

IoT-DT pipelineen potentiaali kiinteistöjen arvohallinnassa

LAB-ammattikorkeakoulu
Insinööri (YAMK), IoT:stä tekoälyyn
2023
Katja Rodionova

Tiivistelmä

Tekijä(t) Katja Rodionova	Julkaisun laji Opinnäytetyö, YAMK Sivumäärä 63	Valmistumisaika 2023
Työn nimi IoT-DT pipeline potentiaali kiinteistöjen arvohallinnassa		
Tutkinto ja koulutusala Insinööri (YAMK), IoT:stä tekoälyyn		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyössä esitettiin rakenneanturidataan perustuvan rikkaan tiedon hyödyntämisen potentiaalia rakennetussa ympäristössä. Työssä keskityttiin erityisesti EU:n Energiatehokkuusdirektiivin mukaisten energiakorjausten ja energiatehokkaiden ratkaisujen kuntoseurantaan ja -ennakointiin osana kiinteistöjen arvohallintaa. Työn tavoite oli tarjota jatkokehittäjien käyttöön malliprosessi, jota seuraamalla voi jatkossa yhdistää rakennetun ympäristön monialaista teknistä (low-level) dataa digitaliseen kaksoseseen (DT), edistämällä näin rakennetun ympäristön monialaisen kaksosen kypsyyssasteen kehitystä.</p> <p>Työ suoritettiin Design Science menetelmällä, jonka kohteena on IoT-DT pipeline. Pipeline arkkitehtuuria käsiteltiin sosioteknisenä ilmiönä, huomioiden tiedonkäsittelyn eri tason vaikutteet. Pipeline ohjataan kohti monialaista arvoluontia soveltamalla Service-Dominant logic (SDL) periaatteita. Tiedon hyödyntämisen arvopotentiaalın arvioinnin tarpeisiin esitettiin Value of Information (Vol) menetelmää. Pipeline soveltamisen kehitysohjauksen tarpeisiin toimitettiin lisäksi järjestelmällisen kuvauksen kehityksen eri vaiheisiin soveltuvista toimintamalleista.</p> <p>Pipeline tiedonkäsittelyn elementit, kuten IoT, koneoppimiseen tukeutuva anturidatan rikastuttaminen skenaariodatalla, ja DT-kytkennät, esitettiin "mock-up" tasolla käyttäen rakennusalan rakennusfysikaalisella WUFI-simulointityökalulla toimitettua dataa. Tämän avulla esitettiin tiedonkeruun, analyysin, skenaariotyöskentelyn ja digitaalisen kaksosen fasilitoiman monialatyöskentelyn pipeline "mock-up" prototyyppiä.</p> <p>Esitetyt ratkaisut keskittyvät viranomais- ja tilaajaohjauksen taustoittamiseen, joiden avulla yksityiskohtaisemmat ratkaisut tulisi selventää iteratiivisesti käytännön tuotekehityksen myötä.</p>		
Asiasanat EU:n Energiatehokkuusdirektiivi; Innovaatiojohtaminen; Esineiden Internet (IoT); Tietoliikenne; Tietojen visualisointi; Koneoppiminen; Pipeline		

