

Tristan Löfberg

# RAKENTAMISEN TIETOMALLINTAMISEN JA DIGITAALISEN KAKSOSEN ARVONLUONTI RAKENNUSPROJEKTEISSA

Kandidaatintyö  
Johtamisen ja talouden tiedekunta  
Tarkastaja: Jarmo Uusikartano  
Joulukuu 2025

# TIIVISTELMÄ

Tristan Löfberg: Rakentamisen tietomallintamisen ja digitaalisen kaksosen arvonluonti rakennusprojekteissa (Value Creation of Building Information Modeling and Digital Twins in Construction Projects)  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Tuotantotalous  
Joulukuu 2025

---

Rakennusalan merkityksellisyys ja arvonluonnin ajankohtaisuuden vuoksi työssä syvennyttään rakentamisen tietomallintamisen ja digitaalisen kaksosen arvonluontiin rakennusprojekteissa. Työn tavoitteena on tarkastella rakentamisen tietomallintamisen ja digitaalisen kaksosen soveltuvuutta rakennusprojektin eri vaiheisiin ja tutkia, miten valitut teknologiset työkalut tukevat arvonluontia rakennusprojektin elinkaaren aikana. Tutkimus suoritettiin kirjallisuuskatsauksena, jotta tutkimuksen tulokset pohjautuvat tutkimusaineiston keskeisiin havaintoihin.

Rakennusprojektin elinkaaren vaiheet ovat suunnittelu-, rakentamis- ja kiinteistönhallintavaihe. Arvonluontia tarkastellaan rakentavan tai kiinteistöä hallitsevan organisaation näkökulmasta painottaen työkalujen vaikutuksia organisaation pitkän aikavälin taloudelliseen menestykseen. Rakentamisen tietomalli sisältää kaikki rakennuksen oleelliset fyysiset ja toiminnalliset ominaisuudet. Digitaalinen kaksonen on fyysisen objektin tai järjestelmän virtuaalinen vastine, jota päivitetään jatkuvasti reaaliaikaisella datalla fyysisestä kaksosesta. Tutkimuksessa tarkastellaan rakentamisen tietomallintamisen ja digitaalisen kaksosen arvonluontia rakennusprojektin suunnittelu-, rakentamis- ja kiinteistönhallintavaiheissa.

Rakennusprojektin suunnitteluvaiheessa rakentamisen tietomallintaminen tehostaa tiedon jakamista ja visualisointia organisaation sisäisesti tehostaen asiantuntijoiden välistä yhteistyötä. Tietomallintaminen mahdollistaa yksityiskohtaisen optimoidun suunnitelman luomisen, mikä ennaltaehkäisee virheiden toteutumista ja kasvattaa resurssitehokkuutta myöhemmin projektissa. Suunnitelman laadun kasvattamisen lisäksi, tietomallintaminen tehostaa riskienhallintaa ja työturvallisuuden suunnittelua.

Rakentamisvaiheessa voidaan hyödyntää tietomallintamista sekä digitaalista kaksosta rakentamisvaiheen tehostamiseksi. Tietomallintaminen tukee projektinhallintaa ja tehostaa rakentamisen aikataulua. Lisäksi tietomallintaminen vähentää virheiden ja uudelleenrakentamisen todennäköisyyttä ja vähentää materiaalikustannuksia ja hävikkiä. Digitaalinen kaksonen tukee projektinhallintaa tehostamalla päätöksentekijöiden tilannekuvan muodostamista. Tarkka tilannekuva mahdollistaa proaktiivisen päätöksenteon ja muutoksiin reagoimisen, mikä tukee resurssien tehokasta kohdentamista projektin tavoitteiden saavuttamiseksi.

Kiinteistönhallintavaiheessa voidaan hyödyntää rakentamisen tietomallintamista sekä digitaalista kaksosta rakennuksen suorituskyvyn ylläpitämiseksi ja asiakasarvon maksimoimiseksi. Huoltotöiden järjestämisessä voidaan tukeutua tietomallin sisältämään tietoon rakennuksesta. Lisäksi elinkaarikustannusten ja tulevan suorituskyvyn arviointi tehostuu tietomallin hyödyntämisen seurauksena. Digitaalinen kaksonen tarjoaa reaaliaikaista tietoa kiinteistöstä, mikä tehostaa vikojen ja poikkeamien havaitsemista tarvittavien huoltotöiden järjestämiseksi. Reaaliaikainen tieto tehostaa myös energiankulutuksen optimointia ja komponenttien elinkaarten pidentämistä. Näin tietomallintaminen ja digitaalinen kaksonen tukevat kiinteistön kustannustehokasta arvonluontia.

Tutkimus tarjoaa arvokasta tietoa rakentamisen tietomallintamisen ja digitaalisen kaksosen arvonluonnista rakennusprojekteissa, mikä tukee työkalujen onnistunutta implementointia osaksi organisaation liiketoimintaa. Tutkimus on rajattu valittujen työkalujen arvonluonnin tarkasteluun, joten työkalujen haittavaikutuksia tai muiden teknologisten työkalujen arvonluontia ei käsitellä tässä työssä.

Avainsanat: rakennusprojekti, arvonluonti, rakentamisen tietomallintaminen, digitaalinen kaksonen, suunnittelu, rakentaminen, kiinteistönhallinta

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

# TEKOÄLYN KÄYTTÖ OPINNÄYTTEESSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

- Ei
- Kyllä

Ilmoitukseni mukaan olen käyttänyt opinnäytteessäni tutkielmaprosessin aikana seuraavia tekoälysovelluksia: ChatGPT (OpenAI)

Tekoälysovellusten nimet ja versiot: ChatGPT 5.1

Käyttötarkoitus: Tekoälyä on käytetty oikeinkirjoituksen tarkastamiseen.

Osiot, joissa tekoälyä on käytetty: Tekoälyä on käytetty kaikissa työn osissa.

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien osat, joissa on hyödynnetty tekoälyä, ja hyväksyn vastuun mahdollisista eettisten ohjeiden rikkomuksista.

## ALKUSANAT

Kandidaatintyössäni pääsin syventymään aiheeseen, joka itseäni kiinnosti tulevaa työuraani ajatellen. Aiheen valinnassa kuitenkin jännitti se, että minulla ei ollut aikaisempaa kokemusta työn aiheeseen liittyen. Kandidaatintyö osoittautui kuitenkin hyväksi mahdollisuudeksi syventyä aiheeseen itsenäisesti, mikä on selkeästi kasvattanut osaamistani rakennusprojektien ja teknologisten työkalujen aihepiirissä. Uskon sekä kirjallisuuskatsauksen suorittamisen että tutkimuksen sisältöön perehtymisen tuottaneen minulle arvokasta osaamista tulevaisuuttani ajatellen.

Kiitän työn ohjaajaa Jarmo Uusikartanoa sekä aihepiirin asiantuntijaa Tuomas Aholaa tarjoamastaan tuesta ja osaamisesta, jotka ovat tukeneet opinnäytetyön suorittamista. Kiitos myös seminaariryhmäni tarjoamasta palautteesta ja keskusteluista, jotka ovat tukeneet työni edistämistä.

Tampereella, 5.12.2025

Tristan Löfberg

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO.....	1
1.1 Tutkimuksen tavoitteet.....	2
1.2 Tutkimusmetodologia.....	3
1.3 Työn rakenne.....	5
2. RAKENNUSPROJEKTIT.....	7
2.1 Rakennusprojektin elinkaari.....	7
2.2 Arvonluonti rakennusprojekteissa.....	9
2.3 Rakentamisen tietomallintaminen ja digitaalinen kakso- rakennusprojekteissa.....	12
3. RAKENTAMISEN TIETOMALLINTAMISEN JA DIGITAALISEN KAKSOSEN ARVONLUONTI.....	14
3.1 Suunnitteluvaihe.....	15
3.2 Rakentamisvaihe.....	17
3.3 Kiinteistönhallintavaihe.....	20
4. PÄÄTELMÄT.....	24
4.1 Tutkimuksen yhteenveto.....	24
4.2 Työn merkitys.....	26
4.3 Työn rajaukset ja jatkotutkimusmahdollisuudet.....	26
LÄHTEET.....	28

# 1. JOHDANTO

Projektiliiketoiminta on laaja liiketoimintamuoto, joka ylettyy usealle eri toimialalle ja sijoittuu sekä yksityiselle että julkiselle sektorille. Yleisesti hyväksytyn määritelmän mukaan projekti on ennalta määritettyyn tavoitteeseen tähtäävä, monimutkaisten ja toisiinsa liittyvien tehtävien muodostama ajallisesti, resursseiltaan ja laajuudeltaan rajattu ainutkertainen kokonaisuus (Artto et al. 2006, s. 26). Projektiliiketoiminta soveltuu tilanteisiin, jotka ovat ainutlaatuisia ja joissa halutaan saavuttaa tietty tavoite kertaluonteisesti. Tämän seurauksena projektimuotoinen liiketoiminta soveltuu erityisen hyvin rakennus- alalle.

Rakennusalan kehitys viime vuosikymmeninä on toiminut kaupungistumisen, modernin infrastruktuurin ja nykypäiväisen elintason mahdollistajana. Euroopan unionissa rakennusalan osuus bruttokansantuotteesta on noin 9 %, minkä lisäksi se tarjoaa 18 miljoonaa suoraa työpaikkaa eurooppalaisille (European Commission 2025). Rakennusala on nykypäivänä jo merkittävä osa kansainvälistä taloutta, eikä sen kehitys tai merkityksellisyys ole todennäköisesti hidastumassa tulevaisuudessa. Globaalin elintason kasvattaminen edellyttää jatkuvaa kehitystä ja investointeja rakennusprojekteihin, mikä korostaa rakennusalan merkitystä osana kansainvälistä taloutta ja hyvinvointia. Elintason kasvattamisen lisäksi rakennusprojektien kysyntää lisää globaali väestönkasvu, jonka ennustetaan kasvavan seuraavan 50 vuoden aikana yli 10 miljardiin 8,2 miljardista vuonna 2024 (United Nations 2024). Kasvavan väestön elintason ja hyvinvoinnin mahdollistamiseksi tarvitaan onnistuneita resurssitehokkaita rakennus- ja infrastruktuuriprojekteja myös tulevaisuudessa.

Rakennusalan merkityksellisyydestä huolimatta se on kuitenkin altis suhdannevaihte- luille. Suomessa rakennusala on kokenut syvän laskusuhdanteen viime vuosina, mutta tulevaisuudennäkymät ovat hiljalleen paranemassa (Valtiovarainministeriö 2025). Heikko suhdannetilanne rakennusosalalla korostaa, että rakennusprojekteihin liittyy haas- teita ja niiden onnistuminen ei ole itsestäänselvyys varsinkaan epävarmassa taloustilan- teessa. Alameri et al. (2021) tunnistavat rakennusprojekteissa yhdeksän keskeistä haas- tetta: resurssien allokaatio, aika, kustannukset, laatu, turvallisuus, kompleksisuus, muu- tokset, epävarmuus ja kommunikaatio. Tutkimuksessa korostetaan kuitenkin ajan, kus- tannusten ja laadun olevan kriittisimpiä riskitekijöitä rakennusprojekteissa (Alameri et al.

2021). Rakennusprojektien haasteiden tunnistaminen herättää kysymyksiä siitä, miten niitä voitaisiin hallita paremmin rakennusprojektien onnistumisen tukemiseksi.

Ajankohtainen lähestymistapa rakennusprojektien tehostamiseksi on teknologisten työkalujen hyödyntäminen. Rakennusala on tyypillisesti ollut hidas implementoimaan uusia teknologisia työkaluja, mutta viimeisen vuosikymmenen aikana rakennusalan digitaalista transformaatiota on alettu tutkimaan selkeästi enemmän (Naji et al. 2024). Teknologisten työkalujen tehokas hyödyntäminen ei kuitenkaan ole itsestäänselvyys. Yhdysvaltalaisten rakennusalan yritysten keskuudessa suurimmiksi haasteiksi teknologisten työkalujen hyödyntämiselle oli vastustus muutoksille, hyötyjen epäselvyys ja teknologian aiheuttamat kustannukset (Demirkesen & Tezel 2021). Hyötyjen epäselvyys ja vastustus muutoksille korostavat teknologisten työkalujen arvonluonnin ymmärtämisen merkitystä.

