigawattituntia (Kaukolämmön tuotanto polttoaineen mukaan 2000–2023 2024.).

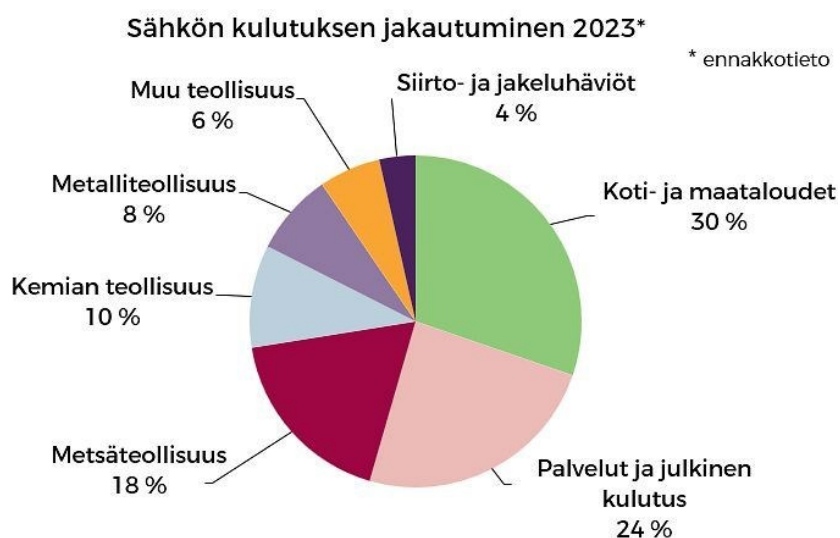
Kaukolämmön tuotanto polttoaineen mukaan 2000-2023



Lähde: Tilastokeskus, sähkön ja lämmön tuotanto

Kuva 7. Kaukolämmön tuotanto polttoaineen mukaan 2000–2023 (Kaukolämmön tuotanto polttoaineen mukaan 2000–2023 2024).

Motivan julkaisun mukaan sähkön kokonaiskulutus Suomessa vuonna 2023 oli 79,8 terawattituntia, josta Motivan julkaiseman taulukon (kuva 8) mukaan koti- ja maataloudet muodostivat 30 % ja palvelut ja julkinen kulutus 24 %, muodostaen noin 41,1 terawattituntia kokonaissähkönkulutuksesta. (Sähkön hankinta ja kulutus 2024).

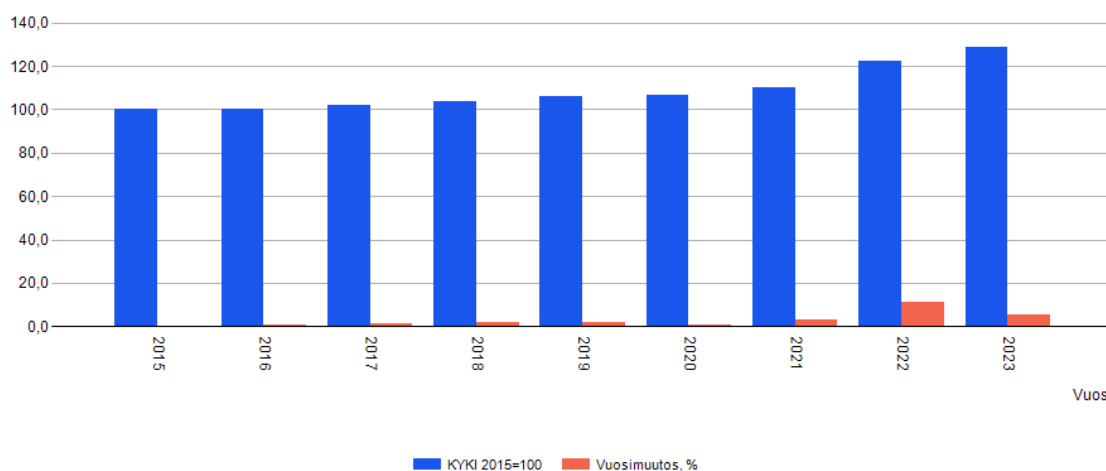


Kuva 8. Sähkön kulutuksen jakautuminen 2023 (Sähkön hankinta ja kulutus 2024).

4.2 Kustannukset

Tilastokeskuksen laatiman kuva 9 mukaan kiinteistöjen kokonaisylläpitokustannukset ovat olleet kasvusuhdanteessa, kun kuluttajahintaindeksin perusvuosi on 2015. Kustannukset ovat nousseet selvästi nopeammin vuodesta 2021 lähtien.

Kiinteistön ylläpidon kustannusindeksi rakennustyypeittäin (2015=100) muuttujina Tiedot ja Vuosi.

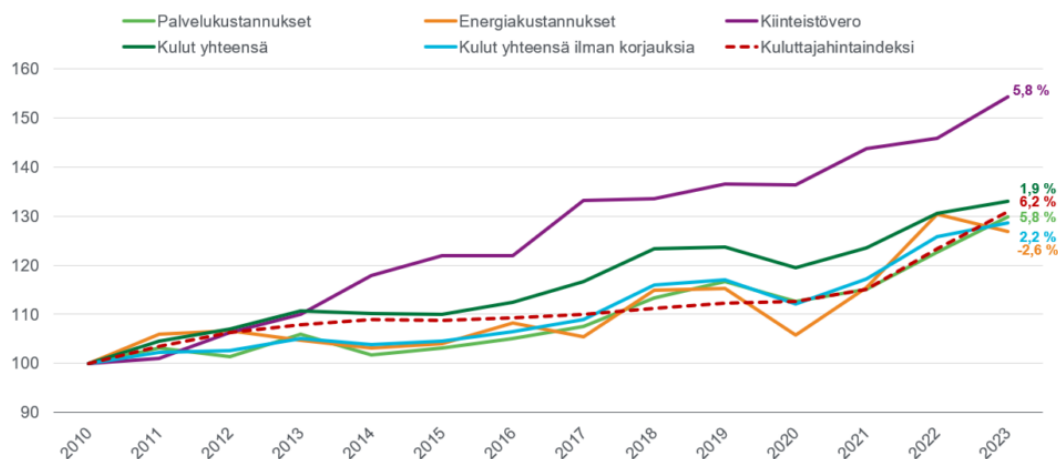


Kuva 9. Kiinteistöjen ylläpidon kustannusindeksi rakennustyypeittäin (2015=100) (Tilastokeskus).

Vuosittaisia raportteja julkaisevan KTI Kiinteistötiedon mukaan vuoden 2021 aikana asuinkiinteistöjen ylläpitokustannukset kasvoivat edellisvuodesta 4,4 % ja toimistokiinteistöjen 4,8 %. Vuoden 2022 aikana asuinkiinteistöjen ylläpitokustannusten nousu tasoittui hieman, kun kustannukset kasvoivat 2,8 %. Toisaalta toimistokiinteistöjen ylläpitokustannukset saavuttivat samaan aikaan 6,1 % kasvutahdin. Vuonna 2023 asuinkiinteistöjen ylläpitokustannuksissa oli 3 % nousu ja toimistokiinteistöissä 1,9 % nousu. Suurena tekijänä kustannusten nousussa on ollut energiakustannusten selkeä kasvu vuodesta 2021 alkaen (kuva 10). Vuosina 2022 ja 2023 myös käyttö- ja huoltokustannukset sisältävä palvelukustannukset on ollut selvässä nousussa erityisesti toimistokiinteistöissä (kuva 10). (KTI Ylläpitokustannusindeksit 2022; KTI Ylläpitokustannusindeksit 2023; KTI Ylläpitokustannusindeksit 2024.)

Ylläpitokustannusten kehitys, koko Suomi

Toimistot, indeksi 2010=100 (viimeisimmät vuosimuutokset käyrien vieressä)



Lähde: KTI ja Tilastokeskus

Kuva 10. Ylläpitokustannusten kehitys, toimistot (KTI Kiinteistötieto).

4.3 Säästöpotentiaali

Rakennuskannan säästöpotentiaalista on saatavilla arvioiteja ja selvityksiä, jotka on luotu lukuisin erilaisin parametrein näkökulmien mukaan, mistä esimerkkinä Valtioneuvoston vuonna 2018 julkaisema Kuntien rakennuskannan kehitys- ja säästöpotentiaali -tutkimus, jossa esitetään kuntien energiakustannusten olevan vuositasolla noin 900 miljoonaa euroa, sisältäen lämpö-, sähkö-, vesi- ja jätevesikulut. Ilman investointeja arvioidaan olevan mahdollista saavuttaa noin 3 prosentin säästö energiankulutuksessa muodostaen noin 27 miljoonan euron säästön (Korhonen ym. 2018: 49, 84).