Abstract

Author(s)	Type of Publication	Published
Katja Rodionova	Thesis, UAS	2023
	Number of Pages	
	63	
Title of Publication		
Potential uses of IoT-DT pipeline for value management of real assets		
Degree, Field of Study		
Master of Engineering (UAS), From IoT to AI		
Abstract		
<p>This thesis presented the potential of utilizing enriched sensor data in the built environment applications. The focus of the work was particularly on structural health monitoring related to energy-efficient solutions, set to meet the requirements of the incoming EU Energy Efficiency Directive in property asset management. The objective of the work was to provide a model process for further development, allowing the integration of multidisciplinary technical (low-level) asset data into a digital twin (DT). This, in turn, enables the industry development of the built environment's multidisciplinary digital twin.</p> <p>The work was conducted using the Design Science method, focusing on the IoT-DT pipeline. The pipeline architecture was approached as a sociotechnical phenomenon, considering the influences at various levels of information processing. The principles of Service-Dominant Logic (SDL) are applied to steer the pipeline toward multidisciplinary value creation. The Value of Information (VoI) method was presented as to assess the value potential of data utilization. Additionally, a range of operational models suitable for the consecutive stages of pipeline application development were described.</p> <p>The elements of pipeline, such as IoT, utilization of sensor data and scenario data enriched using machine learning, and DT integration strategies, were presented at a mock-up level. Mock-up data was sourced from the building physics simulation using construction industry standard WUFI toolset. This allowed for the presentation of a mock-up prototype of the pipeline for data collection, analysis, ML-based scenario work, and multidisciplinary collaboration facilitated by the digital twin.</p> <p>The proposed solutions focus on background information for authorities and clients, with more detailed solutions to be clarified iteratively through practical product development.</p>		
Keywords		
EU Energy Efficiency Directive; Innovation Management; Internet of Things (IoT); Data Communication; Data Visualization; Machine Learning; Pipeline		

Sisällys

1	Johdanto.....	1
1.1	Aihe ja työn tarkoitus	1
1.2	Tutkimuksen tavoitteet ja tutkimuskysymykset.....	2
1.3	Tutkimusmenetelmiä.....	3
1.4	Työn rakenne.....	4
1.5	Käsitteiden määrittely	5
2	Anturidataan perustuva ennustava arvohallinta rakennetussa ympäristössä: aihepiirin yleinen kuvaus, teoriat ja menetelmät	7
2.1	Rakennuskannan arvohallinta.....	7
2.2	Rakennusten vaipparakenteiden ennustava kuntoarvio ja ylläpito	11
2.3	Anturidatan hyötykäytön kehityssuunnat arvohallinnan tukena	13
3	Arvonluontiin keskittyvä prosessiohjaus monialatyöskentelyssä	17
3.1	Kehitysprojektin ohjauksen mallit	17
3.1.1	Mock-up ja pilottivaiheen yksinkertaiset kehitystoiminnan ohjauksen mallit	17
3.1.2	Jatkuva integroitu kehitys: pullonkaulat ja prosessiohjauksen mallit.....	19
3.2	Rakennetun ympäristön elinkaaritiedon hallinta: käsitteet ja menetelmät.....	23
3.2.1	Service-Dominant Logic (SDL) eli hyödykekeskeisen logiikan soveltaminen rakennetun ympäristön tiedonhallintaan.....	23
3.2.2	Value of Information (Vol), eli tiedon arvoanalyysimenetelmä	24
3.3	Kehitysohjaamisen ja tiedon arvohallinnan mallien soveltaminen IoT-DT-pipelinen kehitysprosessissa	25
3.3.1	Tiedon arvon (Vol) lineaarisen analyysin malli	25
3.3.2	Tiedon arvon (Vol) analyysi ja hallinta monitoimijaverkostoissa	27
4	Digitaalinen kaksonen: käsitteet ja roolit älykaupungin digitaalisessa infrastruktuurissa	30
4.1	Digitaalisen kaksonen yleiskuvaus.....	30
4.2	Digitaalisen kaksonen laatuvaatimukset ja kehitysvaiheet.....	33
4.3	Digitaalinen kaksonen IoT-pipelinen frontend-ratkaisuna: riskit ja hyödyt.....	36
5	Pipeline julkisivujen anturijärjestelmästä	40
5.1	Pipelinen yleiskuvaus	40
5.2	Koneoppimisalgoritmin yleiskuvaus	43
5.3	Mock-up pipelinen rakenne, visuaalinen käyttörajapinta ja arkkitehtuuri	45
5.3.1	Mock-up prototyypin rakenne.....	45
5.4	Järjestelmän jatkokehitys: pilotointivaiheen suunnitelma	50
5.4.1	Tiedonkäsittelyn resurssointi.....	50

5.4.2	Tiedonsiirtoverkot ja protokollat	51
5.4.3	Tietokannat.....	51
6	Johtopäätökset ja pohdintaa	53
6.1	Mock-upin viimeistelytaso ja jatkokehitys.....	53
6.2	Tutkimuskysymykset.....	53
	Lähteet	56