Rakennusalan merkityksellisyyden ja arvonluonnin ajankohtaisuuden vuoksi työssä syvennytään siihen, miten rakentamisen tietomallintaminen (engl. building information modeling) ja digitaalinen kaksonen (engl. digital twin) luovat arvoa rakennusprojekteissa. Rakentamisen tietomallintaminen toimii jaettuna alustana, joka sisältää kaikki rakennuksen oleelliset fyysiset ja toiminnalliset ominaisuudet (Wassenaer 2017, s. 122). Digitaalinen kaksonen on fyysisen objektin tai järjestelmän virtuaalinen vastine, jota päivitetään jatkuvasti reaaliaikaisella datalla fyysisestä kaksosesta (Raj & Surianarayanan 2020). Rakentamisen tietomallintaminen ja digitaalinen kaksonen kuuluvat viime vuosien tutkituimpien teknologisten työkalujen joukkoon rakennusprojektien kontekstissa (Naji et al. 2024). Tämä korostaa valittujen teknologisten työkalujen merkitystä rakennusosalalla ja potentiaalia arvonluonnin näkökulmasta.

## 1.1 Tutkimuksen tavoitteet

Työn tavoitteena on tarkastella rakentamisen tietomallintamisen ja digitaalisen kaksosen arvonluontia rakennusprojekteissa. Tutkimus rajataan rakentamisen tietomallintamisen ja digitaalisen kaksosen käsittelyyn, joten muiden teknologisten työkalujen vaikutuksia rakennusprojekteihin ei tarkastella tässä työssä. Lisäksi työssä tarkastellaan valittujen teknologisten työkalujen arvonluontia, joten työkalujen käytöstä aiheutuvat haittavaikutukset, haasteet ja kustannukset jäävät työn rajauksen ulkopuolelle. Kokonaisvaltaisen arvonluonnin tarkastelun mahdollistamiseksi työssä syvennytään rakentamisen tietomallintamisen ja digitaalisen kaksosen arvonluontiin rakennusprojektin eri vaiheissa. Tutkimuskysymykset, joihin opinnäytetyön aikana syvennytään, ovat seuraavat:

- Mihin rakennusprojektien eri vaiheisiin rakentamisen tietomallintaminen ja digitaalinen kaksonen soveltuvat?

- Miten rakentamisen tietomallintaminen ja digitaalinen kaksosen tukevat arvonluontia rakennusprojekteissa?

Työssä tarkastellaan, miten rakentamisen tietomallintamisen ja digitaalisen kaksosen hyödyntäminen voi lisätä rakennuksen arvoa tai vähentää liiketoiminnan kustannuksia. Arvolla viitataan asiakkaan kokemaan arvoon ja määrään, jota asiakas on valmis maksamaan saamastaan arvosta (Bowman & Ambrosini 2000). Onnistuessaan projektista saatujen hyötyjen tulee kuitenkin olla suurempia kuin projektin aiheuttamat kustannukset (Arto et al. 2006, s. 31–32). Tämän seurauksena onnistuneen rakennusprojektin läpiviennin keskeiseksi haasteeksi muodostuu projektin luoman arvon ja sen aiheuttamien kustannusten hallinta. Arvon lisääminen ja kustannusten vähentäminen tukevat liiketoiminnan kannattavuutta. Pitkän aikavälin taloudellisen menestyksen näkökulman korostamiseksi arvonluontia voidaan tarkastella myös muista näkökulmista, kuten teknologisten työkalujen käytön vaikutuksista liiketoiminnan vastuullisuuteen tai työturvallisuuteen. Näin muodostetaan kokonaisvaltainen käsitys rakentamisen tietomallintamisen ja digitaalisen kaksosen arvonluonnista.

## 1.2 Tutkimusmetodologia

Tämä opinnäytetyö on kirjallisuuskatsaus, joten tutkimuksessa hyödynnetään olemassa olevaa kirjallisuutta ja tutkimusta. Tutkimuksessa on pääsääntöisesti hyödynnetty Tampereen yliopiston Andor-palvelua sekä Scopus- ja Business Source Ultimate -tiedonhakupalveluita. Tutkimusaineiston tiedonhaussa on hyödynnetty Scopus-tiedonhakupalvelua. Johdannon ja teoreettisen tarkastelun tukena kirjallisuutta on käytetty laajemmin eri lähteistä. Tiedonhaku on painottunut kansainvälisiin lähteisiin, sillä niitä on enemmän saatavilla kuin suomalaista aineistoa.

Tutkimuksessa tarkastellaan rakentamisen tietomallintamisen ja digitaalisen kaksosen arvonluontia rakennusprojektin kolmessa vaiheessa. Hakusanojen valinnalla tuloksia on kohdennettu rakennusprojekteihin, tiettyyn projektin vaiheeseen, teknologiseen työkaluun ja mahdollisesti arvoon, hyötyyn tai hallintaan. Rakennusprojektia on kuvattu hakusanoilla ”construction” tai ”construction project”. Teknologisten työkalujen sanastona on käytetty ”building information modeling” ja ”digital twin”. Suunnitteluvaiheen hakusanoina on käytetty ”planning”, rakentamisvaiheesta ”construction phase” tai ”building” ja kiinteistönhallinnasta ”maintenance”. Arvonluonnin tai projektinhallinnan näkökulman tarkentamiseksi ”benefit”, ”enhance” tai ”management” on lisätty hakulauseen loppuun. Yhdistämällä hakusanoja on muodostettu viisi hakulauseetta, jotka vastaavat tutkimuksen osa-alueita.

Tutkimusaineiston keräämisessä tuloksia on rajattu englanninkielisiin artikkeleihin. Englannin kielen rajausta tarkentaa hakua luettaviin ja hyödynnettäviin artikkeleihin. Akateemisten artikkelien rajausta takaa luotettavan sisällön. Lisäksi hakua on rajattu julkaisuajankohdan mukaan. Rakentamisen tietomallintamiseen liittyvää kirjallisuutta on tarkasteltu vuosien 2010 ja 2025 väliltä ja digitaaliseen kaksoseen liittyvää kirjallisuutta on tarkasteltu vuosien 2020 ja 2025 väliltä. Tutkimuksessa on päädytty valittuihin julkaisuajankohdan rajauksiin, koska rakentamisen tietomallintamisesta on kirjallisuutta saatavilla pidemmältä ajalta kuin digitaalisesta kaksosesta. Lisäksi teknologiset työkalut kehittyvät nopeasti, joten hyödyntämällä ajankohtaista kirjallisuutta voidaan tarkastella arvonluontia nykypäiväisen toimintaympäristön näkökulmasta. Taulukko 1 esittää tutkimusaineiston hakuprosessissa käytetyt hakulauseet ja rajaukset, minkä perusteella tutkimusaineistoon on päädytty.

Taulukko 1. Tutkimusaineiston hakuprosessi

Hakulause Scopus-tiedonhakupalvelussa	Tulosten määrä	Rajaukset	Rajattujen tulosten määrä	Valittujen artikkelien määrä
construction project AND planning AND "building information modeling" AND (benefit OR enhance)	397	Julkaistu: 2010–2025 Tyyppe: artikkeli Kieli: englanti	187	2
construction project AND construction phase AND "building information modeling" AND benefit	276	Julkaistu: 2010–2025 Tyyppe: artikkeli Kieli: englanti	133	2
construction project AND maintenance AND "building information modeling" AND benefit	142	Julkaistu: 2010–2025 Tyyppe: artikkeli Kieli: englanti	53	1
construction project AND (building OR management) AND "digital twin"	804	Julkaistu: 2020–2025 Tyyppe: artikkeli Kieli: englanti	264	4
construction AND maintenance AND "digital twin" AND management	391	Julkaistu: 2020–2025 Tyyppe: artikkeli Kieli: englanti	108	4
Helmenkasvatusmenetelmä				1
Yhteensä				14

Taulukko 1 esittää ensimmäisessä sarakkeessa käytetyt hakulauseet, minkä jälkeen tulosten lukumäärä on esitetty jokaiselle hakulauseelle erikseen. Tämän jälkeen rajaukset on lisätty hakulauseeseen, jolloin on saavutettu rajattujen tulosten määrä. Näiden tulosten joukosta on valittu tutkimusaineistoon artikkeleita, joiden määrä on esitetty taulukon viimeisessä sarakkeessa. Tutkimusaineiston keräämiseksi on myös hyödynnetty helmenkasvatusmenetelmää, mikä tarkoittaa, että tutkimusaineistossa viitattuja lähteitä on lisätty tutkimusaineistoon tarvittaessa (Schlosser et al. 2006). Valittujen artikkelien yhteenlaskettu määrä on 14, joista yksi on kerätty helmenkasvatusmenetelmää hyödyntäen.

Käytetyt hakulauseet ja rajaukset ovat tuottaneet kohtuullisen määrän tuloksia, kuten Taulukosta 1 on havaittavissa. Tulokset on järjestetty relevanssin tai viittauksien määrän mukaan. Relevanssi esittää osuvimmat tulokset ensimmäisenä ja eniten viitatu tulokset saattavat viestiä lähteen laatua tai hyödynnettävyyttä. Seuraavaksi tulosten otsikoita on silmäilty läpi ja otsikon osuessa tutkimusaiheeseen on tarkasteltu artikkelin tiivistelmää, minkä avulla on muodostettu näkemys artikkelin sisällöstä. Tutkimuksen rajauksen seurauksena tämä prosessi on karsinut valtaosan aineistosta pois. Jos tiivistelmän lukemisen jälkeen artikkelin sisältö on kuitenkin vaikuttanut vastaavan tutkimuksen aihetta, on artikkelin sisältöä silmäilty läpi. Erityistä huomiota on kiinnitetty artikkelin otsikoihin, visuaalisiin elementteihin ja tutkimuksen päätelmiin. Osuvimmat artikkelit on seuraavaksi luettu kokonaisuudessaan ja muistiinpanoja on kirjoitettu niiden sisällöstä painottaen tutkimuksen kannalta keskeisiä havaintoja. Erityistä huomiota on kiinnitetty rakentamisen tietomallintamisen ja digitaalisen kaksosen vaikutuksiin organisaation liiketoimintaan artikkelin kontekstissa. Osuvimmat artikkelit on lisätty tutkimusaineistoon ja niiden sisältämät havainnot rakentamisen tietomallintamisen ja digitaalisen kaksosen arvonluonnista on lisätty tutkimuksen tuloksiin. Näin tutkimusaineistoksi on muodostunut 14 artikkelia, jotka esitetään tutkimuksen tuloksissa.

### **1.3 Työn rakenne**

Työn toisessa luvussa tarkastellaan rakennusprojekteja teoreettisella tasolla. Teoreettisessa tarkastelussa syvennytään rakennusprojektin elinkaareen, arvonluontiin ja rakentamisen tietomallintamisen ja digitaalisen kaksosen määrittämiseen. Teoreettinen tarkastelu luo lähtökohdat rakennusprojektin elinkaaren ymmärtämiselle ja arvonluonnin sisäistämiseksi. Lisäksi rakentamisen tietomallintamisen ja digitaalisen kaksosen määrittely ja teoreettinen tarkastelu mahdollistaa työkalujen arvonluonnin ymmärtämisen tutkimuksen tuloksissa.

Tutkimuksen tuloksissa (luku 3) tarkastellaan miten rakentamisen tietomallintaminen ja digitaalinen kaksonen luovat arvoa rakennusprojektin eri vaiheissa. Kolmannen luvun alussa esitellään tutkimusaineiston keskeiset havainnot taulukkona, minkä jälkeen tutkimusaineiston sisältöön syvennyttään. Rakennusprojektin elinkaari on jaettu kolmeen vaiheeseen ja myös tutkimuksen tulosten käsittely noudattaa tätä jaotusta.

Päätelmissä (luku 4) käsitellään tutkimuksen keskeisiä havaintoja ja vastataan tutkimuskysymyksiin. Päätelmissä käsitellään myös tämän tutkimuksen merkitystä ja työn keskeisiä rajoituksia ja rajoitteita. Rajausten perusteella voidaan myös tunnistaa mahdollisia jatkotutkimusaiheita, joita käsitellään päätelmien lopussa.