Ilmasto-opas.fi -sivustolla julkaistussa artikkelissa mainitaan kuntien keskimääräiseksi energiakustannusten säästöpotentiaaliksi 13 %, joka on tunnistettu energiakatselmuksilla kuntaomisteisissa kiinteistöissä (Energiatehokkuuden parantaminen tuo kunnille säästöjä 2020).

VTT:n, Aalto Yliopiston ja Trondheimin teknillisen yliopiston yhteistyössä tekemän tutkimuksen perusteella taloteknisten järjestelmien kulutusjoustolla ja malliprediktiivisellä säädöllä saavutettiin 1970-luvulla rakennetussa kerrostalossa

29,9 % energiakustannussäästö ja vuonna 2023 rakennetussa plusenergiakerrostalossa 14,8 % energiakustannussäästö verrattuna talotekniikkajärjestelmien tavanomaiseen PI-säätöön. (Ramesh ym. 2024: 4, 14–15.)

Käyttäen esimerkkilukuina Motiva Oy:n julkaisemaa vuoden 2023 rakennusten lämmitysenergian kulutusta 281 petajoulea ja Valtioneuvoston vuonna 2018 julkaisemaa maltillista 3 % potentiaalisen säästön lukemaa saadaan säästöksi 8,43 petajoulea, joka vastaa noin 2,43 terawattituntia. Esimerkkilaskelmassa tulee huomioida kuntien omistaman rakennuskannan tilaston olevan vuodelta 2006, lämmitysenergiankulutuksen lukemien vuodelta 2024 ja laskelman perustuvan arvioihin. (Energian loppukäyttö 2024; Korhonen ym. 2018: 5, 84.)

Edellä kuvattujen lähdetietojen perusteella energiatehokkuuden parantamisen kautta on mahdollista saavuttaa huomattavia kustannussäästöjä. Talotekniikan näkökulmasta erityisesti panostamalla tehokkaampien säätö- ja energiankulutusmallien käyttöönottoon on energiankulutuksessa mahdollista saavuttaa suuria säästöjä.

5 Ohjaavat tekijät

5.1 Rakentamislaki 751/2023

Rakentamislain 60. §:ssä määritellään rakennuksesta laadittavaksi tietomallimuotoiset suunnitelmat sekä tietomallin sisältämän tiedon minimivaatimukset seuraavasti:

Rakennuksen tietomallimuotoisella suunnitelmalla tarkoitetaan rakennuksen tietojen kokonaisuutta koneluettavassa ja yhteentoimivassa tietorakenteessa sisältäen rakennuksen sijainnin, geometrian ja muodon kolmiulotteisena mallina sekä tiedot rakennuksesta. Rakennuksen suunnitelman (*suunnitelmamalli*) rakennuskohdetiedot sisältävät pääasialliset tiedot rakennuksesta ja rakennusosista ja niiden ominaisuuksista. (Rakentamislaki, 2023.)

Lisäksi valmistuneen kohteen suunnitelmista on kirjattu lain 60. §:ssä seuraavasti:

Rakennuksen toteutusta vastaavan suunnitelman (*toteumamalli*) rakennuskohdetiedot sisältävät tiedot toteutuneesta rakennuksesta mukaan lukien suunnitelmamallista poikkeavat tiedot sekä pääasialliset tiedot rakennustuotteista ja niiden ominaisuuksista. (Rakentamislaki, 2023.)

Rakentamislaki asettaa myös erityissuunnittelualoille täytettäviä ehtoja, kuten:

Erityissuunnittelijan on päivitettävä rakennuskohteen suunnitelmalleina tai muutoin koneluettavassa muodossa olevat erityissuunnitelmat toteumamalliksi vastaamaan toteutettua rakennuskohdetta päävastuullisen toteuttajan ilmoituksen mukaisesti. Lisäksi hänen on laadittava 139 §:n mukainen rakennuksen käyttö- ja huolto-ohje oman erityisalansa osalta. (Rakentamislaki, 2023.)

Rakentamislain määräysten mukaiset vaatimukset asettavat tietomallien toteutamiselle perustason. Tietomallien, kuten toteumamallin, pohjalta luotavien kaksoismallien kehittämistä voidaankin ohjata kohti yhteistoiminnallisempaa toteutustapaa seuraamalla rakentamislakia.

5.2 Yleiset tietomallivaatimukset 2012

Rakentamislakia täydentää Yleiset tietomallivaatimukset 2012 -dokumentti, jossa määritellään julkisten hankkeiden tietomallitoteutusten vaatimukset lakia tarkemmalla tasolla. Dokumentti määrittelee eri tietomallivaiheiden ja erikoissuunnittelualojen mallien tietosisällön sekä toteutustavan. (Yleiset tietomallivaatimukset 2012 Osa 1: 1–10.)

Yleiset tietomallivaatimukset 2012 Osa 12 käsittelee tietomallien käyttöä rakennuksen käyttö- ja ylläpitovaiheen aikana. Osassa 12 kuvataan useita ylläpidollisesta mallista saatavia hyötyjä, kuten

- tehostettu tiedonhallinta
- energiatavoitteiden simulointi
- ympäristötavoitteiden simulointi
- raportoinnin laadinta. (Yleiset tietomallivaatimukset 2012 Osa 12: 2.)

Yleisten tietomallivaatimusten päivittämisestä vastaamaan nykyisiä tarpeita on päätetty 4.2.2021, mutta päivitysversiolle ei ole annettu julkaisupäivää (YTV2020 -päivityshanke osaksi kansallista yhteentoimivuuden määrittelyä! 2021). Tietomallivaatimusten päivittämisen tarpeellisuutta on korostanut useat alan toimijat, joista yhtenä konetekniikan tohtori Esa Halmetoja blogikirjoituksessaan Tietomallivaatimusten päivitys on tarpeellinen vuonna 2021.

5.3 Fit for 55-valmiuspaketti

Euroopan unioni on laatinut kasvihuonekaasujen nettopäästöjen vähentämiseksi Fit for 55-valmiuspaketin, jonka tavoitteena on laskea kasvihuonekaasujen päästöjä minimissään 55 % vuoteen 2030 mennessä. Paketin sisältö koskettaa liki kaikkia toimialoja, mukaan lukien rakentaminen ja rakennusten ylläpito. (55-valmiuspaketti.)

5.4 Rakennusten energiatehokkuusdirektiivi EU/2024/1275

Fit for 55-valmiuspaketin täydennykseksi on laadittu päivitetty energiatehokkuusdirektiivi EU/2024/1275, mikä tarkentaa uusien ja olemassa olevien rakennusten energiankulutus-, hiilipäästö- ja pienhiukkaspäästövaatimuksia. Suomen lainsäädännölliset muutokset direktiivin täyttämiseksi on tehtävä 29. toukokuuta 2026 mennessä. (EU/2024/1275; Rakennusten energiatehokkuusdirektiivin uudistus.)

Energiatehokkuusdirektiivissä määritellään muun muassa seuraavia määrääviä päästövähennysvaatimuksia:

- kaikki uudet rakennukset on oltava päästöttömiä 2030
- kaikki olemassa olevat rakennukset on oltava päästöttömiä 2050
- kaikkien muiden kuin asuinrakennusten energiankulutuksen on oltava vuonna 2030 16 % ja vuonna 2033 26 % kuin energiatehokkuudeltaan heikommilla rakennuksilla
- kaikkien asuinrakennusten keskimääräisen primäärienergiakulutuksen tulee laskea 16 % vuoteen 2030 mennessä ja 20–22 % vuoteen 2035 mennessä. (55-valmiuspaketti: tehdään rakennuksista ympäristöystävällisempiä.)

Voimassa olevan Pitkän aikavälin korjausrakentamisen strategian 2020–2050 korvaavan rakennusten perusparannussuunnitelman laadinta on käynnistetty ympäristöministeriössä. Ympäristöministeriö laatii uuden perusparannussuunnitelman vastaamaan energiatehokkuusdirektiivin EU/2024/1275 vaatimuksiin ja määrittelee toimenpiteet, millä vaatimustenmukaiset päästövähennykset saadaan toteutettua. (Kansallisen perusparannussuunnitelman laatiminen, 2024.)

6 Haastattelututkimus

Luvussa kuvataan haastattelututkimuksen toteutustapa, haastattelukysymysten asettelu sekä haastattelukysymyksiin saadut vastaukset. Haastattelujen vastaukset on koostettu kysymyksittäin ja kysymyskohtaisesti on laadittu koostava tulkinta vastauksista. Haastatteluvastausten tarkempi tulkinta on laadittu viimeisen väliotsikon alle.