1 Johdanto

1.1 Aihe ja työn tarkoitus

Tämän opinnäytetyön aihe on IoT-DT-pipelinen potentiaali kiinteistöjen arvohallinnassa. Opinnäytetyön tarkoitus on hahmottaa anturitiedon hyötykäyttöön liittyviä suosituksia kiinteistösijoittajan ja rakennushankkeen toteuttajan tarpeisiin. Rakennushankkeen tilaajan voimaannuttaminen asiantuntijatuella keinoilla on tunnistettu kestävä kehityksen mekanismina (Acharya et al. 2020), kun taas johtajuuden puute on tunnistettu suomalaisen rakennusalan innovatiivisten yritysesysteemien kehityksen esteenä (Aksenova et al. 2018).

Opinnäytetyön taustalla on ilmastonmuutosta lieventävien toimenpiteiden ja toisaalta ilmastonmuutokseen sopeutuvan kehityksen tehtävät. Merkittävää yhteiskunnallista keskustelua herättävä EU-tason energiatehokkuusdirektiivin luonnos (European Commission 2021) tarjoaa esimerkin uusista vaatimuksista, joita kiinteistöjen omistajat ja kiinteistösijoittajat tulevat kohtaamaan tulevaisuudessa. Nykyarvion mukaan, energiatehokkuusdirektiivin tavoite parantaa energiatehokkuutta 32,5 prosentilla vuoteen 2030 mennessä ja vähentää hiilidioksidipäästöjä 55 prosentilla vuoteen 2030 mennessä, koskee vähintään 40 % Suomen rakennuskannasta ja kumulatiivisesti aiheuttaa vuositasolla yli miljardin euron lisäkustannukset rakennusten omistajille (RAKLI ry 2023.)

Ilmastonmuutosta lieventäviin toimenpiteisiin kuuluvat sosiotekniset muutokset, joilla parannetaan esimerkiksi energiatehokkuutta, fossiilitonta energiatuotantoa, vähäpäästöisten materiaalien käyttöä, sekä rakennusten ja niiden osien elinkaaren pidentämistä laatu- ja suunnitteluvaatimusten keinoilla, sekä kehitetään ylläpidon ja kiertotalouden menetelmiä. Ilmastonmuutokseen sopeutumisen mielessä joudutaan puhumaan yhä vaikeammin ennustettavasta tulevaisuudesta. Tällöin yksittäisen toimenpiteen tai ohjeen vaikutus voi olla positiivinen, neutraali eli hyödytön tai jopa negatiivinen, riippuen kontekstista ja realisoitavasta tulevaisuuden skenaariosta. Kompleksisissa ympäristöissä pärjääminen vaatii ensisijaisesti skenaariotyöskentelyyn perustuvan riskienhallinnan osaamista. Skenaarioiden määrittely vaatii aiempaa tiiviimmän yhteistyön järjestämistä eri osajien ja sidosryhmien kanssa, sekä pitkäaikaisen riskienhallinnan huomioimista osana liiketoiminnan raportointia. (IPCC WGII 2022). Tämä opinnäytetyö perehtyy kyseisen yhteistyön järjestämisen yksityiskohtiin tilaajatahon, tietoliikenne- ja rakennesuunnittelun sekä anturijärjestelmätöimittajan välillä.

Tämä opinnäytetyö toimittaa tapaustutkimusluonteista kokemusperäistä tietoa kiihtyvästi kehittyvän alan ohjeistuksen tarpeisiin. Kansallisen ”digitaalisen siirtymän”, eli rakennus-

alan digitaalisen ekosysteemin kypsyysnäytteen ajankohdaksi on arvioitu vuonna 2030 (Kauppila et al. 2022). Tutkimuksen aikana ICT-ekosysteemin elementit ovat siis eri kehitysvaiheissa, olennaisilta osin prototyypivaiheessa. Tämän takia ehdotetuilla suosituksilla pyritään ennakoimaan jatkokehityksen tarpeita ja tukemaan jatkokehitystä palvelevien tietorakenteiden ja tietopohjan luomista. Välittömänä käytännön lopputuloksena laadittujen suositusten suppea yhteenveto sisällytetään valmisteilla olevaan kansalliseen ohjeeseen *RIL 277-2024 Puukerrostalon elinkaarisuunnittelu: tilaajan yleisohje*.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Työn tavoite on tarjota jatkokehittäjien käyttöön malliprosessi, jonka seuraamalla voi jatkossa yhdistää rakennetun ympäristön monialaista teknistä (low-level) dataa digitaliseen kaksoseen, mahdollistamalla näin monialaisen kaksosen kypsyysasteen kehittämistä.