## 2. RAKENNUSPROJEKTIT

Jotta työssä voidaan syventyä rakentamisen tietomallintamisen ja digitaalisen kaksosen arvonluontiin rakennusprojekteissa, on ensin tarkasteltava tutkimuksen kannalta keskeisiä käsitteitä teoreettisella tasolla. Sen vuoksi tarkastellaan seuraavaksi rakennusprojektin elinkaaren eri vaiheita ja arvonluontia kirjallisuuden tukemana. Lopuksi määritellään rakentamisen tietomallintaminen ja digitaalinen kaksosen, jotka ovat teknologiset työkalut, joiden arvonluontia työssä tarkastellaan. Teoreettinen tarkastelu luo lähtökohdat työkalujen arvonluonnin käsittelyyn rakennusprojektin eri vaiheissa tutkimuksen tuloksissa.

### 2.1 Rakennusprojektin elinkaari

Tyypillisesti projektin elinkaari voidaan jakaa projektin valmisteluun, toteutukseen ja käyttöönottoon ja sen tukemiseen (Artto et al. 2006, s. 49). Edellä mainitussa jaotuksessa toteutusvaihe sisältää tavoitteiden määrittämisen, suunnittelun, toteutuksen ja sen ohjauksen ja lopuksi projektin päättämisen. Rakennusprojektin kontekstissa elinkaari voidaan jakaa suunnittelu-, rakentamis- ja kiinteistönhallintavaiheeseen (Moradi et al. 2024). Tässä tutkimuksessa rakennusprojektin elinkaarta tarkastellaan tämän jaotuksen avulla, mikä tukee arvonluonnin tutkimista. Elinkaaren vaiheet ja niihin liittyvät toimenpiteet eivät merkittävästi eroa teoreettisen ja rakennusprojektin kontekstin välillä. Tässä työssä tarkastellaan kuitenkin rakentamisvaihetta toteutusvaiheen sijaan, jolloin suunnitteluvaiheen arvonluontia voidaan tarkastella erikseen. Elinkaaren jaotuksen soveltuvuus perustuu siihen, että teknologisten työkalujen arvonluonti eroaa näiden vaiheiden välillä.

Rakennusprojektin ensimmäinen vaihe on projektin suunnitteluvaihe, jolla tarkoitetaan toimintaa ennen rakentamisen aloittamista (Moradi et al. 2024). Tässä tutkimuksessa oletetaan, että suunnitteluvaiheessa fyysistä rakennusta ei ole vielä olemassa, joten olemassa olevan rakennuksen uudistaminen tai remontoiminen jäävät työn rajausten ulkopuolelle. Tyypillisesti projektin valmistelu- ja suunnitteluvaiheeseen sisältyy ideointia, vaihtoehtojen vertailua, tavoitteiden määrittämistä, riskianalyysi ja tarkka suunnitelma projektin etenemisestä (Artto et al. 2006, s. 48–49). Rakennusprojektin kontekstissa suunnitteluvaihe voidaan jakaa projektin strategiseen määrittelyyn, luonnosteluun, konseptin kehittämiseen ja yksityiskohtaiseen suunnitteluun (Memić *et al.*, 2023). Rakennusprojektin suunnitteluvaiheen tavoitteena on määrittellä projektin tavoitteet ja luoda yksityiskohtainen suunnitelma tavoitteiden saavuttamiseksi.

Keskeinen osa projektin suunnitelmaa resurssienhallinnallisesta näkökulmasta on kustannussuunnitelma, jolla on merkittävä vaikutus rakennusprojektin kannattavuuteen. Kustannussuunnittelussa muunnetaan projektin tavoitteet kustannustavoitteiksi, arvioidaan projektin vaiheiden kustannukset ja kehitetään suunnitelmien taloudellisuutta muiden hankkeen osapuolten kanssa (Junnonen 2020, s. 59). Kustannussuunnitelma kuvaa miten paljon resursseja tavoitteiden saavuttaminen vaatii ja miten ne jakautuvat projektin sisäisesti. Suunnitteluvaiheessa voidaan vielä kehittää projektin kustannustehokkuutta ja vaikuttaa projektin kokonaiskustannuksiin, mikä korostaa kustannussuunnitelman merkitystä osana projektin suunnittelua. Onnistuessaan kustannussuunnittelu luo lähtökohdat kannattavan projektin läpivientiin.

Kun rakennusprojektin suunnitteluvaihe on suoritettu, siirrytään varsinaiseen rakentamisvaiheeseen (Moradi et al. 2024). Tyypillisesti toteutusvaihe sisältää resurssien kohdentamista tavoitteiden saavuttamiseksi, etenemisen seuranta ja tarkoituksenmukaista dokumentointia, minkä jälkeen projekti päätetään ja arvioidaan sen toteutusta oppimisen edistämiseksi (Artto et al. 2006, s. 49–50). Rakentamisvaihe sisältää useita eri toimenpiteitä, jotka kuluttavat merkittävästi resursseja ja ovat keskeisiä rakennusprojektin onnistumisen kannalta. Valtaosa rakennusprojektin kokonaiskustannuksista syntyy rakentamisen aikana, vaikka ne määräytyvät laajalti jo suunnitteluvaiheessa (Junnonen 2020, s. 58). Suunnitteluvaiheen päätöksenteko vaikuttaa rakentamisvaiheen kustannuksiin, esimerkiksi materiaalivalintojen kautta. Resurssien intensiivinen kulutus rakentamisvaiheen aikana kasvattaa tehokkaan projektinhallinnan tarvetta.

Projektin valvonta ja arviointi on kriittinen osa projektinhallintaa koko projektin elinkaaren aikana, mutta sen merkitys on suurin rakentamisvaiheen aikana. Valvonnan ja arvioinnin tavoitteena on huolehtia siitä, että projekti etenee budjetin, aikataulun sekä muiden strategisten tavoitteiden mukaisesti. (Callistus & Clinton 2018) Intensiivinen resurssien kulutus rakentamisvaiheessa korostaa projektinhallintaa ja etenemisen seuranta projektin onnistumisen edellytyksinä. Jotta valvonta ja arviointi voivat tuottaa lisäarvoa, tarvitaan paljon reaaliaikaista tietoa projektin etenemisestä, jotta resursseja voidaan yhteensovitaa ja täysimääräisesti hyödyntää rakentamisvaiheen aikana.

Kun tavoitteet on saavutettu ja rakentamisvaihe on päättynyt, siirrytään kiinteistönhallintavaiheeseen (Moradi et al. 2024). Tässä vaiheessa projektitoimittaja luovuttaa projektin asiakkaalle käyttöönottoa varten, jolloin projektitoimittajan tehtävänä on tukea asiakkaan käyttöä (Artto et al. 2006, s. 50). Rakennuksen vastaanotto tarkoittaa, että rakennus voidaan ottaa käyttöön ja urakoitsijan suoritusvelvollisuus päättyy takuutöitä huomioimatta. Omistajalle luovutetaan lisäksi käyttö- ja huolto-ohje, joka muodostuu rakennusprojektin

eri osapuolten laatimista asiakirjoista, jotka tarjoavat yksityiskohtaista tietoa rakennuksesta ja tukevat huoltotyön järjestämistä. (Junnonen 2020, s. 122) Projektitoimittajan näkökulmasta valtaosa työstä on suoritettu ja jäljellä on käytön tukeminen, mikä mahdollistaa rakennuksen tuottaman arvon maksimoimisen lopulliselle asiakkaalle. Asiakasorganisaation keskeiseksi tehtäväksi muodostuu kiinteistönhallinta ja tarvittaessa yhteistyö toimittajan kanssa, minkä tavoitteena on investointiprojektin kannattavuus.

Tutkimus osoittaa, että kiinteistönhallinta lisää arvoa, erityisesti vanhempiin ja huonokuntoisempiin kiinteistöihin (Li & Monkkonen 2014). On luonnollista, että vastavalmistuneet rakennukset vaativat vähemmät huoltotöitä kuin vanhemmat rakennukset. Rakennuksen käyttö kuluttaa rakennusta, jolloin sen seuraaminen ja tarvittavan huoltotyön järjestäminen suorituskyvyn ylläpitämiseksi muodostuu kiinteistönhallinnan keskeiseksi tavoitteeksi.

## **2.2 Arvonluonti rakennusprojekteissa**

Keskeinen osa tutkimuksen teoreettista taustaa on arvonluonnin määrittäminen, mikä kuvaa rakennusprojektin tavoitteita, joiden saavuttamista rakentamisen tietomallintamisen ja digitaalisen kaksosen hyödyntämisellä pyritään tehostamaan. Arvonluonti ei kuitenkaan ole yksiselitteinen käsite ja monimutkaiset rakennusprojektit luovat onnistuessaan lisäarvoa usealle eri sidosryhmälle. Onnistunut projekti tarkoittaa organisaation sisäisestikin eri asioita eri henkilöille: arkkitehtiä kiinnostaa projektin esteettisyys, insinööriä sen tekniset ominaisuudet, kirjanpitäjää projektin aiheuttamat kokonaiskustannukset suhteessa budjettiin ja toimitusjohtajaa projektin vaikutukset yrityksen osakekurssiin (Freeman & Beale 1992). Edellä mainitut esimerkit korostavat eri lähestymistapoja projektin onnistumisen määrittämiselle organisaation sisäisesti. Tässä työssä tarkastellaan arvonluontia ensisijaisesti rakentavan tai hallitsevan yrityksen näkökulmasta, riippuen rakennusprojektin vaiheesta. Suunnittelu- ja rakentamisvaiheen aikana tarkastellaan arvonluontia pääurakoitsijan, eli rakentavan yrityksen näkökulmasta. Kiinteistönhallintavaiheessa tarkastellaan rakennusta hallitsevan yrityksen näkökulmasta arvonluontia, jota voidaan tehostaa projektitoimittajan tuella.

Arvo voidaan erottaa kahteen tyyppiin: käyttöarvoon ja vaihtoarvoon. Käyttöarvo viittaa asiakkaan subjektiivisesti kokemaan arvoon, kun taas vaihtoarvo on rahallinen summa, jonka asiakas maksaa myyjälle käyttöarvon vastineeksi. (Bowman & Ambrosini 2000) Arvonluonti on riippuvaista käyttäjän tai ostajan kokeman subjektiivisen arvon määrästä suhteessa asiakastarpeisiin ja käyttäjän valmiudesta maksaa rahallista vastinetta kokemastaan arvosta (Lepak et al. 2007). Käyttöarvo kuvaa sitä, paljonko asiakas kokee hyö-

tyvänsä tuotteesta tai palvelusta, mihin vaikuttaa tuotteen ominaisuudet ja laatu. Käyttöarvon on oltava suurempaa kuin vaihtoarvon, jotta asiakas on valmis ostamaan tuotetta. Asiakas valitsee tuotteen, jossa käyttöarvon ja vaihtoarvon ero on suurin (Bowman & Ambrosini 2000). Lisäämällä asiakkaan kokema arvo samanaikaisesti, kun hinta pysyy vakiona tai vähentämällä tuotteen hintaa samanaikaisesti, kun asiakkaan kokema arvo pysyy vakiona, luodaan asiakkaalle arvoa. Vaihtoarvon suuruus on keskeistä myyvän yrityksen kannattavuudelle. Liiketoiminta tuottaa voittoa, jos myynnin yhteydessä saatu vaihtoarvo on suurempaa kuin käytettyjen resurssien yhteenlaskettu hinta (Bowman & Ambrosini 2000). Arvonluonnin lähtökohtana on mahdollisimman suuren käyttöarvon luominen mahdollisimman pienillä resursseilla.

Rakennusprojektin kontekstissa lopullisen käyttäjän kokema käyttöarvo muodostaa vaihtoarvon, jonka hän on valmis rakennuksen käytöstä maksamaan, esimerkiksi vuokran muodossa, jos kyseessä olisi kerrostalorakennusprojekti. Kiinteistönhallitsijan ennusteet saamastaan vaihtoarvosta vaikuttavat siihen, paljonko yritys on valmis maksamaan projektitoimittajalle rakennuksesta. Projektitoimittajan saama vaihtoarvo suhteessa projektin suunnittelu- ja rakentamisvaiheen kustannuksiin määrittelee projektin kannattavuuden. Näin lopullisen käyttäjän kokema arvo kytkeytyy sekä projektitoimittajan että asiakasyrityksen kannattavuuteen, jolloin tavoitteena molempien organisaatioiden näkökulmasta on maksimoida asiakkaan kokema käyttöarvo. Käyttöarvon maksimoimisen vastapainona projektin aiheuttamien kustannusten minimoiminen on kannattavuuden lähtökohta. Rakennusprojektin kannattavuus kytkeytyy projektin kokonaisvaltaiseen arvonluontiin ja tukee organisaation pitkän aikavälin taloudellista menestystä, johon tutkimuksessa syvennyttään.