6.1 Haastatteluprosessi

Haastattelututkimuksen toteuttamiseksi tehtiin ensisijaisesti lukuisia yhteydenottoja rakennusalalla ja rakennusalan parissa toimiviin yrityksiin, jotka ilmoittavat verkkosivuillaan tai muussa materiaalissaan toimivansa digitaalisten kaksosten parissa tai vähintään selvittävän digitaalisten kaksosten käyttömahdollisuuksia alalla. Tämän lisäksi yhteydenottoja tehtiin kotimaisiin oppilaitoksiin, jotka voisivat mahdollisesti tarjota objektiivisemmän näkökulman digitaalisten kaksosten hyötyihin, käyttötapoihin ja toteutukseen.

Haastattelukutsuja lähetettiin kolmelletoista henkilölle, joista haastattelu järjestettiin kymmenen kanssa. Haastatteluun vastanneista neljä toimii suunnittelu- ja konsultointitehtävissä, kaksi tietomallien kehitystehtävissä, kaksi kiinteistöomistajan tietomallien asiantuntijatehtävissä, yksi urakoinnissa tietomalli-insinöörinä ja yksi rakennusvalvontaviranomaisena. Haastattelut järjestettiin aikavälillä syyskuu – marraskuu 2024.

Kaikki haastattelutilanteet järjestettiin yksilöhaastatteluina kasvotusten tai videoyhteyden välityksellä. Haastateltaville ei tarjottu mahdollisuutta tutustua haastattelukysymyksiin etukäteen ennen haastattelutilaisuutta, jotta vastaukset pysyisivät mahdollisimman kokempohjaisina. Kaikista haastattelutilanteista kirjattiin erilliset muistiinpanot ja laadittiin haastattelukohtainen yhteenveto, johon on koottu kysymyksittäin keskeiset vastaukset.

6.2 Haastattelukysymykset

Haastattelutilanteessa haastateltavalle esitettiin seuraavat kysymykset seuraavaksi esitetyn järjestyksen mukaisesti:

- Kuinka määrittelisitte digitaalisen kaksosen käsitteen?
- Oletteko ollut mukana projektissa, jossa toteutettiin digitaalinen kaksosen? Missä?
- Kuinka digitaalinen kaksosen voi mielestänne auttaa kiinteistön ylläpitotarpeen ennakoinnissa ja huoltotarpeen tunnistamisessa?
- Kuinka digitaalinen kaksosen voi mielestänne auttaa pienentämään hiilijalanjälkeä ja edistää talotekniikan energiatehokkuutta?
- Oletteko tavannut ongelmatilanteita, jotka ovat vaikeuttaneet digitaalisten kaksosten käyttöönottoa?
- Kuinka näette digitaalisten kaksosten käytön talotekniikassa kehittyvän tulevaisuudessa?

Haastattelukysymykset esitettiin kaikille vastaajille samassa muodossa riippumatta heidän roolistaan ja työtehtävästään. Vastaukset pyrittiin näin pitämään mahdollisimman tarkasti haastattelun teeman sisällä. Vastausten haluttiin antavan kattavan käsityksen, kuinka digitaalinen kaksosen nähdään, tunnetaan ja ymmärretään talotekniikan alalla. Haastattelujen edetessä esitettiin tarpeenmukaisesti tarkentavia lisäkysymyksiä, joilla varmistettiin vastaus ymmärretyksi haastateltavan tarkoittamalla tavalla. Tarkentavat kysymykset pyrittiin esittämään niin, että kysymyksen asettelu ei ohjaisi haastateltavan vastausta.

6.2.1 Digitaalisen kaksosen määrittely

Kysymyksen tavoitteena oli selvittää, kuinka haastateltavat ymmärtävät ja tuntevat digitaalisen kaksosen käsitteenä ja saada selville, mikäli haastateltavilla on näkemyksiä digitaalisesta kaksosesta, jotka poikkeavat Michael Grievesin esittämästä konseptista tai tarkentavat sitä.

Seitsemän haastateltavista piti digitaalisen kaksosen yleisesti oppikirjamääritelmänä pidettyä määritelmä jossain määrin ongelmallisena, koska määritelmä ei

välttämättä aina vastaa toteutettavan digitaalisen kaksosen käyttötarkoitusta tai käyttäjän tarvetta.

Haastateltavista kaksi esitti, että digitaalinen kaksonen voitaisiin esittää myös ilman kolmiulotteista näkymää mallinnettavasta objektista, kun kerätty data esitetään jossakin muussa saman informaation välittävässä muodossa.

Haastateltavien antamien vastauksien pohjalta kaikkien näkemys digitaalisesta kaksosesta noudattaa läheisesti Michael Grievesin esittämää konseptia, jonka mukaan digitaalisen mallin ja fyysisen objektin tulee vastata toisiaan niin muodoiltaan kuin ominaisuuksiltaan sekä kyetä kahdensuuntaiseen automaattiseen tiedonsiirtoon.

6.2.2 Toteutetut digitaaliset kaksoset

Kysymyksellä haluttiin saada tietoa, kuinka aktiivisesti vastaaja on ollut mukana toimimassa digitaalisten kaksosten parissa. Jatkokysymyksellä ”Missä?” pyrittiin selvittämään, minkä tyyppisissä projekteissa vastaaja on ollut mukana, jotta pystyttiin muodostamaan käsitys, minkä tyyppisistä kohteista digitaalisia kaksosia on luotu.

Saatujen vastausten perusteella yhdeksän kymmenestä vastaajasta on ollut mukana toteuttamassa digitaalisia kaksosia erityyppisille projekteille ja eri käyttötarkoituksiin.

Digitaalisia kaksosia on toteutettu vastausten perusteella yksityisille kiinteistönomistajille, kunnallisille toimijoille ja yritysasiakkaille. Toteutetut digitaaliset kaksoset ovat vastaajien mukaan vaihdelleet yksittäisten toimijoiden toimitiloista kokonaisuksi kiinteistöihin ja infrastruktuuritoteutuksiin. Valtaosa vastaajien esimerkeinä mainitsemista kohteista ja erityisesti toteutustavoista on liikesalaisuuden piirissä, mistä johtuen kohteista ei voida antaa tarkempia tietoja tässä kappaleessa.

6.2.3 Ylläpito ja huolto

Kysymyksen asettelulla pyrittiin saamaan vastauksia digitaalisen kaksosen mahdollisista käyttötavoista kiinteistön ylläpidollisiin tehtäviin sekä selvittämään, minkälaisissa tilanteissa digitaaliselle kaksoselle tunnistetaan hyötykäyttökohteita.

Reaaliaikaisen analytiikan roolia painotti viisi haastateltavaa. He mainitsivat erityisesti syy-seuraussuhteiden tunnistamisen helpottuvan reaaliaikaisen datan, kuten olosuhdemittausten, avulla. Poikkeavien arvojen havainnointi historiatiedon perusteella nähtiin myös hyödyllisenä huoltokohteiden tunnistamisessa. Kaksi haastateltavaa korosti myös tilannekuvan muodostamisen merkitystä kiinteistön nykytilan ymmärtämiseksi ja huoltotoimien oikea-aikaistamiseksi.

Ajantasaisen datan merkitystä korosti kolme haastateltavaa. Heidän mukaansa digitaalinen kaksonen mahdollistaa jatkuvasti päivittyvän tiedon hyödyntämisen, mikä parantaa ennakointia. Lisäksi automaattinen järjestelmä voi vähentää aktiivisen seurannan tarvetta, kun järjestelmä ilmoittaa käyttäjälle huoltotarpeista ja poikkeamista määritellyissä rajoissa. Samat kolme vastaajaa mainitsivat kaksosmallissa käytettävien tietojen ajantasaisuuden ja oikeellisuuden olevan merkittävän tärkeitä, jotta mallia voidaan hyödyntää tehokkaasti.

Kolme haastateltavaa nosti paikannettavuuden esiin kaksosmallin hyötynä. Heidän mukaansa digitaalinen kaksonen helpottaa vikaantumipaikkojen tunnistamista järjestelmän tarjoaman tiedon avulla ja mahdollistaa täsmällisemmät korjaustoimenpiteet. Yksi haastateltavista käytti esimerkkinä vesivuototilannetta, jossa järjestelmästä voi nopeasti paikantaa syöttöpisteen sijainti, mikä nopeuttaa reagointia ja voi rajoittaa vahingon laajuutta.