Työssä vastataan seuraaviin kysymyksiin:

- Miten voidaan yhdistää olemassa olevaa teknologiaa siten, että kokonaisratkaisuna on skaalautuva, tarpeisiin mukautuva kiinteistöjen ennustavan kunnossapidon hallintamenetelmä?

Kaikissa digitaalisissa prosesseissa täysi automatisointi ei ole välttämättä tarpeellinen tai edes mahdollinen. Rakennetun ympäristön tietojärjestelmiä on asianmukaista käsitellä sosioteknisinä kokonaisuuksina, joissa meidän täytyy panostaa monipuolisten luottamussuhteiden (mm. Elson et al. 2019) muodostamiseen.

- Millaiset asiantuntijaosaamisen profiilit ja yhteistyökuviot tukevat tällaisen kokonaisratkaisun luomista?

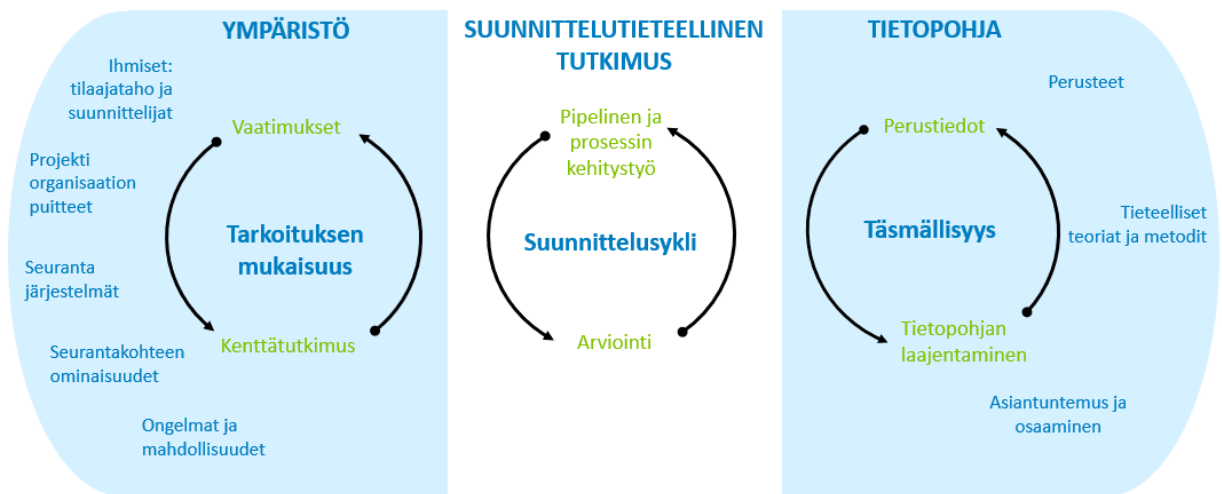
Eri ammattialojen rajapinnoissa tapahtuvalle sosiotekniselle kehitykselle ei ole olemassa vakiintuneita prosessimalleja tai pätevyysvaatimuksiin liittyvää ohjeistusta. Tämä tekee hankintaprosessista resursseja kuluttavan ja voi pahimmillaan estää hankkeen etenemistä tai johtaa huononlaatuisen palvelun hankintaan.

- Miten kokonaisratkaisun käyttöönottoa ja skaalautumista voidaan tukea aluesuunnittelun tai rakennushankkeen alkuvaiheessa esimerkiksi viranomais- tai tilaajaohjauksen keinoin?