Projektiliiketoiminnan kontekstissa projektin menestystä tarkastellaan tyypillisesti aika-, kustannus- ja laajuustavoitteiden perusteella (Arto et al. 2006, s. 32). Laajuustavoitteen voidaan katsoa kytkeytyvän asiakkaan kokemaan käyttöarvoon, jolloin se halutaan maksimoida, jotta asiakas on valmis maksamaan projektista enemmän. Oman liiketoiminnan kannattavuuden takaamiseksi projektin kestoa ja kokonaiskustannuksia pyritään minimoimaan. Aika-, kustannus- ja laajuustavoitteiden huomiointi on edelleen keskeistä, mutta kokonaisvaltaisen arvonluonnin tarkastelun mahdollistamiseksi on syytä huomioida muitakin lähestymistapoja. Atkinson (1999) korostaakin, että projektinhallinnan tyypillinen virhe on jättää muut näkökulmat huomioimatta. Tutkimuksessa suositellaan tarkastelemaan myös organisaation muita pitkän aikavälin hyötyjä ja ulkopuolisten sidosryhmien hyötyjä. Organisaation hyötyihin kuuluu keskeisesti organisaation osaamisen kehitys ja strategisten tavoitteiden saavuttaminen. Sidosryhmien hyötyihin kuuluu asiakastyytyväisyys, sidosryhmien taloudellinen menestys ja vaikutukset lähiyhteisöön.

(Atkinson 1999) Rakennusprojektin arvonluonnin huomioiminen organisaatiolle ja sidosryhmille muodostaa kattavamman käsityksen rakennusprojektin kokonaisvaltaisesta arvonluonnista.

Projektin arvonluontia voidaan myös tarkastella eri aikajänteillä: projektin tehokkuus toteutuksen aikana, projektin vaikutus asiakkaaseen käyttöönottoajanhetkestä eteenpäin, yrityksen menestys pitkällä aikavälillä ja projektin vaikutukset yrityksen kehitykseen tulevaisuudessa (Shenhar et al. 2001). Vastaavat näkökulmat arvonluonnille ovat projektin tekninen suoritus, tehokkuus, asiakastyytyväisyys, osaamisen kehitys, onnistunut päättäminen, tekninen innovatiivisuus ja taloudellinen menestys (Freeman & Beale 1992). Molemmat lähestymistavat huomioivat projektin vaikutukset yrityksen pitkäaikaiseen kehitykseen.

Edellä mainitut lähestymistavat arvonluonnin määrittämiseen tarkastelevat projektin arvonluontia monipuolisesti, mutta etenkin vanhemmat tutkimukset jättävät huomioimatta toiminnan vastuullisuuden. Martinsuo ja Killen (2014) tarkastelevat projektiportfolion hallinnassa projektin strategista arvoa, joka sisältää sekä pitkän aikavälin taloudellisen menestyksen että projektin ekologiset, sosiaaliset, turvallisuuteen liittyvät ja oppimiseen vaikuttavat tekijät. Haaste muodostuu siitä, että jos keskittymistä siirretään kohti vastuullisuustavoitteiden saavuttamista, päätös saattaa kuormittaa projektin taloudellisten tavoitteiden saavuttamista, mikä edellyttää päätöksentekijöiden priorisointia. Lisäksi strategisen arvon määrittäminen sisältää enemmän epävarmuutta kuin taloudellisen arvon mittaaminen. (Martinsuo & Killen 2014) Vastuullisuuden ja taloudellisen menestyksen tasapainottaminen on muodostunut keskeiseksi haasteeksi nykypäisessä liiketoiminnassa. On kuitenkin huomioitavaa, että vastuullisuus ja taloudellisuus eivät ole toisistaan irrallisia, vaan vastuullinen liiketoiminta voi kasvattaa asiakkaan kokemaa käyttöarvoa tuotteesta, mikä vuorossaan vaikuttaa asiakkaan maksuvalmiuteen. Näin liiketoiminnan vastuullisuus tukee myös yrityksen taloudellista menestystä.

Rakennusprojektin arvonluontia on tarkasteltu useasta näkökulmasta, mutta lähtökohteisesti arvonluonnilla tarkoitetaan pitkän aikavälin asiakasarvon maksimoimista mahdollisimman vähäisillä resursseilla. Tämä luo lähtökohdat organisaation pitkän aikavälin kannattavuudelle, joka on merkittävä osa arvonluonnista, jota työssä käsitellään. Nykypäiväisessä liiketoimintaympäristössä arvonluontia on syytä tarkastella myös muista näkökulmista, minkä seurauksena tässä työssä arvonluontiin sisältyy myös muita edellä mainittuja näkökulmia. Tarkastelemalla yksittäisen projektin arvonluontia useasta eri näkökulmasta voidaan paremmin ennustaa projektin vaikutuksia yrityksen pitkän aikavälin taloudelliseen menestykseen. Esimerkiksi organisaation sisäisen osaamisen kehitys ja

innovatiivisuus tukevat tulevien projektien resurssitehokkuutta, kun taas asiakastyytyväisyys ja vastuullisuus tukevat yrityksen brändin kehitystä. Se, miten näiden tavoitteiden saavuttamista tehostetaan rakentamisen tietomallintamista ja digitaalista kaksosta hyödyntäen, on tämän tutkimuksen ytimessä.

### **2.3 Rakentamisen tietomallintaminen ja digitaalinen kaksonen rakennusprojekteissa**

Seuraavaksi tarkastellaan tutkimuksen kannalta keskeisiä teknologisia työkaluja, jotka ovat rakentamisen tietomallintaminen ja digitaalinen kaksonen. Työssä ei lähtökohtaisesti käsitellä muita teknologisia työkaluja, elleivät ne kytkeydy valittuihin työkaluihin. Rakentamisen tietomallintaminen ja digitaalinen kaksonen ovat valittu tutkimuksen kohteeksi, koska ne soveltuvat vaihteleviin käyttötarkoituksiin rakennusprojektin elinkaaren aikana. Lisäksi rakentamisen tietomallintaminen ja digitaalinen kaksonen kuuluvat viime vuosien tutkituimpien teknologisten työkalujen joukkoon rakennusprojektien kontekstissa (Naji et al. 2024). Tämä korostaa valittujen teknologisten työkalujen merkitystä rakennusalalla ja potentiaalia arvonluonnin näkökulmasta.

Rakentamisen tietomallintaminen on teknologinen työkalu, joka sisältää kaikki rakennuksen oleelliset fyysiset ja toiminnalliset ominaisuudet. Se toimii jaettuna alustana, jossa eri alojen asiantuntijat ja projektin sidosryhmät päivittävät ajankohtaista tietoa koko projektin elinkaaren aikana. Virtuaalisen kolmiulotteisen mallin lisäksi, rakentamisen tietomallintaminen voi sisältää myös projektin aikatauluun, kustannusten kertymään ja tilojen hallintaan liittyvää yksityiskohtaista dataa. (Wassenaer 2017, s. 122) Rakentamisen tietomallintaminen muodostaa virtuaalisen mallin, johon pyritään liittämään kaikki rakennukseen liittyvä relevantti tieto yhteen kokonaisvaltaiseen järjestelmään.

Rakentamisen tietomallintaminen mahdollistaa rakennuksen visualisoinnin, toteutettavuuden ja konseptin arvioinnin, tehostetun yhteistyön asiantuntijoiden välillä, helpotetun suunnitelmanmuutosten tekemisen, tehostetun resurssienhallinnan ja tietoperusteisen kiinteistönhallinnan (Eastman et al. 2011, s. 20–25). Rakentamisen tietomallintamisen käyttötarkoitukset soveltuvat laajasti koko rakennusprojektin elinkaareen, minkä takia työssä syvennyttään työkalun arvonluontiin.

Digitaalinen kaksonen on fyysisen objektin tai järjestelmän virtuaalinen vastine, jota päivitetään jatkuvasti reaaliaikaisella datalla fyysisestä kaksosesta. Se on tyypillisesti ohjelmistopaketti tai kirjasto, joka sijaitsee ja jota hallinnoidaan pilvi-infrastruktuurissa. (Raj & Surianarayanan 2020) Rakennusprojektien kontekstissa digitaalinen kaksonen tarjoaa reaaliaikaista dataa todellisesta rakennuksesta, jota voidaan hyödyntää projektin- ja kiinteistönhallinnassa.

Digitaaliseen kaksoseen kuuluu kolme keskeistä komponenttia: fyysinen entiteetti, virtuaalinen malli ja data, joka yhdistää fyysisen ja digitaalisen kaksosen toisiinsa (Tao et al. 2019). Fyysisestä objektista digitaaliseen malliin virtaava data ja sen käsittely mahdollistavat reaaliaikaisen digitaalisen kaksosen. Tässä työssä ei kuitenkaan keskitytä datan keräämiseen tai käsittelyyn tarvittavaan teknologiaan. Sen sijaan keskitytään siihen, miten digitaalisen kaksosen hyödyntäminen luo arvoa projektin elinkaaren aikana.

Tutkimuksessa syvennytään siihen, miten rakentamisen tietomallintaminen ja digitaalinen kaksonen luovat arvoa rakennusprojektin elinkaaren aikana. Työssä on valittu tutkia molempia työkaluja, koska ne kytkeytyvät toisiinsa. Rakentamisen tietomallintaminen pyrkii mallintamaan yksityiskohtaisesti rakennusta ja projektin etenemistä, kun toisaalta digitaalinen kaksonen kuvaa fyysisen rakennuksen reaaliaikaista tilaa. Tietomallintaminen on datalähtöisen lähestymistavan perusta, minkä päälle reaaliaikainen mallinnus rakentuu. Monet asiantuntijat pitävät rakentamisen tietomallintamista keskeisenä teknologiana, joka mahdollistaa digitaalisen kaksosen luomisen (Sacks et al. 2020). Kirjallisuudessaakin rakentamisen tietomallintamista ja digitaalista kaksosta käsitellään usein yhdessä. Yhdessä työkalujen käyttö mahdollistaa onnistuneen teknologiajohtamisen, mikä tukee rakennusprojektin arvonluontia.

### 3. RAKENTAMISEN TIETOMALLINTAMISEN JA DIGITAALISEN KAKSOSEN ARVONLUONTI

Rakennusprojektin teoreettisessa tarkastelussa on käsitelty rakennusprojektin elinkaarta ja arvonluonnin teoriaa. Lisäksi rakentamisen tietomallintamista ja digitaalista kaksosta on tarkasteltu teoreettisella tasolla, mikä mahdollistaa valittujen teknologisten työkalujen ymmärtämisen. Seuraavaksi syvennyttään siihen, miten rakentamisen tietomallintamista ja digitaalista kaksosta voidaan hyödyntää rakennusprojektin eri vaiheissa ja miten valittujen työkalujen käyttö tukee rakennusprojektin arvonluontia. Tutkimusaineistoon sisältyy 14 artikkelia, joiden sisältöön tutkimus perustuu. Taulukossa 2 esitetään tutkimusaineiston keskeisimmät havainnot rakentamisen tietomallintamisen ja digitaalisen kaksosen arvonluonnista tiivistetyssä muodossa.