Kiinteistön ylläpitokustannuksia laskevista vaikutuksista mainitsi kolme haastateltavaa. Heidän mukaansa digitaalisen kaksosen avulla voidaan optimoida kiinteistön elinkaarikustannuksia seuraamalla järjestelmien toimintaa kokonaisuutena ja hyödyntämällä aiempaa dataa huoltotehtävien kohdentamisessa. Lisäksi

oikea-aikaiset huoltotoimenpiteet voivat haastateltavien mukaan vähentää huoltolta tarvittavia työtunteja ja materiaalikustannuksia.

Haastatteluvastausten perusteella digitaalisen kaksosen käyttö kiinteistön ylläpidossa vaatii käyttäjäorganisaatiolta sitoutumista mallipohjaiseen seurantaan ja uuden toimintatavan omaksumista, mutta se voi tarjota merkittäviä hyötyjä, kuten tarkempi huoltotarpeen ennakointi, ylläpidon tehtävien kustannussäästöt ja tehokkaampi huoltotoiminta, mitkä voivat merkittävästi tehostaa kiinteistönhallintaa ja madaltaa käytönaikaisia kustannuksia.

6.2.4 Hiilijalanjälki ja energiatehokkuus

Kysymyksellä pyrittiin selvittämään, kuinka digitaalinen kaksonen nähdään hyödynnettävänä työkaluna kiinteistön energiatehokkuuden parantamisessa ja tätä kautta hiilijalanjälkeen pienentävästi vaikuttavana välineenä kiinteistöhallinnassa.

Seitsemän haastateltavista korosti digitaalisen kaksosen roolia energiankulutuksen seuranta- ja optimointityökaluna. Kaksosmallin avulla voidaan tunnistaa poikkeamia ja kohdentaa toimenpiteitä oikeisiin järjestelmiin tai järjestelmäosiin. Haastateltavat mainitsivat lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien sekä ilmanvaihtojärjestelmän toiminnan seurannan, simulointien hyödyntämisen sekä tilakohtaisen käytönseurannan mahdollistavan energiankulutuksen pienentämisen ja järjestelmien oikea-aikaisen ja tarpeenmukaisen käytön. Kolme haastateltavaa mainitsi lisäksi lämpökarttatyyppisen tilakohtaisen seurantajärjestelmän käyttämisen ja olosuhdepoikkeamaseurannan merkityksen energiahävikin tunnistamisessa.

Kuusi haastateltavista mainitsi suunnitteluajankaisen digitaalisen kaksosen avulla voitavan vaikuttaa positiivisesti kiinteistön hiilijalanjälkeen laskemalla materiaali-pohjaisia päästövaikutuksia, mikä edistää parempien valintojen tekemistä. Kolme haastateltavaa nosti esiin digitaalisen kaksosen hyödyntämisen jo suunnitteluvaiheessa, jolloin eri toteutusvaihtoehtoja voidaan simuloida ja arvioida niiden kokonaisvaikutuksia tehokkaasti. Kaksi haastateltavista painotti

digitaalisen kaksosen merkitystä rakennusten pitkäjänteisessä suunnittelussa. Heidän mukaansa digitaalisella kaksosella voidaan varmistaa kiinteistön toiminnan ennakoitavuus ja energiatehokkuuden kehittäminen pitkällä aikavälillä.

Kuuden vastaajan mukaan käytönaikaisella digitaalisella kaksosella voidaan seurata kiinteistön hiilijalanjälkeä kokonaisuutena läpi kiinteistön käyttöiän ja vaikuttaa hiilijalanjälkeen laskevasti energiatehokkuusoptimoinneilla.

Yksi haastateltava nosti esiin ESG-vaatimukset, joiden seuranta ja dokumentaatiota oikein toteutetulla digitaalisella kaksosella on mahdollista tehdä. Haastateltavan mukaan digitaalisella kaksosella voidaan parantaa energiatehokkuustoimenpiteiden ja hiilijalanjäljen seuranta pitkällä aikavälillä toteuttaen ESG-seurannan vaatimukset.

Haastatteluvastausten perusteella digitaalinen kaksonen voi olla keskeinen työkalu sekä kiinteistön energiankulutuksen optimoinnissa että hiilijalanjäljen pienentämisessä oikein määriteltynä ja käytettynä. Digitaalinen kaksonen mahdollistaa tietoon perustuvan päätöksenteon, energiankulutuksen kohdentamisen ja kiinteistön pitkäaikaisen kestävä hallinnan. Erityisesti järjestelmien oikea-aikainen ja tehokas käyttö sekä energiankulutuksen kohdentaminen nähtiin merkittävänä keinoina säästää energiaa. Vastausten perusteella reaaliaikaiseen ja historiadataan perustuva analyysi mahdollistaa niin saavutettujen hyötyjen todentamisen kuin mahdollisten ongelmapaikkojen tunnistamisen ja poikkeamien havaitsemisen.

6.2.5 Ongelmat ja haasteet

Kysymyksen tavoitteena oli selvittää haastateltavien tunnistamia ratkaistavia ongelmatilanteita, jotta digitaalisia kaksosia voidaan hyödyntää kiinteistökannan ylläpidossa. Kysymyksen määrittely jätettiin tarkoituksella laajaksi, jotta vastaajilta saadaan mahdollisimman kattava otanta tunnetuista kehityskohteista.

Viisi haastateltavaa näki eri tietojärjestelmien yhteistoiminnan puutteen suurena haasteena. Datan integrointi ja eri järjestelmien yhdistäminen on monimutkaista,

erityisesti kun organisaatiolla on useita päällekkäisiä tai rinnakkaisia järjestelmiä käytössä jo ennestään.

Viisi haastateltavista korosti tiedon oikeellisuuden ja ajantasaisuuden haasteita. Tiedon määrän ja tarkkuuden hallinta mainittiin ongelmallisena. Vastausten perusteella liian vähäinen datamäärä voi johtaa epätäydellisiin analyyseihin, heikkoon ennustettavuuteen ja epävarmaan toimintaan, kun taas liian suuri datamäärä tekee järjestelmästä raskaan ylläpitää.

Viisi haastateltavaa nosti esiin käyttäjäorganisaatioiden suuresti vaihtelevan digitaalisen osaamisen tason esteenä käyttöönotolle. Vastausten perusteella monilla organisaatioilla ei ole riittävää teknistä osaamista digitaalisen kaksosen tehokkaaseen hyödyntämiseen eivätkä organisaatiot osaa aina tunnistaa kuinka järjestelmää voisi hyödyntää. Neljä haastateltavista toi vastakkaisena näkemyksenä esiin digitaalisen kaksosen käytön ja käyttöönottoon liittyvien prosessien monimutkaisuuden hidastavan teknologian omaksumista.

Neljä haastateltavista nosti esiin standardoinnin puutteen merkittävänä esteenä digitaalisen kaksosen laajalle käyttöönotolle. Heidän mukaansa tiedon laadun ja harmonisen tyyppityksen puutteet haittaavat merkittävästi järjestelmien toimintaa ja hallintaa. Lisäksi mallien käyttämien objektien toteutustapojen ja tietotyyppien epäyhtenäisyys aiheuttaa ongelmia järjestelmien yhteensopivuudessa ja tietojen hyödyntämisessä. Kaksi haastateltavaa korosti eri datamuotojen ja jatkuvasti muuttuvien tiedonsiirtoprotokollien aiheuttavan epäselvyyksiä ja jatkuvaa ylläpitotarvetta.

Neljä haastateltavista mainitsi tarkkojen kolmiulotteisten mallinnusten laatimisen työläänä. Kaksi haastateltavista mainitsi myös insinöörimäisen perfektionismin ongelmana. Heidän mukaansa malleille annetaan usein liian korkeita laatuvaatimuksia, mitkä voivat hidastaa käytännön sovellusten kehittämistä ja käyttöönottoa, eivätkä välttämättä vastaa käyttäjien tarpeeseen. Kaksi haastateltavista huomautti, että täydellistä tarkkuutta ei välttämättä aina tarvita ja mallien yksinkertaistaminen voisi madaltaa käyttöönoton kynnystä.

Kolme haastateltavista mainitsi erityisesti tietomallin jatkuvan ylläpidon tarpeen käyttöönottoa haittaavana tekijänä. Kaksosmalli vaatii jatkuvaa aktiivista ylläpitoa, jotta digitaalinen kaksosen ei muutu vanhentuneeksi, jolloin tavoitellut hyödyt jäävät saavuttamatta.

Kolme haastateltavista painotti tietoturvan olevan kriittisessä roolissa digitaalisten kaksosten käyttöönotossa. Vastausten perusteella kiinteistöomistajien erilaiset tietoturva-vaatimukset on huomioitava järjestelmien suunnittelussa ja toteutuksessa. Yksi haastateltava mainitsi lisäksi lainsäädännön haasteena, koska seurantalaitteiden ja -järjestelmien käyttö voi olla rajoitettua erityyppisissä kohteissa tai yksityisyyssyistä.