Kiinteistöjen ennustavan arvohallinnan menetelmiä on voitava edistää myös kaupunkisuunnittelun ja aluesuunnittelun tasolla. Laajamittaisilla elinkaaritiedon käsittelyn strategioilla on merkittävä rooli ilmatoriskien ennustettavuuden ja sopeutumisen tehtävien määrittelyn kannalta (Larjosto et al. 2021). Tällaisen ohjeistuksen on oltava riittävän avoin, mahdollistaen myöhemmän vaiheen hankekohtaista soveltamista.

1.3 Tutkimusmenetelmiä

Työ suoritetaan soveltaen Design Science eli suunnittelutieteellisen tutkimuksen menetelmää, jonka kohteena on IoT-DT pipeline. Suunnittelutieteellisen tutkimuksen pääasialliset osatekijät ovat esitetty alla kuviossa 1. Pipelinen arkkitehtuuria käsitellään sosioteknisenä ilmiönä, huomioiden tiedonkäsittelyn eri tason vaikutteet. Pipelinen tiedonkäsittelyn elementit, kuten IoT, koneoppimiseen tukeutuva anturidatan rikastuttaminen skenaariodatalta ja DT-kytkennät, esitetään mock-up tasolla käyttäen kohteista kerättyä tai simuloitua dataa.



Kuvio 1. Suunnittelutieteellisen tutkimuksen elementit (oma kuva, mukailtu Hevner 2007)

Pipelinen skaalautumisen eri vaiheiden projektimallit, niiden orkestroinnin periaatteet ja kehitysjohtamisen mallit ovat esitetty luvussa 3.1. Pipeline ohjataan kohti monialaista arvontuotantoa soveltamalla Service-Dominant Logic (SDL) menetelmää, jota kuvataan luvussa 3.2.1. Puolestaan luvussa 3.2.2 esitetty Value of Information (VoI) menetelmää sovelle-

taan pipeline edistyneemmissä vaiheissa anturiverkoston ja tietohallinnan arkkitehtuurien optimointiin monitoimijaverkostoissa.

1.4 Työn rakenne

Tämä opinnäytetyö on muotoiltu seuraavasti. Toisessa luvussa annetaan yleiskuvaus kiertotalouden mukaisista liiketoimintamalleista (Acharya et al. 2020) ja niiden mahdollistamista anturidataan perustuvan rikkaan tiedon hyödyntämisen potentiaalista kolmessa toisiaan täydentävässä suunnassa. Nämä suunnat ovat:

- Energiakorjausten ja energiatehokkaiden ratkaisujen kuntoseurannan hyödyntäminen kiinteistöjen arvohallinnassa (Christersson et al. 2015; Hagentoft et al. 2015).
- Innovatiivisten rakenneteknisten ratkaisujen kuntoseurannan hyödyntäminen kiinteistöjen arvohallinnassa (Aloisio et al. 2020).
- Rakennusosien kuntoarvion tiedon hyödyntäminen kiertotalouden arvohallinnassa (Acharya et al. 2020).

Kolmannessa luvussa täydennetään aikaisempia tutkimuksia (West et al. 2021) keskittymällä pipeline ratkaisun jatkokehitykseen tarvittavan monialaisen, asiantuntijayhteistyön fasilitointiin. Niin rakennusalan kuin tietoliikenteen asiantuntijatyöpanoksia vaativana, tällainen ylisektoraalinen yhteistyö edellyttää erityisen korkeaa orkestroinnin osaamista. Tällöin laadukkaasti digitaalisen alustan luontia edistetään aluesuunnittelun ja rakennushankkeiden varhaisen vaiheen päätöksenteossa varmistamalla hyötyjen saavuttaminen uudelleenmuotoilemalla prosessinohjausta kohti SDL:ää ja arvon yhteisluomista.