Taulukko 2. Tutkimusaineiston keskeisimmät havainnot työkalujen arvonluonnista

Rakennusprojektin elinkaaren vaiheet (Moradi et al. 2024)			
	Suunnitteluvaihe	Rakentamisvaihe	Kiinteistönhallintavaihe
Rakentamisen tietomallintamisen arvonluonnin osa-alueet	Tiedon jakaminen, visualisointi, asiakastarpeiden täyttäminen (Azhar 2011) Yksityiskohtaisuus, virheiden ennaltaehkäisy, yhteistyö (Liao et al. 2025) Riskienhallinta, työturvallisuus (Getuli et al. 2020; Jin et al. 2019)	Vähemmän virheitä, tehostettu aikataulu (Fan et al. 2014; Liao et al. 2025) Tehostettu projektinhallinta (Liao et al. 2025) Materiaalitehokkuus (Widjaja et al. 2025)	Suunnittelu- ja rakentamisvaiheen tiedon hyödyntäminen (Azhar 2011) Elinkaarikustannusten ja suorituskyvyn arviointi, jälleenyntäminen (Wijekoon et al. 2020)
Digitaalisen kaksosen arvonluonnin osa-alueet	(N.A.)	Tilannekuva, proaktiivisempaa päätöksentekoa (Sacks et al. 2020) Tilannekuva, makro- ja mikro-tason data (Čustović et al. 2025) Etenemisen visualisointi (Xue et al. 2025) Monitorointi, muutoksiin reagoiminen (Widjaja et al. 2025)	Vikojen havaitseminen, energiankulutus (Peng et al. 2020) Poikkeamien havaitseminen (Lu et al. 2020) Ennakointi, komponenttien elinkaaren pidentäminen (Hosamo et al. 2022) Energiankulutus, hätäsuunnitelma (Wang et al. 2024)

Taulukossa 2 on tiivistettynä tutkimusaineiston keskeisimmät havainnot rakentamisen tietomallintamisen ja digitaalisen kaksosen arvonluonnista rakennusprojektin suunnittelu-, rakentamis- ja kiinteistönhallintavaiheessa. Ensimmäinen tutkimuskysymys käsittelee rakentamisen tietomallintamisen ja digitaalisen kaksosen soveltuvuutta rakennusprojektin eri vaiheisiin. Teoriaosuudessa tunnistettiin, että digitaalinen kaksosen koostuu fyysisestä entiteetistä, virtuaalisesta mallista ja datasta, joka yhdistää fyysisen ja digitaalisen kaksosen toisiinsa (Tao et al. 2019). Tämän seurauksena digitaalisen kaksosen luominen edellyttää fyysisen entiteetin olemassaoloa. Tutkimuksessa oletetaan, että suunnitteluvaihe aloitetaan ilman olemassa olevaa rakennusta. Rakennusprojektin kontekstissa digitaalinen kaksosen soveltuu vain vaiheisiin, jolloin fyysinen rakennus on olemassa joko keskeneräisenä tai valmiina, joten se ei luo arvoa rakennusprojektin suunnitteluvaiheessa.

Työn rajausten ja digitaalisen kaksosen ominaisuuksien seurauksena muodostuu viisi tutkimusaluetta, joita varten tutkimusaineisto on kerätty. Tutkimusaineiston sisältämien havaintojen perusteella voidaan todeta, että rakentamisen tietomallintaminen luo arvoa koko rakennusprojektin elinkaaren aikana ja digitaalinen kaksosen luo arvoa rakentamis- ja kiinteistönhallintavaiheessa. Taulukon 2 havainnot rakentamisen tietomallintamisen ja digitaalisen kaksosen arvonluonnista korostavat työkalujen soveltuvuutta rakennusprojektin eri vaiheisiin.

Toinen tutkimuskysymys käsittelee rakentamisen tietomallintamisen ja digitaalisen kaksosen arvonluontia rakennusprojekteissa, mikä kytkeytyy tutkimusaineiston sisältämiin havaintoihin. Seuraavaksi tarkastellaan yksityiskohtaisemmin taulukossa 2 esitettyjä havaintoja rakentamisen tietomallintamisen ja digitaalisen kaksosen arvonluonnista rakennusprojektin etenemisvaiheen mukaan. Näin vastataan toiseen tutkimuskysymykseen ja muodostetaan kokonaisvaltainen sekä yksityiskohtainen näkemys valittujen työkalujen arvonluonnista.

### **3.1 Suunnitteluvaihe**

Rakennusprojektin suunnitteluvaiheessa kulutetaan resursseja tiedon keräämiseksi ja jalostamiseksi yksityiskohtaisen suunnitelman muodostamiseksi. Teoriaosuudessa tunnistettiin, että suunnitteluvaiheen tärkeimmät tehtävät ovat rakennusprojektin strateginen määrittely, luonnostelu, konseptin kehittäminen ja yksityiskohtainen suunnittelu (Memić et al. 2023). Tavoitteeksi muodostuu mahdollisimman tarkan, informatiivisen ja toteutettavan suunnitelman luominen, minkä seurauksena rakentamisen tietomallintaminen soveltuu erityisen hyvin suunnitteluvaiheeseen.

Rakentamisen tietomallintaminen tehostaa suunnitteluvaihetta mahdollistamalla tehokkaampaa tiedon jakamista, lisäämistä ja uudelleenkäyttämistä projektin eri sidosryhmien välillä (Azhar 2011). Organisaation sisäisen tiedonvälittymisen tehostus vähentää tietokatkoksia ja tehostaa työntekijöiden työpanosta. Rakentamisen tietomallintaminen tehostaa lisäksi työntekijöiden yhteistyötä tarjoamalla kaikille sidosryhmille ja eri alan asiantuntijoille pääsyn samaan tietomalliin, minkä lisäksi kompleksisen rakennuksen kokonaisuuden hahmottaminen helpottuu (Liao et al. 2025). Yhteistyö ja tiedon jakaminen tehostuu kokonaisvaltaisen tietomallin hyödyntämisen seurauksena, mikä lisää työntekijöiden produktiivisuutta suunnitteluvaiheessa.

Informatiivinen tietomalli tehostaa sekä organisaation sisäistä että ulkoista tiedonvälitystä rakennusprojektin visualisoinnin myötä. Rakentamisen tietomallintaminen mahdollistaa organisaation sisäisesti kolmiulotteisen mallin generoimisen vaivattomasti suunnittelun aikana (Azhar 2011). Sen lisäksi, että kolmiulotteinen malli helpottaa suunnitelman visualisointia ja ymmärtämistä organisaation sisäisesti, sitä voidaan myös hyödyntää asiakasrajapinnassa asiakastyytyväisyyden lisäämiseksi. Tulevan rakennuksen visualisointi tietomallin avulla helpottaa asiakasta ymmärtämään ehdotuksia tulevasta rakennuksesta paremmin (Azhar 2011). Asiakkaan ymmärtäessä ehdotuksia paremmin, voidaan suunnitteluvaiheessa muokata suunnitelmaa asiakastarpeiden täyttämiseksi. Mahdollisia muutoksia suunnitelmaan on helpointa ja edullisinta tehdä suunnitteluvaiheessa, koska rakentamista ei ole vielä aloitettu eikä tehtyjä toimenpiteitä tarvitse purkaa. Näin voidaan mahdollisimman pienin lisäkustannuksin muokata suunnitelmaa asiakastarpeiden täyttämiseksi ja lopullisen asiakastyytyväisyyden lisäämiseksi.

Suunnitteluvaiheessa luodaan lähtökohdat projektin onnistuneelle läpiviennille. Tietomallintamisen keskeinen hyöty suunnitteluvaiheessa on suunnitelman optimointi, yksityiskohtaisuus ja virheiden ennaltaehkäisy (Liao et al. 2025). Yksityiskohtainen optimoitu suunnitelma lisää suunnitelman laajuutta ja laatua, mikä tukee tulevan rakentamisen tehokkuutta. Lisäksi tietomallintaminen mahdollistaa suunnittelukonfliktien tunnistamisen ja niihin puuttumisen ennen rakentamisen aloittamista (Liao et al. 2025). Konfliktien ja virheiden tunnistaminen on erityisen arvokasta suunnitteluvaiheessa, koska niihin puuttuminen mahdollistaa lisäkustannuksilta välttymisen rakentamisvaiheen aikana. Näin tietomallin mahdollistama suunnitteluvaiheen tehostus ja suunnitelman yksityiskohtaisuus tukevat projektin resurssitehokasta läpivientä ja ennaltaehkäisevät lisäkustannusten toteutumista.

Rakentamisen tietomallintaminen soveltuu myös erinomaisesti riskienhallintaan suunnitteluvaiheessa. Asettamalla rakennusprojektin eri toimenpiteille, työtiloille ja työvaiheille

yksittäisiä riskiarvioita voidaan määrittää niille kokonaisvaltaiset riskiarviot. Jos toimenpiteen, työtilan tai työvaiheen riskitaso on liian korkea, voidaan jo suunnitteluvaiheessa vaikuttaa siihen allokoimalla ylimääräisiä resursseja tai muuttamalla suunnitelmaa proaktiivisesti. (Jin et al. 2019) Riskienhallinnalliset toimenpiteet lisäävät riskitietoisuutta, minkä perusteella voidaan sopeuttaa suunnitelmaa ja mahdollisesti välttää työtapa- tureiden tai onnettomuuksien aiheuttamilta lisäkustannuksilta, jotka voivat vaikuttaa erittäin negatiivisesti toiminnan kannattavuuteen.

Tietyt riskit voivat kuitenkin olla vaikeasti havaittavissa tietomallista, jolloin niitä ei voida myöskään huomioida päätöksenteossa. Riskien havaitsemisen tehostamiseksi voidaan hyödyntää virtuaaliodellisuusteknologiaa rakentamisen tietomallintamisen tukena, jonka avulla voidaan kehittää työtilojen suunnittelua ja työturvallisuutta (Getuli et al. 2020). Tietomallintaminen mahdollistaa myös muiden teknologisten työkalujen hyödyntämisen. Tässä tapauksessa tietomallintamisen ja virtuaaliodellisuusteknologian yhdistäminen tehostaa riskien tunnistamista. Riskien tehokas tunnistaminen luo lähtökohdat onnistu- neelle riskienhallinnalle, kunhan tietoa hyödynnetään organisaation sisäisesti riskien eh- käisemiseksi. Neliulotteisen tietomallin avulla voidaan tehokkaammin kommunikoida projektin eri sidosryhmille mahdollisista työturvallisuusriskeistä ja järjestää koulutuksia niiden ehkäisemiseksi (Jin et al. 2019). Riskitilanteiden visualisointi helpottuu tietomallin mahdollistaman visualisoinnin ja aikataulutuksen myötä, mikä tukee työturvallisuuden koulutusta. Näin rakentamisen tietomallintamista voidaan hyödyntää riskien tunnistami- sessa, arvioimisessa, kommunikoimisessa ja ehkäisevien koulutusten järjestämisessä.

### **3.2 Rakentamisvaihe**

Rakentamisvaiheen alkaessa rakennusprojektin työpanoksia on olemassa sekä virtuaa- lisesti suunnitelman muodossa että fyysisesti keskeneräisen rakennuksen muodossa. Rakentamisen tietomallintamista hyödynnetään edelleen rakentamisvaiheessa, mutta keskeneräinen fyysinen rakennus mahdollistaa myös digitaalisen kaksosen hyödyntämi- sen rakentamisvaiheen aikana. Tämän seurauksena teknologiset työkalut toimivat yh- teistyössä rakentamisvaiheen aikana. Aluksi tarkastellaan, miten rakentamisen tietomal- lintaminen luo arvoa rakentamisvaiheessa, minkä jälkeen syvennyttään digitaalisen kak- sosen arvonluontiin.

Suunnitteluvirheet ja rakentamisen aikana toteutuneet virheet kasvattavat selkeästi pro- jektin kustannuksia ja kestoja rakentamisvaiheessa. Tämä korostaa suunnitelman toteu- tettavuuden ja yksityiskohtaisuuden merkitystä osana suunnitteluprosessia. Vähentä- mällä suunnitteluvaiheen virheitä tehostetaan siis myös rakennusvaiheen resurssien- käyttöä. Liao et al. (2025) esittää rakentamisen tietomallintamisen keskeiseksi hyödyksi

uudelleenrakentamisen ja rakennusvirheiden vähenemisen, mikä vuorossaan lisää rakentamisen tehokkuutta. Uudelleenrakentamisen vähentämisen lisäksi tietomallin hyödyntämisen seurauksena suunnitelman muutoksia tai siihen liittyviä kompromisseja tulee vähemmän rakentamisen aikana, mikä kasvattaa lopullisen tuotteen laatua (Fan et al. 2014). Hyödyntämällä rakentamisen tietomallintamista voidaan rakentamisvaiheen aikana tukeutua informatiiviseen ja yksityiskohtaiseen suunnitelmaan rakennuksesta ja sen etenemisestä, mikä vähentää virheitä, uudelleenrakentamista ja suunnitelman muutoksia rakentamisvaiheen aikana. Tällöin työpanosta voidaan keskittää projektin edistämiseen ja välttää lisäkustannuksilta, mikä kasvattaa rakentamisvaiheen resurssitehokkuutta.