Kolme haastateltavista näki kustannukset suurimpana esteenä digitaalisen kaksosen käyttöönotolle. Haastateltavien vastauksien perusteella nykytilanteessa järjestelmien rakentaminen ja ylläpito on liian kallista, eivätkä monet kiinteistöomistajat ole valmiita investoimaan teknologiaan, jonka taloudellisesta hyödyistä ei ole vahvaa näyttöä. Yksi haastateltavista mainitsi digitaalisen kaksosen arvoa tuottavan käytön kehittämisen voivan olla hidasta ja kallista, mikä vaikeuttaa käyttöönoton perustelemista liiketoiminnallisesta näkökulmasta.

Haastateltavien vastauksien antaman kuvan perusteella digitaalisten kaksosten käyttöönottoa hankaloittaa monet haasteet, kuten standardoimattomat toteutustavat, harmonisoimaton monimuotoinen data, digitaalisen osaamisen puutteet sekä korkeat käyttö- ja kehityskustannukset. Kolmesta maininnasta huolimatta korkeiden kustannusten vaikutusta painotettiin suuresti.

6.2.6 Tulevaisuudenkehitys

Viimeinen kysymys asetettiin koskemaan talotekniikkaa kokonaisuutena, jotta vastaajat voivat antaa vapaasti näkemyksensä digitaalisen kaksosen tulevaisuuden kehityksestä hyödyntäen etenkin oman työnkuvansa tuomaa kokemusta digitaalisen kaksosen parissa.

Kolme haastateltavista uskoo tietomalleille, näiden käyttämälle tiedonsiirrolle sekä käytettäville tuotetiedoille muodostettavan standardoidun toteutustavan, mikä selkeyttää tietovirtojen käsittelyä ja samalla yksinkertaistaa kaksosmallien laatimista.

Kaksi haastateltavista esitti yleistyvän tietomallipohjaisen suunnittelun ajavan kehitystä myös kaksosmalleissa, kun mallipohjainen toteutus tulee tutummaksi kiinteistöomistajille, suunnittelijoille ja toteuttajille.

Kahden haastateltavan mukaan datan määrän kasvaessa ja kiinteistöomistajien vaatimusten lisääntyessä tekoälyn uskotaan tulevan olemaan merkittävässä roolissa suurten datamäärien käsittelyssä. Tekoälyn hyödyntämisen uskotaan tehostavan kiinteistöjen energiatehokkuuden hallintaa ja mahdollisten ongelmatilanteiden tunnistamista.

Kahden haastateltavan mukaan digitaalinen kaksonen ylläpitomallina tulee korvaamaan tai täydentämään nykyisiä huoltokirjatoteutuksia tulevaisuudessa. Yksi haastateltava mainitsi, että uskoo kasvavan mitattavien pisteiden määrän ja entisestään tarkentuvan mittauksen parantavan digitaalisten kaksosten käyttömahdollisuuksia kiinteistöjen ylläpidossa tulevaisuudessa.

Yhden haastateltavan mukaan digitaaliset kaksoset tulevat muovautumaan yksinkertaisempaan muotoon. Kaksosmallit tullaan hänen mukaansa tulevaisuudessa räätälöimään entistä paremmin käyttäjien tarpeisiin, mikä mahdollistaa kaksosmallin helpomman käytön ja täten madaltaa käyttöönottokynnystä.

Yksi haastateltavista näkee digitaalisen kaksosen tulevaisuutena mahdollisuuden toimia merkittävänä tietolähteenä kiinteistön kunnosta ja ylläpidosta kiinteistökaupan yhteydessä, kun kaksosmallia on ylläpidetty aktiivisesti läpi kiinteistön elinkaaren. Yksi haastateltavista mainitsi kiinteistön ESG-mittareiden seurannan olevan mahdollinen kaupallistettava kohde.

Vastausten perusteella digitaalisella kaksosella on nähtävissä useita erilaisia kehityskaaria, joista osa on vahvasti toisiinsa sidonnaisia. Tietomallipohjaisen

suunnittelun yleistymisen uskotaan vastauksien perusteella olevan myös digitaalisten kaksosten kehitystä vauhdittava tekijä, kun tietomallien toteuttamiselle määritellään standardoidut toimintatavat. Kaksosmallien uskotaan myös mahdollistavan uusia liiketoimintoja tiedonkäsittelykykynsä avulla.

Kysymykseen saadut vastaukset antoivat yleisemmän käsityksen digitaalisen kaksosen kehitysmahdollisuuksista ja tulevaisuuden mahdollisista kehitysoiluista, kuin kysymyksessä oli rajattu.

6.3 Yhteenveto haastatteluista

Haastatteluvastauksien pohjalta toimijoilla on vahva ymmärrys digitaalisen kaksosen toimintaperiaatteesta ja digitaalinen kaksonen tunnistettiin Michael Grievesin (2005) määritelmän mukaiseksi, mutta kuitenkin muunneltavaksi ja loppukäyttäjän tarpeenmukaisesti räätälöitäväksi järjestelmäksi. Kaksisuuntaisen tiedonsiirron tarjoamat tietovirrat tunnistettiin arvokkaina tietolähteinä rakennusten ylläpidollisissa tehtävissä.

Digitaalisille kaksosille on vastausten perusteella tunnistettu ja toteutettu lukuisia eri käyttökohteita kaksosmallin toteutuksen eri tarkkuustasoilla. Talotekniikan osa-alueella kaksosmallien toteutuksista vastauksissa nousi selvästi useimmiten esiin ylläpitomallit, jotka palvelevat kiinteistöä käytönaikaisessa päivittäis-toiminnassa.

Taloteknisten järjestelmien näkökulmasta kaksosmalleja pidettiin tehokkaina ja käytännöllisinä työvälineinä kiinteistön olosuhteiden, järjestelmien toiminnan sekä huoltotoimenpiteiden seurannassa. Vastauksien perusteella energiatehokkuuden parantaminen yhdistettiin loogisesti suoraan kiinteistön hiilijalanjäljen pienentämiseen sekä käyttökustannusten madaltamiseen. Vastaajat pitivät ajantasaisen tiedon avulla suoritettavaa energiatehokkuuden parantamista ja tarkkaa järjestelmien toiminnan seurantaa merkittävänä mahdollisuutena kustannussäästöille energiankulutuksen madaltuessa.

Haastateltavat tunnistivat digitaalisissa kaksosissa merkittäviä haasteita, jotka tulee ratkaista ennen kuin kaksosmallia pystytään jalkauttamaan laajempaan käyttöön. Erityisesti käsiteltävän datan ja mallien käyttämien datalähteiden standardoimattomuuden puutetta pidettiin ongelmallisena, koska järjestelmät ovat nykytilassa käsintehtyjä kokonaisuuksia, mitkä käsittelevät laajakirjoista ja seka-laatuista dataa. Tämän takia kaksosmalleja kuvattiin myös raskaiksi toteuttaa sekä ylläpitää, mikä vaikuttaa suoraan kaksosmallista muodostuviin kuluihin. Vastauksissa nostettiin esiin myös kaksosmallien tekninen monimutkaisuus sekä potentiaalisten käyttäjien digitaaliset valmiudet, mitkä vaikuttavat hidastavasti uusien teknologioiden käyttöönottoon.

Tulevaisuudennäkymiä kaksosmalleille pidettiin positiivisina. Jatkuvasti kehittyvän ja yleistyvän tietomallipohjaisen suunnittelun uskotaan vauhdittavan myös kaksosmallien käyttöönottoa, kun tietomallit tulevat alalla yhä tutummiksi. Mallipohjaisen suunnittelun yleistymisen uskotaan yksinkertaistavan malleja, mikä helpottaa siirtymää uuden teknologian käyttöön. Kaksosmalleille nähtiin myös uusia liiketoiminnallisia käyttökohteita jo toteutettujen ylläpitomallien rinnalla, mikä voi mahdollisesti nopeuttaa uuden teknologian käyttöönottoa.

7 Yhteenveto

Insinööriyössä selvitettiin mahdollisuuksia digitaalisten kaksosten hyödyntämiseen kiinteistöjen taloteknisten järjestelmien ylläpidollisissa tehtävissä, energiatehokkuuden parantamisessa ja hiilijalanjäljen pienentämisessä. Tavoitteena oli muodostaa selkeä ja helposti ymmärrettävä kokonaisuus digitaalisten kaksosten rakenteesta, ominaisuuksista, hyödyistä ja haasteista taloteknisten järjestelmien hallinnassa.