Neljännessä luvussa avataan digitaalisten kaksosten (DT) potentiaalia yksinkertaisempien käyttöliittymien vaihtoehtona. Aikaisemmat tutkimukset ovat jo todistaneet DT:n hyödyt data-analytiikkaa ja simulointia yhdistävissä sovelluksissa (West et al. 2021). Luvussa 4 ehdotetaan pipeline jatkokehitykselle 7 käyttöskenaariota, jotka yhdistävät DT:n kypsyyssasteet ja rakennetun ympäristön rakennusten elinkaariaikaisen ennustavan huollon monialayhteistyön alustana (El-Diraby & Sobhkhiz 2022).

Viidennessä luvussa esitetyn mock-up pipeline toiminnallisiin elementteihin kuuluvat tiedonkeruu, analyysi ja skenaariotyöskentely. Pipeline mock-up energiakorjausten kuntoseurannan mock-up tasolla. Tässä esimerkissä korostuu Big data:n pitkäaikaisen hyödyntämisstrategian tärkeys vastuullisen kiinteistön omistamisen ja sijoittamisen strategian osana.

Opinnäytetyön tutkimustulokset esitetään luvussa 7. Käytännön syistä esitetyt ratkaisut keskittyvät viranomais- ja tilaajaohjauksen taustoittamiseen, joiden avulla yksityiskohtaisemmat ratkaisut tulisi selventää iteratiivisesti skaalautuvan tuotekehityksen myötä.

1.5 Käsitteiden määrittely

ADR	Arkkitehtuuripäätösten kirjaus, Architectural decision record
Bikva	Käyttäjien osallistumisen laadunarviointimalli, Brugerindragelse i kvalitetsvurdering
BIM	Tietomallinnus, Building Information Modelling
BLM	Rakennusten elinkaarihallinta, Building Lifecycle Management
BRE	Iso-Britannian testaus-, sertifiointi- ja konsultointipalveluita tarjoava valtakunnallinen organisaatio, Building Research Establishment (UK)
DDS	Rakenteiden vaurioanalyysi, Damage Detection System
DT	Digitaalinen kaksonen, Digital Twin
DTP	Digitaalinen prototyyppi, Digital Twin Prototype
EED	Energiatehokkuusdirektiivi, Energy Efficiency Directive
EU	Euroopan unioni
GDL	Goods-Dominan Logic, hyödykekeskeinen arvoketjumuotoilun periaate
GML	Geography Markup Language
ICT	Tietoliikenne, Information and Communication Technology
IFC	Rakennusalan standardi oliopohjaisen tiedon siirtoon, Industry Foundation Classes

ifcOWL	IFC-standardin mukaisen kokonaisuuden esitys OWL-kuvailukielellä, Industry Foundation Classes in the Web Ontology Language
IoT	Esineiden internetti, Internet of Things
IPCC	Hallitustenvälinen ilmastopaneeli, Intergovernmental Panel on Climate Change
KIRA	Kiinteistö- ja rakennusala, Architecture, Engineering, Construction, Operation (AECO)
LoRaWAN	Pitkän kantaman ulkoverkkoprotokollan MAC-kerros, Low Power Wide Area Network
MAC	Verkon varaamisen ja itse liikennöinnin hoitava osajärjestelmä, Media Access Control
PLM	Tuotteem elinkaaren hallinta, Product Lifecycle Management
RDF	W3C:n standardoima malli tiedon vaihtoon sovellusten välillä erityisesti web-ympäristössä, Resource Description Framework
RIL	Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry
ROTI	Rakennetun omaisuuden tila-raporttisarja
SDL	Palvelukeskeinen arvoketjumuotoilun periaate, Service-Dominant Logic
SHM	Rakenteiden kuntoseurannan monitorointi, Structural Health Monitoring
TCP/IP	Usean tietoliikenneprotokollan pino, Transmission Control Protocol/Internet Protocol
Vol	Tiedon arvonhallinta, Value of Information
WUFI	Rakennusfysikaalinen simulointityökalu, Wärme Und Feuchte Instationär

2 Anturidataan perustuva ennustava arvohallinta rakennetussa ympäristössä: aihepiirin yleinen kuvaus, teoriat ja menetelmät

2.1 Rakennuskannan arvohallinta

Rakennuskannan arvohallinta on olennainen osa modernia kiinteistöstrategiaa ja sijoitus-toimintaa. Tiedonhallinta, automaatio ja tekoälyn hyödyntäminen ovat avainasemassa kiinteistöstrategian määrittelyssä. Rakennuksiin ja infrastruktuuriin liittyvä tieto on näin ollen erittäin arvokasta. Tällaisen tiedon elinkaaren aikaisen hallinnan ja hyödynnettävyyden tehostamiseen liittyvät lukuiset mahdollisuudet.