Selkeä arvonluonnin keino rakentamisvaiheessa on työntekijöiden produktiivisuuden lisääminen. Produktiivisuuden lisäämiseksi rakentamisen tietomalliin sisällytetään tietoa työvaiheista, mikä tukee työntekijöiden työntekoa. Työntekijöiden tehoton aika työmaalla vähenee mallin selkeiden ohjeiden seurauksena (Fan et al. 2014). Jakamalla tietoa työvaiheista tehostetaan työntekijöiden produktiivisuutta, mikä on erityisen keskeistä rakentamisvaiheen aikana, kun resurssienkulutus on intensiivistä.

Virheiden välttäminen ja työntekijöiden produktiivisuuden lisääminen tehostavat projektin aikataulua. Suurempia komponentteja voidaan myös valmistaa rakennusmaan ulkopuolella, missä olosuhteet ja tehokkuus ovat parempia. Näiden lisäksi suunnitelman optimointi tukee tehostettua aikataulua rakentamisvaiheen aikana. Muun muassa näiden seurauksena rakentamisen tietomallintamisen hyödyntäminen lyhentää rakentamisvaiheen kokonaiskestoa. (Fan et al. 2014) Arvonluonnin tarkastelussa todettiin, että aika, kustannus ja laajuus ovat merkittäviä muuttujia projektin arvonluonnin kannalta. Jos rakentamisen tietomallintamisen hyödyntämisen seurauksena voidaan sekä lyhentää projektin kestoa että pienentää kokonaiskustannuksia, laadusta tinkimättä, voidaan todeta teknologian tuottavan selvää arvoa rakentavalle organisaatiolle.

Intensiivinen resurssien kulutus korostaa projektinhallinnan merkitystä rakentamisvaiheessa. Yksityiskohtaiset aikataulut ja resurssienhallinnalliset suunnitelmat tarjoavat lähtökohdat tehostetulle projektinhallinnalle rakentamisvaiheen aikana (Liao et al. 2025). Rakennusvaiheen edetessä päätöksentekijät voivat verrata suunniteltua resurssien kulutusta ja projektin etenemistä todelliseen tilanteeseen, jolloin tietomalli tarjoaa vertauskuvan, johon päätöksentekijät voivat tukeutua. Rakentamisen tietomallintaminen vähentää eroavaisuuksia suunnitelman ja todellisen rakennuksen välillä, mutta reagointia rakentamisen edetessä eroavaisuuksien ilmetessä tarvitaan kuitenkin kompleksisuuden vuoksi (Liao et al. 2025). Eroavaisuuksien tehostettuun seurantaan voidaan hyödyntää digitaalista kaksosta rakentamisvaiheen aikana.

Digitaalisen kaksosen ja fyysisen rakennuksen välinen tietovirta yhdistää fyysisen ja digitaalisen kaksosen toisiinsa. Teknologinen kehitys rakennusprojektien monitoroinnissa ja datan analysoinnissa mahdollistaa reaaliaikaiset päivitykset digitaalisessa kaksossa, kun fyysinen rakennus kehittyy. Keskeinen hyöty digitaalisen kaksosen tarjoamasta datalähtöisestä lähestymistavasta rakennusprojektin hallintaan on paremman tilannekuvan muodostuminen, mikä tekee projektinhallinnasta proaktiivisempaa. (Sacks et al. 2020) Tilannekuvan muodostaminen on kuitenkin monimutkainen prosessi ja etenemistä voidaan tarkastella useasta eri näkökulmasta. Tilannekuvan tarkka muodostuminen edellyttää digitaaliselta kaksoselta, että tietoa välitetään sekä makro- että mikro-tasolla, minkä lisäksi tiedon on oltava helposti tulkittavassa muodossa (Čustović et al. 2025). Makrotason tilannekuva esittää projektin etenemistä kokonaisuudessaan, mikä on arvokasta tietoa koko rakentamisvaiheen aikana. Toisaalta ongelmatilanteissa mikro-tason tieto muodostuu arvokkaaksi, kun halutaan tarkastella projektin osakokonaisuuksia tai sen tilannetta tietyistä näkökulmista. Digitaalinen kaksonen ei ole vain tekninen malli rakennuksesta, vaan johtamisen kognitiivinen apuväline, jonka tavoitteena on ylläpitää projektipäällikön tilannekuvaa rakennusprojektista. Tilannekuvan muodostuminen mahdollistaa tietoperusteisen päätöksenteon resurssien allokoimiseksi, mikä tukee projektinhallinnan onnistumista ja rakennusprojektin arvonluontia.

Eräs näkökulma projektin etenemisen seurantaan digitaalisen kaksosen tukemana on projektin tehtäväkohtaisen etenemisen visualisointi. Tehtävien etenemistä voidaan visualisoida värikoodaamalla komponentteja etenemisvaiheen mukaisesti, mikä mahdollistaa etenemisen yksityiskohtaisen seurannan reaaliaikaisten tietojen päivittyessä digitaalisen kaksosen kolmiulotteiseen malliin (Xue et al. 2025). Visualisoimalla tehtävien ja elementtien etenemisvaiheita, voidaan havaita rajoittavia pullonkauloja, jotka vaikuttavat koko projektin etenemiseen negatiivisesti. Lisäksi digitaalisen kaksosen mahdollistama reaaliaikainen monitorointi tehostaa suunnitelmanmuutoksiin reagoimista, tukee proaktiivista päätöksentekoa ja tehostaa adaptiivista resurssienhallintaa (Widjaja et al. 2025). Proaktiivisella päätöksenteolla viitataan ennakoivaan päätöksentekoon. Ajankohtaista tietoa voidaan käyttää rakentamisen etenemisen ennustamiseen, jolloin päätöksentekoa voidaan sopeuttaa ajoissa ja tarvittavia resurssienhallinnallisia muutoksia voidaan toteuttaa. Näin tehtäväkohtaisen etenemisen visualisointi ja reaaliaikainen monitorointi tuottavat arvokasta tietoa projektinhallinnan proaktiivisen päätöksenteon tueksi, jotta resurssit voidaan kohdentaa tehokkaasti.

Rakentamisen tietomallintaminen ja digitaalinen kaksonen toimivat hyvin yhteistyössä rakentamisvaiheen aikana. Widjaja et al. (2025) tutkivat rakentamisen tietomallintamisen

ja digitaalisen kaksosen yhteisvaikutusta betonirakenteiden raudoitustankojen asentamisen tehokkuuteen rakentamisvaiheen aikana. Tutkimuksessa käsitellyssä tapauksessa todettiin, että optimoitu tietomalli ja digitaalisen kaksosen mahdollistama reaaliaikainen seuranta vähensivät raudoitustankojen materiaalihävikkiä 93,58 % ja materiaalikustannuksia 17,75 %. (Widjaja et al. 2025) Teknologisten työkalujen käyttö kasvattaa selkeästi resurssitehokkuutta vähentämällä materiaalihävikkiä ja materiaalikustannuksia, mikä tukee projektin kannattavuutta. Materiaalihävikin vähentäminen on sekä taloudellista että vastuullista. Kyseinen esimerkki korostaa taloudellisen ja vastuullisen arvonluonnin yhteyttä ja molempien samanaikainen kasvattaminen on niin rakentavan organisaation kuin ulkopuolisten sidosryhmien edun mukaista.

### 3.3 Kiinteistönhallintavaihe

Kiinteistönhallinnassa voidaan hyödyntää rakentamisen tietomallintamista sekä digitaalista kaksosta käytön tukemiseksi ja kiinteistön ylläpitämiseksi. Tavoitteena on tukea käyttöä luomalla mahdollisimman paljon asiakasarvoa rajallisilla resursseilla. Kiinteistönhallinnan päätöksentekoa tehostetaan teknologisten työkalujen tarjoamalla tiedolla rakennuksesta. Aluksi tarkastellaan rakentamisen tietomallintamisen arvonluontia kiinteistönhallintavaiheessa, minkä jälkeen siirrytään digitaalisen kaksosen arvonluonnin tarkasteluun.

Tietomallin keskeinen arvo syntyy mallin sisältämän tiedon hyödyntämisestä. Rakennuksen tietomalli sisältää rakennuksen vaatimuksia ja koko elinkaareen liittyvää tietoa, jota voidaan hyödyntää kiinteistönhallinnassa (Azhar 2011). Tietoa rakennuksen komponenteista, elinkaaren kehityksestä, suoritetuista huoltotoimenpiteistä ja huoltotöiden suorittamisen ohjeet tukevat selkeästi kiinteistöhallintaa. Tietoja, joita kiinteistönhallinnassa voidaan hyödyntää jakautuvat rakennustietoon, liiketoimintatietoon ja kiinteistönhallintatietoon (Wijekoon et al. 2020). Näiden tietojen kerääminen ja hyödyntäminen tehostuvat, jos rakentamisen tietomallintamista on käytetty koko rakennusprojektin elinkaaren aikana. Tietoja rakennuksen kehityksestä ja ohjeita huoltotöiden järjestämisestä voidaan hyödyntää tehokkaasti, kun dokumentaatio on helposti saatavilla tietomallista.

Tietomallin sisältämää tietoa voidaan myös hyödyntää strategisessa päätöksenteossa, kun tarkastellaan kiinteistön suoritusta pitkällä aikavälillä. Kattava rakennuksen tietomalli tukee simuloinneissa, elinkaarikustannusten arvioinnissa ja tulevan suorituksen arvioimisessa (Wijekoon et al. 2020). Elinkaarikustannusten ja tulevaisuuden näkymien arviointi mahdollistaa tietoperusteisen päätöksenteon hinnoittelussa ja muissa strategisissa päätöksissä. Tietoperusteinen päätöksenteko tukee toiminnan pitkän aikavälin taloudellista kannattavuutta.

Tietyissä tilanteissa strateginen ratkaisu voi olla kiinteistön myyminen. Tiedot rakennuksesta ovat myös hyödyksi mahdollisen jälleenmyynnin yhteydessä (Wijekoon et al. 2020). Tietomallin sisältämien tietojen hyödyntäminen tarjoaa mahdollisuuden ostavalle osapuolelle ymmärtää rakennusta paremmin, kasvattaen luottamusta ja mahdollisesti myyntihintaa. Tarjouksien laatiminen ja neuvottelu ovat myös helpommin perusteltavissa, kun rakennuksen tiedot on selkeästi jäsennelty informatiiviseen tietomalliin.

Kiinteistönhallintaa voidaan myös tehostaa reaaliaikaisella tiedolla digitaalista kaksosta hyödyntäen. Keskeinen ero tietomallin ja digitaalisen kaksosen välillä on tiedon reaaliaikaisuus. Tietomalli tarjoaa informatiivisen kokonaisuuden rakennuksen tiedoista ja ominaisuuksista, mutta se ei tarjoa itsessään reaaliaikaista tietoa rakennuksen tilanteesta, jolloin tiedon kerääminen vaatii manuaalista työtä ja päätöksentekijät saavat tietoa viiveellä. Sen sijaan digitaalinen kaksonen tarjoaa reaaliaikaista tietoa rakennuksesta, mikä tukee kiinteistönhallinnan päätöksentekoa.