Tutkimustyön tuloksena digitaalisten kaksosten toimintaperiaatteista ja hyödyntämismahdollisuuksista taloteknisten järjestelmien ylläpidossa ja energiatehokkuuden parissa muodostettiin haastatteluiden ja lähdeaineiston perusteella kattava kokonaisuus. Syventyminen aihepiiriin tarjosi myös konkreettisia esimerkkejä hyödyistä ja tutustutti kaksosmalleja koskeviin moniin haasteisiin. Lukijalle tutkimus tarjoaa konkreettisen esityksen digitaalisten kaksosten rakenteesta, käyttömahdollisuuksista, hyödyistä ja haasteista täydennettynä esimerkkikohtein jo toteutetuista ylläpidollisista digitaalisista kaksosista.

Tutkimustyön aikana todettiin jatkossa tutkimusta voitavan syventää tapaustutkimuksin digitaalisten kaksosten hyödyntämisestä rakennusalan käytössä kotimaisessa rakennuskannassa, jolloin käyttökohteista saadaan reaali-kohteista tietoa ja lukemia pitkällä aikavälillä. Haastattelututkimuksen aika havaittiin vastausten helposti ohjautuvan digitaalisiin kaksosiin yleisemmällä tasolla, mutta yleisemmän tason vastaukset hyödyistä ja haasteista havaittiin koskevan myös taloteknisten järjestelmien digitaalisia kaksosia.

Tutkimuksessa kaksosmallien tarjoamien ylläpito- ja energiatehokkuushyötyjen todettiin olevan konkreettisia ja kaksosmallien voivan tarjota pitkällä aikavälillä merkittäviä kustannussäästöjä sekä selkeyttä ylläpidollisiin tehtäviin. Ylläpitotarvetta ennakoivilla ratkaisuilla uskotaan tulevaisuudessa olevan vakavia vikatilanteita vähentävä ja käyttömukavuutta kasvattava vaikutus. Energiatehokkuuden kaksosmallit tarjoavat monia potentiaalisia tehostamiskeinoja, jotka ovat suoraan yhteydessä rakennuskannan käytönaikaisen hiilijalanjäljen pienentämiseen ja elinkaaripäästöjen madaltamiseen.

Lähdemateriaalien ja tapaustutkimuksista saatujen tietojen perusteella uudet talotekniikkajärjestelmien koneoppimista ja tekoälyä hyödyntävät ohjaustavat, kuten malliprediktiivinen säätö, tarjoavat mahdollisuuden tehostaa energian käyttöä. Digitaalisten kaksosten hyödyntämät ja jatkuvasti kehittyvät koneoppimis- ja tekoälyratkaisut tarjoavatkin tehokkaan tavan rakennuksesta kerätyn datan käsittelyyn. Erilaisten simulaatioiden, ennusteiden ja data-analyysien uskotaan tulevaisuudessa toimivan ylläpidon päätöksenteon tukena.

Kaksosmallien tarjoamien energiankulutussäästöjen lisäksi tutkimuksessa todettiin käyttöönottoa jouduttavan Euroopan unionin energiatehokkuusdirektiivissä asetetut päästövaatimukset. Energiatehokkuusdirektiivi edellyttää lyhyellä aikavälillä suuria päästövähennyksiä, mihin digitaaliset kaksoset pystyvät vastaamaan tehokkaiden analyysi-, simulointi- ja hallintatyökalujensa avulla.

Laadukkaan, käyttäjäystävällisen ja kustannustehokkaan digitaalisen kaksosen toteuttamisen edessä olevien esteiden havaittiin olevan laajalti tunnettuja ja haasteista ollaan lähdeaineiston perusteella melko yksimielisiä. Suurimmat kaksosmallin käyttöönottoa hidastavat tekijät kiteytyivät kaksosmallin toteuttamisen ja ylläpidon kulurakenteeseen sekä teknologisiin haasteisiin.

Kaksosmallien kulurakennetta havaittiin pidettävän usein raskaana, eikä takaisinmaksuaika usein vaikuttaisi tavoittavan hyötyjä riittävän nopeasti, jotta kaksosmallin toteuttaminen nähtäisiin kannattavana. Kulurakenteen osalta käyttöönotto vaikuttaa törmäävän rakennusalalla myös paradoksaaliseen ongelmaan, jossa potentiaaliset käyttäjät eivät halua investoida teknologiaan, mitä ei tunneta hyvin eikä takaisinmaksuaika näyttäytyä kohtuullisena ja toisaalta mallien kehittäjät ole halukkaita toteuttamaan monimutkaisia malleja, joille ei ole toistaiseksi laajempaa kysyntää.

Vastaavasti teknologinen kynnyksen, niin mallin toteutukselle kuin käytölle, todettiin olevan suuri uusien teknologioiden vaatiessa yhä laajempaa tietoteknistä osaamista kehittäjiltä ja käyttäjiltä. Kaksosmallien hyödyistä tuotetaan kuitenkin jatkuvasti lisää näyttöä tapaustutkimusten myötä, mikä todennäköisesti tulee

tulevaisuudessa madaltamaan kynnystä investoinneille teknologiaan ja tietotekniseen osaamiseen.

Kokonaisuutena tutkimuksessa todettiin rakennusalalla havaitun digitaalisten kaksosten tarjoamat hyödyt ja mahdollisuudet sekä tunnistetun käyttöönottoon vaikuttavat haasteet. Ymmärryksen myötä kaksosmallien teknisiä haasteita on aloitettu ratkaisemaan ja kaksosteknologian ympärille on myös muodostunut markkina ja mahdollisuus uusille liiketoiminnoille.

Lähteet

Aldabbas, Laith. 2023. Challenges of Digital Twin Technologies Integration in Modular Construction: A Case from a Manufacturer's Perspective. Verkkoaineisto. International Journal of Advanced Computer Science and Applications. <https://thesai.org/Downloads/Volume14No4/Paper_18-Challenges_of_Digital_Twin_Technologies_Integration_in_Modular_Construction.pdf>. Luettu 3.6.2024.

Ardebili, Ali Aghazadeh; Zappatore, Marco; Ramadan, Amro Issam Hamed Attia; Longo, Antonella & Ficarella, Antonio. 2024. Digital Twins of smart energy systems: a systematic literature review on enablers, design, management and computational challenges. Verkkoaineisto. Springer Open. <<https://link.springer.com/content/pdf/10.1186/s42162-024-00385-5.pdf>>. Luettu 20.2.2025.

Ato Ghansah, Frank. 2024. Digital Twins for Smart Building at the Facility Management Stage: A Systematic Review of Enablers, Applications, and Challenges. Verkkoaineisto. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/377974158_Digital_Twins_for_Smart_Building_at_the_Facility_Management_Stage_A_Systematic_Review_of_Enablers_Applications_and_Challenges>. Luettu 12.2.2025.

BIM Dimensions – 3D, 4D, 5D, 6D explained. Verkkoaineisto. NBS. <<https://www.thenbs.com/knowledge/bim-dimensions-3d-4d-5d-6d-bim-explained>>. Luettu 29.3.2024.

BIM Level of Development | LOD 100, 200, 300, 350, 400, 500. Verkkoaineisto. United BIM. <<https://www.united-bim.com/bim-level-of-development-lod-100-200-300-350-400-500/>>. Luettu 25.5.2024.

BIM levels explained. Verkkoaineisto. Thinkproject. <<https://thinkproject.com/blog/bim-levels-explained/>>. Luettu 13.4.2024.

BIM Maturity Assessment. Verkkoaineisto. BuildingSMART. <<https://www.buildingsmart.org/users/services/bim-maturity-assessment/>>. Luettu 2.4.2024.

BIM maturity levels. 2024. Verkkoaineisto. Cohesive BIM Wiki. <https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/BIM_maturity_levels>. Luettu 14.4.2024.

BIM Maturity Levels Explained- Level 0, Level 1, Level 2, Level 3. Verkkoaineisto. United BIM. <<https://www.united-bim.com/bim-maturity-levels-explained-level-0-1-2-3/>>. Luettu 2.4.2024.

BIM maturity Levels: from stage 0 to stage 3. Verkkoaineisto. BibLus. <<https://biblus.accasoftware.com/en/bim-maturity-levels-from-stage-0-to-stage-3/>>. Luettu 13.4.2024.

Complete Guide to BIM Maturity Levels: Navigating the Evolution of Building Information Modeling. 2024. Verkkoaineisto. Pinnacle Infotech. <<https://pinnacleinfotech.com/complete-guide-to-bim-maturity-levels/>>. Luettu 24.5.2024.

Digital Twin Consortium Defines Digital Twin. Verkkoaineisto. Digital Twin Consortium. <<https://www.digitaltwinconsortium.org/2020/12/digital-twin-consortium-defines-digital-twin/>>. Luettu 26.3.2024.