Kiinteistönhallinnan tavoitteena on reagoida mahdollisiin vikoihin tai ongelmiin ja järjestää tarvittavat huoltotyöt kiinteistön suorituskyvyn ylläpitämiseksi. Monitoroimalla rakennuksen kriittisiä toimenpiteitä, kuten ilmastointia, lämpötilaa, veden kulutusta ja energiankulutusta, päätöksentekijät saavat muodostettua tarkemman tilannekuvan kiinteistön suorituskyvystä ja voivat nopeammin reagoida häiriötilanteisiin. Tutkimuksessa on todettu, että digitaalinen kaksonen helpottaa vikojen paikantamista ja analysointia, mikä kasvattaa huoltotöiden ja kiireellisten korjausten tehokkuutta (Peng et al. 2020). Lisäksi digitaalinen kaksonen mahdollistaa automatisoidun poikkeamien havaitsemisen kiinteistönhallinnassa (Lu et al. 2020). Poikkeamalla viitataan tavallisesta toiminnasta poikkeavaan dataan, joka saattaa viestiä viasta ja häiriötilanteesta. Prosessin automatisointi tehostaa henkilöstön produktiivisuutta, kun tietoa ei tarvitse kerätä manuaalisesti. Lisäksi automatisoitu prosessi tarjoaa tietoa poikkeamista nopeammin, jolloin tilanteeseen voidaan myös reagoida nopeammin. Automatisoidussa poikkeamien tunnistamisessa on kuitenkin tärkeä erottaa tavallisista olosuhdevaihteluista johtuvat poikkeamat aidosta haitallisista poikkeamista (Lu et al. 2020). Päätöksentekijöiden arviointi poikkeaman kriittisyydestä vaikuttaa tuleviin toimenpiteisiin ja väärät hälytykset ovat mahdollisia, mutta niiden negatiiviset vaikutukset kiinteistönhallintaan ovat kuitenkin pienempiä kuin se, että haitallinen poikkeama jätettäisiin huomioimatta.

Vikojen nopea tunnistaminen ja huoltotyön järjestäminen on erittäin tärkeää kiinteistön suorituskyvyn ylläpitämiseksi, mutta parhaassa tapauksessa huoltotöiden järjestäminen on ennakoivaa, jolloin viat eivät pääse kasvamaan merkittävän haitallisiksi. Hosamo et al. (2022) tarkastelevat digitaalisen kaksosen soveltuvuutta ennakoivan huoltotyön jär-

jestämiseen ilmastointilaitteiden kontekstissa. Tutkimuksessa korostetaan, että digitaalinen kaksonen mahdollistaa vikojen havaitsemisen ennen kuin niistä tulee vakavia ongelmia, jolloin huoltotöitä voidaan aikatauluttaa, huoltokatkoilta voidaan välttyä ja teknologia- ja henkilöstöresursseja voidaan käyttää tehokkaammin. Digitaalisen kaksonen tarjoaman tiedon avulla voidaan ennakoita komponenttien kuntoa huoltotöiden järjestämiseksi, mikä soveltuu ilmastointilaitteiden elinkaaren pidentämiseen. (Hosamo et al. 2022) Ennakoimalla vikoja ja puuttamalla niihin ennen kuin niistä tulee merkittävän haitallisia, voidaan välttyä suuremmilta huoltokustannuksilta ja huoltokatkosten aiheuttamilta häiriöiltä. Lisäksi kiinteistön laitteiston elinkaaren pidentäminen tukee kustannustehokasta kiinteistönhallintaa.

Vikojen tunnistamisen ja ennakoimisen lisäksi digitaalinen kaksonen soveltuu hyvin kiinteistön juoksevien kustannusten hallintaan. Merkittävä osa juoksevista kustannuksista syntyy energiankulutuksen seurauksena. Digitaalinen kaksonen monitoroi jatkuvasti energiankulutusta, minkä avulla voidaan havaita poikkeamia tavalliseen energiankulutukseen (Peng et al. 2020). Kerätty data analysoidaan kiinteistön laitteiden operatiivisen statuksen ja suorituskyvyn määrittämiseksi, minkä perusteella voidaan tunnistaa syitä korkealle energiankulutukselle, mikä mahdollistaa energiankulutuksen optimoinnin säätelämällä operatiivisia parametreja tai kehittämällä laitteen rakennetta (Wang et al. 2024). Reaaliaikainen tieto energiankulutuksesta mahdollistaa energiankulutuksen optimoinnin, mikä tukee kustannustehokasta kiinteistönhallintaa. Poikkeamat tavallisesta energiankulutuksesta saattavat viestiä viallisesta tai tehottomasta laitteesta, jolloin laite voi tarvita huoltotoimenpiteitä energiatehokkuuden kasvattamiseksi. Sairaalan hallinnan kontekstissa digitaalisen kaksonen todettiin vähentävän energiankulutusta noin prosentilla ja yli 10 % kiinteistön vioilta ja korjauspyynnöiltä välttyttiin diagnostiikan seurauksena (Peng et al. 2020). Näin digitaalinen kaksonen tarjoaa päätöksentekijöille arvokasta tietoa kiinteistön energiankulutuksesta ja suorituskyvystä, mikä voi johtaa konkreettisiin kustannussäästöihin energiankulutukseen sekä huoltoihin liittyen.

Reaaliaikainen tieto on erityisen arvokasta hätätilanteessa. Hätäsuunnitelman tavoitteena on ennaltaehkäistä suuria vahinkoja ja lisäkustannuksia onnettomuuden sattuessa. Hätätilanteen sattuessa digitaalinen kaksonen tarjoaa ympäristöön ja kiinteistöön liittyvää reaaliaikaista tietoa, minkä avulla voidaan käynnistää hätäsuunnitelman mukaiset toimenpiteet reaaliaikaisen tiedon tukemana vahinkojen vähentämiseksi (Wang et al. 2024). Esimerkiksi tulipalon yhteydessä reaaliaikainen tieto voi olla äärimmäisen arvokasta. Tietoa voidaan hyödyntää palokunnan ja muiden henkilöiden ohjaamiseksi sekä

resurssien kohdentamiseksi, minkä avulla voidaan vähentää onnettomuuden aiheuttamia vahinkoja. Näin digitaalinen kaksonen tukee päätöksentekoa ja luo arvoa myös kriittisissä olosuhteissa.

## 4. PÄÄTELMÄT

Työn tavoitteena oli tarkastella rakentamisen tietomallintamisen ja digitaalisen kaksosen soveltuvuutta rakennusprojektin eri vaiheisiin ja tutkia, miten teknologiset työkalut tukevat arvonluontia rakennusprojektin elinkaaren aikana. Työn tutkimuskysymykset olivat seuraavat:

- Mihin rakennusprojektien eri vaiheisiin rakentamisen tietomallintaminen ja digitaalinen kaksonen soveltuvat?
- Miten rakentamisen tietomallintaminen ja digitaalinen kaksonen tukevat arvonluontia rakennusprojekteissa?

Tutkimus suoritettiin kirjallisuuskatsauksena, joten tutkimuskysymysten vastaamiseksi kerättiin tutkimusaineisto, jonka sisältöön tutkimuksen tulokset perustuvat.

### 4.1 Tutkimuksen yhteenveto

Työssä rakennusprojektin elinkaari on jaettu suunnittelu-, rakentamis- ja kiinteistönhallintavaiheeseen. Työssä oletetaan, että rakennusprojektin suunnitteluvaiheessa fyysistä rakennusta ei ole vielä olemassa. Digitaalisen kaksosen luominen edellyttää fyysisen rakennuksen olemassaoloa, kun taas tietomallintaminen soveltuu sekä olemassa olevan että tulevan rakennuksen mallintamiseen. Tämän seurauksena digitaalinen kaksonen ei luo arvoa rakennusprojektin suunnitteluvaiheessa. Ensimmäisen tutkimuskysymyksen vastauksena todettiin tutkimusaineiston perusteella, että rakentamisen tietomallintaminen luo arvoa koko rakennusprojektin elinkaaren aikana ja digitaalinen kaksonen luo arvoa rakentamis- ja kiinteistönhallintavaiheessa. Toisen tutkimuskysymyksen vastauksena tiivistetään seuraavaksi rakentamisen tietomallintamisen ja digitaalisen kaksosen arvonluonti rakennusprojektin suunnittelu-, rakentamis- ja kiinteistönhallintavaiheessa, mikä pohjautuu tutkimusaineiston keskeisiin havaintoihin.

Suunnitteluvaiheessa rakentamisen tietomallintaminen mahdollistaa organisaation sisäisesti tiedon jakamisen asiantuntijoiden välillä, minkä lisäksi mallia voidaan hyödyntää suunnitelman visualisoimiseen organisaation sisäisesti sekä muille sidosryhmille (Azhar 2011). Tehostuneen yhteistyön lisäksi tietomallintaminen lisää suunnitelman yksityiskoh-taisuutta ja ennaltaehkäisee suunnitteluvirheiden toteutumista (Liao et al. 2025). Visualisointi tehostaa työntekijöiden työntekoa ja helpottaa asiakasta sisäistämään suunnitelman paremmin, mikä mahdollistaa suunnitelmaan vaikuttamisen asiakastarpeiden täyt-tämiseksi, mikä lisää lopullista asiakastyytyväisyyttä. Lisäksi tietomallintaminen soveltuu

riskienhallintaan ja työturvallisuuden suunnitteluun (Getuli et al. 2020; Jin et al. 2019). Yhdessä nämä vaikutukset tehostavat suunnitteluvaiheen työpanosta, parantavat suunnitelman laatua, lisäävät asiakastytyvyyttä ja ennaltaehkäisevät riskien ja työtapaturmien toteutumista. Näin rakentamisen tietomallintamisen hyödyntäminen luo arvoa rakennusprojektin suunnitteluvaiheessa.

Rakentamisvaiheen aikana toteutuu tutkitusti vähemmän virheitä ja aikataulu tehostuu rakentamisen tietomallintamisen hyödyntämisen seurauksena (Fan et al. 2014; Liao et al. 2025). Lisäksi tietomalli tehostaa projektinhallintaa sisältämällä tietoa projektin etenemisestä, mikä tukee päätöksentekoa rakentamisvaiheen aikana (Liao et al. 2025). Digitaalisen kaksosen hyödyntäminen rakentamisvaiheessa mahdollistaa reaaliaikaisen etenemisen seurannan ja visualisoinnin, mikä tukee päätöksentekijöiden tilannekuvan muodostamista (Čustović et al. 2025; Sacks et al. 2020; Xue et al. 2025). Tarkka tilannekuva projektin etenemisestä mahdollistaa muutoksiin reagoimisen ja tietoperusteisen päätöksenteon rakentamisvaiheen aikana. Yhdessä tietomallintamisen ja digitaalisen kaksosen todetaan vähentävän materiaalikustannuksia ja hävikkiä kasvattaen rakentamisen materiaalitehokkuutta. (Widjaja et al. 2025) Näin valittujen teknologisten työkalujen käyttö vähentää rakentamisesta aiheutuvia kustannuksia ja tehostaa projektinhallinnan päätöksentekoa tarjoamalla reaaliaikaista tietoa projektista ja sen etenemisestä. Tehostunut rakentaminen tukee niin projektin taloudellista kuin vastuullista arvonluontia.

Kiinteistönhallintavaiheessa tietomallin sisältämää tietoa suunnittelu- ja rakentamisvaiheesta voidaan hyödyntää kiinteistön huoltotöiden järjestämiseksi ja suorituskyvyn ylläpitämiseksi (Azhar 2011). Lisäksi tietomalli tehostaa elinkaarikustannusten ja tulevan suorituskyvyn arviointia ja tukee rakennuksen arvostusta mahdollisen jälleenmyynnin yhteydessä (Wijekoon et al. 2020). Digitaalinen kaksonen tehostaa kiinteistönhallintavaiheessa vikojen ja poikkeamien havaitsemista, mikä tehostaa huoltotyön järjestämistä (Lu et al. 2020; Peng et al. 2020). Lisäksi juoksevien kustannusten, kuten energiankulutuksen, monitorointi tukee juoksevien kustannusten optimointia (Peng et al. 2020; Wang et al. 2024). Digitaalinen kaksonen mahdollistaa myös ennakoivan huoltotyön järjestämisen, mikä vähentää huoltokatkosten todennäköisyyttä ja kasvattaa komponenttien elinkaarten pituutta (Hosamo et al. 2022). Reaaliaikaista tietoa digitaalisesta kaksosesta voidaan myös hyödyntää hätätilanteissa lisävahinkojen vähentämiseksi (Wang et al. 2024). Näin rakentamisen tietomallintaminen ja digitaalinen kaksonen tukevat huoltotöiden järjestämistä, kustannusten optimointia ja resurssien kohdentamista, mikä vähentää kiinteistönhallinnan kustannuksia ja tukee kiinteistön luoman arvon maksimointia.

Tutkimuksen perusteella on tunnistettu, miten rakentamisen tietomallintamisen ja digitaalisen kaksosen hyödyntäminen luo arvoa rakennusprojektin elinkaaren aikana. Yhdessä valittujen teknologisten työkalujen implementointi lisää organisaation tehokkuutta ja tukee asiakasarvon maksimointia. Tehokas resurssienkäyttö ja asiakasarvon luominen tukee yksittäisen projektin kannattavuutta sekä organisaation pitkän aikavälin taloudellista menestystä. Valittujen teknologisten työkalujen implementointi kasvattaa myös organisaation teknistä osaamista, jota voidaan hyödyntää tulevissa projekteissa. Lisäksi työkalujen hyödyntäminen tukee työturvallisuuden ja liiketoiminnan vastuullisuuden kehittämistä, mikä korostaa työkalujen kokonaisvaltaista arvonluontia. Näin työkalujen käyttö tukee rakentavan sekä kiinteistöä hallitsevan organisaation liiketoimintaa.

## **4.2 Työn merkitys**

Tutkimuksessa on tunnistettu, miten rakentamisen tietomallintaminen ja digitaalinen kaksosen luovat arvoa rakennusprojektin elinkaaren aikana. Tutkimus on lisännyt akateemista osaamista ja ymmärrystä rakentamisen tietomallintamisen ja digitaalisen kaksosen arvonluonnin aihepiirissä. Tutkimus kokoaa yhteen merkittävimpiä näkökulmia valittujen työkalujen arvonluonnista, mikä tarjoaa kattavan kokonaisuuden aiheen tutkimuksesta. Lisäksi ajankohtaisen tutkimuksen analysointi tarjoaa lähtökohdat tulevalle tutkimukselle.

Rakentamisen tietomallintamisen ja digitaalisen kaksosen arvonluonnin ymmärtäminen rakennusprojektin kontekstissa tarjoaa myös arvokasta tietoa rakennusalan organisaatioille. Arvonluonnin sisäistäminen mahdollistaa sen maksimoinnin ja valittujen teknologisten työkalujen onnistuneen implementoinnin osaksi organisaation liiketoimintaa. Hyödyntämällä tämän tutkimuksen keskeisiä havaintoja organisaatiot voivat paremmin arvioida työkalujen soveltuvuutta organisaation liiketoimintaan projektikohtaisesti. Rakentamisen tietomallintamisen ja digitaalisen kaksosen arvonluonnin tarkastelu tukee myös muiden teknologisten työkalujen soveltuvuuden arvioimista rakennusprojektien kontekstissa, mikä korostaa tämän tutkimuksen merkitystä.

## **4.3 Työn rajaukset ja jatkotutkimusmahdollisuudet**

Tutkimuksen rajausten ulkopuolelle on jäänyt useita mielenkiintoisia ja merkittäviä aiheita, jotka muodostavat mahdollisia jatkotutkimusaiheita. Työssä ei ole erikseen syvennytty rakennusten remontoimiseen tai purkamiseen. Lisäksi tutkimuksessa keskitytään ainoastaan työkalujen arvonluontiin, eikä syvennytä työkalujen käytön aiheuttamiin haittavaikutuksiin, haasteisiin tai kustannuksiin. On selvää, että työkalujen käyttöön liittyy

myös haasteita, joten eräs jatkotutkimusaihe olisi muodostaa malli, joka vertailee teknologisten työkalujen positiivisia ja negatiivisia vaikutuksia keskenään. Mallin perusteella voitaisiin määrittää, milloin teknologisten työkalujen käyttö olisi kannattavaa ja millaisiin projekteihin ne soveltuvat erityisen hyvin.

Tutkimuksessa on tarkasteltu ainoastaan rakentamisen tietomallintamisen ja digitaalisen kaksosen arvonluontia. Rakennusprojekteihin soveltuu kuitenkin useita eri teknologisia työkaluja, joita voitaisiin tarkastella erikseen. Tutkimuksessa ei myöskään ole syvennytty teknologisten työkalujen yksityiskohtaiseen suunnitteluun, luomiseen tai käyttöön. Sen sijaan teknologisten työkalujen luominen on toiminut oletuksena arvonluonnin tarkastelulle. Esimerkiksi digitaalisen kaksosen luominen ja siihen tarvittavien teknologioiden tarkastelu voisi olla eräs jatkotutkimusaihe rakennusprojekteihin liittyen.

# LÄHTEET

Alameri, A., Marey Alhammadi, A. S. A., Memon, A. H., Rahman, I. A. & Nasaruddin, N. A. N. (2021). Assessing the Risk Level of the Challenges Faced In Construction Projects. *Engineering, Technology and Applied Science Research*. Dr D. Pylarinos, 11(3), 7152–7157.

Arto, K., Martinsuo, M. & Kujala, J. (2006). *Projektiliiketoiminta*. Helsinki: WSOY.

Atkinson, R. (1999). Project management: Cost, time and quality, two best guesses and a phenomenon, its time to accept other success criteria. *International Journal of Project Management*. Elsevier BV, 17(6), 337–342.

Azhar, S. (2011). Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry. *Leadership and management in engineering*. American Society of Civil Engineers, 11(3), 241–252.

Bowman, C. & Ambrosini, V. (2000). Value Creation Versus Value Capture: Towards a Coherent Definition of Value in Strategy. *British Journal of Management*. Blackwell Publishing Ltd, 11(1), 1–15.

Callistus, T. & Clinton, A. (2018). The role of monitoring and evaluation in construction project management. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer Verlag, 722: 571–582.

Čustović, I., Cao, J., Hall, D. M. & Wamelink, H. (2025). Enhancing Situation Awareness of Construction Managers using Human-centered Digital Twins. *Advanced Engineering Informatics*. 67, 103557.

Demirkesen, S. & Tezel, A. (2021). Investigating major challenges for industry 4.0 adoption among construction companies. *Engineering, Construction and Architectural Management*.

Eastman, C. M., Teicholz, P., Sacks, R. & Liston, K. (2011). *BIM handbook: a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors*. Hoboken, N.J: John Wiley & Sons.

European Commission. (2025). Construction sector. Saatavissa (viitattu 22.9.2025): [https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/construction\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/construction_en).

Fan, S.-L., Skibniewski, M. J. & Hung, T. W. (2014). Effects of building information modeling during construction. *Journal of Applied Science and Engineering*. 17(2), 157–166.

Freeman, M. & Beale, P. (1992). Measuring Project Success. *Project Management Journal*. 23, 8–17.

Getuli, V., Capone, P., Bruttini, A. & Isaac, S. (2020). BIM-based immersive Virtual Reality for construction workspace planning: A safety-oriented approach. *Automation in Construction*. Elsevier B.V., 114.

Hosamo, H. H., Svennevig, P. R., Svidt, K., Han, D. & Nielsen, H. K. (2022). A Digital Twin predictive maintenance framework of air handling units based on automatic fault detection and diagnostics. *Energy and Buildings*. Elsevier Ltd, 261.

Jin, Z., Gambatese, J., Liu, D. & Dharmapalan, V. (2019). Using 4D BIM to assess construction risks during the design phase. *Engineering, Construction and Architectural Management*. Emerald Group Holdings Ltd., 26(11), 2637–2654.

Junnonen, J.-M. (2020). *Rakennuttaminen*. Helsinki: Rakennustieto Oy.

- Lepak, D. P., Smith, K. G. & Taylor, M. S. (2007). Value creation and value capture: A multilevel perspective. *Academy of Management Review*. Academy of Management, 32(1), 180–194.
- Li, J. & Monkkonen, P. (2014). The value of property management services: An experiment. *Property Management*. Emerald Group Publishing Ltd., 32(3), 213–223.
- Liao, J., Kim, H. Y. & Shin, M. H. (2025). Quantitative and Qualitative Benefits of Using BIM in Design and Construction Stages for Railway Development. *Buildings*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 15(2).
- Lu, Q., Xie, X., Parlikad, A. K. & Schooling, J. M. (2020). Digital twin-enabled anomaly detection for built asset monitoring in operation and maintenance. *Automation in Construction*. Elsevier B.V., 118.
- Martinsuo, M. & Killen, C. P. (2014). Value Management in Project Portfolios: Identifying and Assessing Strategic Value. *Project management journal*. Hoboken, USA: Wiley Periodicals, Inc, 45(5), 56–70.
- Memić, N., Tadayon, A., Olsson, N. O. E., Wondimu, P. A., Ishtiaque, T. A. & Lædre, O. (2023). Exploring Pre-Construction Activities in Infrastructure Projects That Can Benefit from Contractor Involvement. *Buildings (Basel)*. Basel: MDPI AG, 13(10), 2569-.
- Moradi, S., Hirvonen, J. & Sormunen, P. (2024). Collaborative and life cycle-based project delivery for environmentally sustainable building construction: views of Finnish project professionals and building operation and maintenance experts. *Smart and Sustainable Built Environment*. Emerald Publishing.
- Naji, K. K., Gunduz, M., Alhenzab, F. H., Al-Hababi, H. & Al-Qahtani, A. H. (2024). A Systematic Review of the Digital Transformation of the Building Construction Industry. *IEEE Access*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 12, 31461–31487.
- Peng, Y., Zhang, M., Yu, F., Xu, J. & Gao, S. (2020). Digital Twin Hospital Buildings: An Exemplary Case Study through Continuous Lifecycle Integration. *Advances in Civil Engineering*. Hindawi Limited, 2020.
- Raj, P. & Surianarayanan, C. (2020). Chapter Twelve - Digital twin: The industry use cases. Raj, Pethuru & Evangeline, Preetha (toim.), *Advances in Computers. The Digital Twin Paradigm for Smarter Systems and Environments: The Industry Use Cases*. 1 vol.; Elsevier, 117: 285–320.
- Sacks, R., Brilakis, I., Pikas, E., Xie, H. S. & Girolami, M. (2020). Construction with digital twin information systems. *Data-Centric Engineering (Online)*. Cambridge University Press, 1.
- Schlosser, R. W., Wendt, O., Bhavnani, S. & Nail-Chiwetalu, B. (2006). Use of information-seeking strategies for developing systematic reviews and engaging in evidence-based practice: the application of traditional and comprehensive Pearl Growing. A review. *International Journal of Language & Communication Disorders*. 41(5), 567–582.
- Shenhar, A. J., Dvir, D., Levy, O. & Maltz, A. C. (2001). Project Success: A Multidimensional Strategic Concept. Long range planning. London: Elsevier Ltd, 34(6), 699–725.
- Tao, F., Sui, F., Liu, A., Qi, Q., Zhang, M., Song, B., Guo, Z., Lu, S. C.-Y. & Nee, A. Y. C. (2019). Digital twin-driven product design framework. *International Journal of Production Research*. Taylor and Francis Ltd., 57(12), 3935–3953.
- United Nations. (2024). World Population Prospects 2024: summary of results. New York: United Nations, Department of Economic and Social Affairs.
- Valtiovarainministeriö. (2025). Rakentaminen kääntyy hitaasti kasvuun. Saatavissa (viitattu 22.9.2025): <https://vm.fi/-/rakentaminen-kaantyy-hitaasti-kasvuun>.

Wang, H., Yu, C., Zheng, J., Jia, Y., Liu, Z. & Yang, K. (2024). Digital-Twin-Based Operation and Maintenance Management Method for Large Underground Spaces. *Buildings. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*, 14(8).

Wassenaar, A. van (2017). *A practical guide to successful construction projects*. Boca Raton, FL: Taylor & Francis Ltd.

Widjaja, D. D., Lim, J. & Kim, S. (2025). Integrating Digital Twin and BIM for Special-Length-Based Rebar Layout Optimization in Reinforced Concrete Construction. *Buildings. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*, 15(15).

Wijekoon, C., Manewa, A. & Ross, A. D. (2020). Enhancing the value of facilities information management (FIM) through BIM integration. *Engineering, Construction and Architectural Management. Emerald Group Holdings Ltd.*, 27(4), 809–824.

Xue, J., Xun, X., Wang, H. & Luo, Q. (2025). Dynamic generation method for structural components to achieve digital twin displays of building construction progress. *Automation in Construction*. 178, 106406.