Digital Twins in Construction. Opintomateriaali. Metropolia Ammattikorkeakoulu.

Eischet, Oliver. 2023. BIM Maturity Levels Explained. Verkkoaineisto. <<https://medium.com/specter-automation-insights/bim-maturity-levels-explained-922060c163ef>>. Luettu 14.4.2024.

Ellis, Grace. 2024. BIM Dimensions 101: 3D, 4D, 5D, 6D, 7D, 8D, & Beyond. Verkkoaineisto. Autodesk Construction Cloud. <<https://www.autodesk.com/blogs/construction/bim-dimensions/>>. Luettu 2.4.2024.

Ellis, Michael. 2020. Level of Detail or Development: LOD in BIM. Verkkoaineisto. Rebim. <<https://rebim.io/level-of-detail-or-development-lod-in-bim/>>. Luettu 24.5.2024.

Enabling an Ecosystem of Digital Twins. 2019. Verkkoaineisto. BuildingSMART. <<https://f3h3w7a5.rocketcdn.me/wp-content/uploads/2020/06/Enabling-Digital-Twins-Positioning-Paper-Final.pdf>>.

Energian loppukäyttö. 2024. Verkkoaineisto. Motiva. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/energian kaytto_suomessa/energian_loppukaytto>. Luettu 23.2.2025.

Energiatehokkuuden parantaminen tuo kunnille säästöjä. 2020. Verkkoaineisto. Ilmasto-opas.fi. <<https://www.ilmasto-opas.fi/artikkelit/energiatehokkuuden-parantaminen-tuo-kunnille-saastoja>>. Päivitetty 23.9.2020. Luettu 27.2.2025.

Energiatehokkuus. Verkkoaineisto. Rakennusteollisuus. <<https://rt.fi/tietoa-alasta/ymparisto-ja-ilmasto/vahahiillinen-rakentaminen/energiatehokkuus/>>. Luettu 16.2.2025.

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) EU/2024/1275. 2024. EU/2024/1275.

Feng, Haibo; Chen, Qian & Garcia de Soto, Borja. 2021. Application of digital twin technologies in construction: an overview of opportunities and challenges. Verkkoaineisto. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/profile/Borja-Garcia-De-Soto-2/publication/355912448_Application_of_digital_twin_technologies_in_construction_an_overview_of_opportunities_and_challenges/links/6183ea4ceef53e51e12ae533/Application-of-digital-twin-technologies-

in-construction-an-overview-of-opportunities-and-challenges.pdf>. Luettu 3.6.2024.

Grieves, Michael. 2005. Product Lifecycle Management: Driving the Next Generation of Lean Thinking. Verkkoaineisto. O'reilly. <<https://learning.oreilly.com/library/view/product-lifecycle-management/9780071452304/ch03.html#ch03lve4>>. Luettu 4.1.2025.

Grieves, Michael & Vickers, John. 2013. Transdisciplinary perspectives on complex systems: Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. Sveitsi: Springer International Publishing AG.

Hauer, Martin; Hammes, Sascha; Zech, Philipp; Geisler-Moroder, David; Plörer, Daniel; Miller, Josef; van Karsbergen, Vincent & Pfluger, Rainer. 2024. Integrating Digital Twins with BIM for Enhanced Building Control Strategies: A Systematic Literature Review Focusing on Daylight and Artificial Lighting Systems. Verkkoaineisto. <<https://www.mdpi.com/2075-5309/14/3/805>>. Luettu 17.2.2025.

Hosamo, Haidar; Nielsen, Henrik; Kraniotis, Dimitrios; Svennevig, Paul & Svidt, Kjeld. 2023. Digital Twin framework for automated fault source detection and prediction for comfort performance evaluation of existing non-residential Norwegian buildings. Verkkoaineisto. ScienceDirect. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778822009033#s0095>>. Luettu 22.2.2025.

Industry Foundation Classes (IFC) – An introduction. Verkkoaineisto. BuildingSMART. <<https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/>>. Luettu 27.3.2024.

Jiao, Zedong; Du, Xiuli; Liu, Zhansheng; Liu, Liang; Sun, Zhe & Shi, Guoliang. Sustainable Operation and Maintenance Modeling and Application of Building Infrastructures Combined with Digital Twin Framework. 2023. Verkkoaineisto. MDPI. <<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10180953/>>. Luettu 18.2.2025.

Kaewunruen, Sakdirat; Sresakoolchai, Jessada; Ma, Wentao & Phil-Ebosie, Olisa. 2021. Digital Twin Aided Vulnerability Assessment and Risk-Based Maintenance Planning of Bridge Infrastructures Exposed to Extreme Conditions Verkkoaineisto. MDPI. <<https://www.mdpi.com/2071-1050/13/4/2051>>. Luettu 10.2.2025.

Kansallisen rakennusten perusparannussuunnitelman laatiminen. 2024. Ympäristöministeriö. <<https://ym.fi/hankesivu?tunnus=YM037:00/2024>>. Luettu 26.2.2025.

Kaukolämmön tuotanto polttoaineen mukaan 2000–2023. 2024. Verkkoaineisto. Tilastokeskus. <<https://stat.fi/tilasto/salatuo#graphs-cln3264ns5ap60bvzz3z33ez1>>. Luettu 23.2.2025.

Korhonen, Esko; Niemi, Jussi; Ekuri, Riitta; Oksanen, Raila; Miettinen, Heikki; Parviainen, Jarno; Haapanen, Anne; Patanen; Tommi. 2018. Kuntien rakennuskannan kehitys- ja säästöpotentiaali. Verkkoaineisto. Valtioneuvoston kanslia. <<https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/160542/5-2018-Kuntien%20rakennuskannan%20kehitys-%20ja%20s%c3%a4%c3%a4st%c3%b6potentiaali.pdf?sequence=4&isAllowed=y>>. 5.2.2018. Luettu 23.2.2025.

Kortelainen, Juha; Minav, Tatiana & Tammi, Kari. 2023. Digital twin—The dream and the reality. Verkkoaineisto. Frontiers. <<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/friot.2023.1108777/full>>. Luettu 31.5.2024.

KTI Ylläpitokustannusindeksit. 2022. Verkkoaineisto. KTI Kiinteistötieto. <<https://kti.fi/kti-yllapitokustannusindeksit-asuntokiinteistojen-yllapitokustannukset-nousivat-4-4-ja-toimistokiinteistojen-4-8-prosenttia-vuonna-2021/>>. Luettu 25.2.2025.

KTI Ylläpitokustannusindeksit. 2023. Verkkoaineisto. KTI Kiinteistötieto. <<https://kti.fi/kti-yllapitokustannusindeksit-asuinkerrostalojen-yllapitokustannusten-nousu-jai-kolmeen-prosenttiin-vuonna-2022/>>. Luettu 25.2.2025.

KTI Ylläpitokustannusindeksit. 2024. Verkkoaineisto. KTI Kiinteistötieto. <<https://kti.fi/kti-yllapitokustannusindeksit-toimistokiinteistojen-yllapitokustannukset-nousivat-19-prosenttia-vuonna-2023-energiankulutuksen-selkea-lasku-hiltsi-kustannusten-nousua/>>. Luettu 25.2.2025.

Li, Xiao; Cao, Jiarou; Liu, Zhenggang & Luo, Xinggang. 2020. Sustainable Business Model Based on Digital Twin Platform Network: The Inspiration from Haier's Case Study in China. Verkkoaineisto. MDPI. <<https://www.mdpi.com/2071-1050/12/3/936>>. Luettu 10.2.2025.

LOD (Level of Detail). Verkkoaineisto. Tekla. <<https://www.tekla.com/fi/ajankoh-taista/artikkelit/lod-level-of-detail>>. Luettu 24.5.2024.

Lorek, Sarah. 2022. What is BIM (Building Information Modeling). Verkkoaineisto. Trimble Construction. <<https://constructible.trimble.com/construction-industry/what-is-bim-building-information-modeling>>. Luettu 20.5.2024.

Lu, Qiuchen; Parlikad, Ajith Kumar; Woodall, Philip; Don Ranasinghe, Gishan; Xie, Xiang; Liang, Zhenglin; Konstantinou, Eirini; Heaton, James & Schooling, Jennifer. 2020. Developing a Digital Twin at Building and City Levels: A Case Study of West Cambridge Campus. Verkkoaineisto. UCL Discovery.

<https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10085012/3/Lu_Developing%20a%20Digital%20Twin%20at%20Building%20and%20City%20Levels_AAM.pdf>. Luettu 21.2.2025.

Martinescu, Livia. 2023. Exploring the concepts of digital twin, digital shadow, and digital model. Verkkoaineisto. Oxford Insights. <<https://oxfordinsights.com/insights/exploring-the-concepts-of-digital-twin-digital-shadow-and-digital-model/>>. Luettu 2.6.2024.

Mateev, Mihail. 2024. DIGITAL TWINS CONCEPT FOR ENERGY-EFFICIENT SMART BUILDINGS. Verkkoaineisto. Sofia University. <<https://www.feba.uni-sofia.bg/sko/yrbook/Yearbook23-09.pdf>>. Luettu 17.2.2025.

Mikä on tietomalli? Verkkoaineisto. Väylävirasto. <<https://vayla.fi/palveluntuottajat/inframallit/mika-on-tietomalli->>. Luettu 27.3.2024.

Mistä rakennusten hiilijalanjälki koostuu? Verkkoaineisto. RALA. <<https://www.rala.fi/fi/hankkeet/vahahiilinen-rakentaminen/vahahiilinen-rakentaminen>>. Luettu 16.2.2025.

Morkunaite, Lina; Kardoka, Justas; Pupeikis, Darius; Fokaides, Paris & Angelakis, Vangelis. 2024. Digital Twin for Grey Box modeling of Multistory residential building thermal dynamics. Verkkoaineisto. <<https://arxiv.org/pdf/2402.02909>>. Luettu 17.2.2025.

Niemioja, Seppo. 2005. Arkkitehdin tuotemallisuunnittelu. 3. painos.

Open BIM. Verkkoaineisto. Tekla. <<https://www.tekla.com/fi/ajankohtaista/artikkelit/open-bim>>. Luettu 25.5.2024.

Peng, Yang; Zhang, Ming; Yu, Fangqiang; Xu, Jinglin & Gao, Shang. 2020. Digital Twin Hospital Buildings: An Exemplary Case Study through Continuous Lifecycle Integration. Verkkoaineisto. Wiley Online Library. <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1155/2020/8846667>>. Luettu 22.2.2025.

Rakennuksen tietomalli. 2019. Verkkoaineisto. Suomi.fi. <<https://sanastot.suomi.fi/terminology/95d5a174-01af-4825-bae2-fd5fcaed1774/concept/a2f65065-440f-49bc-a952-12793350c3a5>>. Luettu 2.4.2024.

Rakennusten energiatehokkuusdirektiivin uudistus. Verkkoaineisto. Ympäristöministeriö. <<https://ym.fi/rakennusten-energiatehokkuusdirektiivin-uudistus>>. Luettu 26.2.2025.

Rakentamislaki. 2023. 751/2023.

Ramesh, Rakesh; Ur Rehman, Hassam; Hasan, Ala; Eerolainen, Leena; Yin, Hang & Hamdy, Mohamed. 2024. Optimising Energy flexibility in Finnish

residential buildings: A comparative study of PI, Rule-based and Model Predictive Control Strategies. Verkkoaineisto. SSRN. <<https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5002205>>. 28.10.2024. Luettu 27.2.2025.

Saarinen, Sirkka. 2007. PRO IT -PROJEKTI VAUHDITTI TUOTEMALLINNUKSEN LÄPIMURTOA. Verkkoaineisto. Betoni. <https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/10/BET0702_s93-97.pdf>. Luettu 22.2.2025.

Seppänen, Olli; Lappalainen, Eelon; Al Barazi, Alaa; Görsch, Christopher; Zheng, Yuan; Abou Ibrahim, Hisham; Laine, Joni & Huovinen, Arttu. 2023. Building 2030: Tuotantoprosessin digitaalinen kaksonen. Verkkoaineisto. Aalto-yliopisto. <<https://www.aalto.fi/sites/g/files/flghsv161/files/2023-03/Building-2030-digitaalinen-kaksonen-loppuraportti.pdf>>. Luettu 4.3.2024.

SFS-EN ISO 19650-1:2019. Rakennuksia ja infrarakenteita koskevien tietojen organisointi ja digitalisointi, mukaan lukien rakennetun ympäristön tietojen mallintaminen ja hallinta hyödyntämällä rakennettujen kohteiden tietomallinnusta (BIM). Osa 1: Käsitteet ja periaatteet. Suomen Standardoimisliitto.

Skills and Competencies for the National Digital Twin. Verkkoaineisto. University of Cambridge. <<https://www.cdbb.cam.ac.uk/what-we-do/national-digital-twin-programme/resource-skills-and-competencies-national-digital-twin>>. Luettu 10.2.2025.

Sähkön hankinta ja kulutus. 2024. Verkkoaineisto. Motiva. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiankaytto_suomessa/sahkon_hankinta_ja_kulutus>. Luettu 23.2.2025.

TEPA-termipankki. 2023. Verkkoaineisto. Sanastokeskus. <<https://termipankki.fi/tepa/fi/haku/digitaalinen%20kaksonen>>. Luettu 16.2.2025.

The 10 dimensions of BIM. 2024. Verkkoaineisto. BibLus. <<https://biblus.acca-software.com/en/bim-dimensions/>>. Luettu 13.4.2024.

Twindustry. 2024. Verkkoaineisto. Twindustry. <https://www.linkedin.com/posts/twindustry_digitaltwin-dtp-dti-activity-7161644915003793408-rp73/>. Luettu 21.2.2025.

van Nederveen, Sander; Beheshti, Reza & Gielingh, Wim. 2009. Modeling Concepts of BIM. Teoksessa Underwood J. & Isikdag U. Handbook of Research on Building Information Modeling and Construction Informatics: Concepts and Technologies. Hershey, Pennsylvania, USA: IGI Global. Luettu 22.5.2024.

Verma, Jyoti; Sethi, Monika; Baggan, Vidhu; Snehi, Manish & Arora, Jatin. 2024. A Simulation-Based Study of a Digital Twin Model of the Air Purifier System in Chandigarh Using LabVIEW. Verkkoaineisto. O'reilly.

<<https://learning.oreilly.com/library/view/simulation-techniques-of/9781394256976/c11.xhtml#s11-4>>. Luettu 18.2.2025.

Volk, Rebekka; Stengel, Julian & Schultmann, Frank. 2014. Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs. Verkkoaineisto. ScienceDirect. <<https://www-sciencedirect-com.ezproxy.metro-polia.fi/science/article/pii/S092658051300191X#s0010>>. Luettu 4.2.2025.

What are BIM Dimensions – 3D, 4D, 5D, 6D, and 7D BIM Explained | Definition & Benefits. Verkkoaineisto. United BIM. <<https://www.united-bim.com/what-are-bim-dimensions-3d-4d-5d-6d-7d-bim-explained-definition-benefits/>>. Luettu 29.3.2024.

Yleiset tietomallivaatimukset 2012 Osa 1. 2012. RT 10-11066.

Yleiset tietomallivaatimukset 2012 Osa 3. 2012. RT 10-11208.

Yleiset tietomallivaatimukset 2012 Osa 4. 2012. RT 10-11069.

Yleiset tietomallivaatimukset 2012 Osa 6. 2012. RT 10-11071.

Yleiset tietomallivaatimukset 2012 Osa 12. 2012. RT 10-11077.

Yildiz, Emre; Møller, Charles & Bilberg, Arne. 2020. Virtual Factory: Digital Twin Based Integrated Factory Simulations. Verkkoaineisto. Elsevier. <https://www.researchgate.net/publication/346772755_Virtual_Factory_Digital_Twin_Based_Integrated_Factory_Simulations>. Luettu 5.1.2024.

YTV2020 -päivityshanke osaksi kansallista yhteentoimivuuden määrittelyä! 2021. Verkkoaineisto. KIRAHUB. <<https://kirahub.org/ytv2020-paivityshanke-osaksi-kansallista-yhteentoimivuuden-maarittelya/>>. 12.2.2021. Luettu 27.2.2025.

55-valmiuspaketti. Verkkoaineisto. Eurooppa-neuvosto. <<https://www.consilium.europa.eu/fi/policies/fit-for-55/>>. Päivitetty 24.2.2025. Luettu 26.2.2025.

55-valmiuspaketti: tehdään rakennuksista ympäristöystävällisempiä. Verkkoaineisto. Eurooppa-neuvosto. <<https://www.consilium.europa.eu/fi/infographics/fit-for-55-making-buildings-in-the-eu-greener/#0>>. Päivitetty 13.1.2025. Luettu 26.2.2025.

7D BIM – BIM Driven Handover – Bim For Operation & Maintenance – Digital Twins. Verkkoaineisto. EB/ARCHITECTS. <<https://www.ebarchitects.eu/bim/7d-bim>>. Luettu 2.4.2024.