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL:n ja Teknoliateollisuuden *Rakennetun omaisuuden tila ROTI 2019*-raportin mukaan, vuonna 2019 Suomessa rakennetun ympäristön kunnossapidon laiminlyönti maksaa vuosittain 3,4–5,7 miljardia euroa (RIL 2019). Tämä arvio kuvaa mittavien korjaus- ja uudelleenrakentamisen toimenpiteiden lisäkustannuksia, jotka syntyvät esimerkiksi, kun rakennuksen korjausten tekemättä jättäminen, ylläpidon viivästyttäminen tai vanhentuneiden rakenteiden käytön jatkaminen johtaa tulevaisuudessa suurempiin ongelmiin, kuten romahtamisiin, vesivahinkoihin tai muihin rakennuskomponenttien vaurioitumisiin.

Vuosien 2019-2023 aikana rakennuskannan kuntotason negatiivisen kehityksen trendi on jatkunut, julkisia rakennuksia lukuun ottamatta, muuttumattomina. Tästä voidaan päätellä, että korjaustarpeiden tunnistamiseen ja resurssien allokontiin liittyvissä prosesseissa ei ole vielä tapahtunut merkittävää muutosta. Lisäksi uudenlaiset haasteet tunnistettiin liittyen uudelleenkäytettävien osien ominaisuuksiin, materiaalien ja rakennusratkaisujen korjattavuuteen sekä rakennusalan toimintojen ympäristövaikutuksiin. Kaikissa näissä osaluissa tunnistettiin tiedon saamisen, analysoinnin ja päätöksenteon haasteita (Teknoliateollisuus 2023.)

Huomioiden kestävä kehityksen mukaisia, neitseellisten rakennusmateriaalien käytön vähentämiseen liittyviä tavoitteita, rakennusalan positiiviset työllistämisen ja talouskasvun vaikutukset haetaan tulevaisuudessa todennäköisesti etenevissä määrin tietointensiivisistä toiminnoista, kuten digitalisoiduista kuntoseurannoista ja kunnan ylläpitoon liittyvistä toiminnoista. Tiedonhallinnan ja arvoketjuosaamisen kehitys voivat tällöin toimia synergisesti, mahdollistaen siirron arvoketjujen muotoilusta hyödykekeskeisellä periaatteella (Goods-Dominant Logic, GDL) kohti palvelukeskeistä periaatetta (Service-Dominant Logic, SDL). Tämän prosessin aikana tiedonkeruun tarpeiden huomioiminen tulee vaikutta-

maan liiketoimintamalleissa tunnistettujen arvoehdotuksen, arvonluomisen ja toimituksen sekä arvon talteenoton perinteisiin rooleihin ja määrittämään ne uudelleen.

Hyödykekeskeisen (GDL) ja palvelukeskeiseen logiikkaan (SDL) keskeisin ero on vaihdon peruste. GDL eli hyödykekeskeinen logiikka keskittyy operandiresurssien vaihtoon. Tällöin hyödykekeskeisen logiikan näkökulmasta taloudellisen vaihdon tavoite on luoda ja toimittaa myytäviä esineitä. Arvo upotetaan hyödykkeeseen yrityksen tuotantoprosessin aikana, ja hyödykkeen arvo määräytyy markkinahinnan mukaan, eli sen mukaan, mitä asiakas on valmis maksamaan. Maksimaalinen tehokkuus ja voitto saavutetaan standardoinnin ja mittakaavaedun kautta. Käyttöarvo tuhoutuu asiakkaiden käytössä, jolloin asiakkaiden on hankkiuduttava eroon vanhasta hyödykkeestä ja hankittava korvaavan tuotteen valmistajalta (Wennerholm 2012.)

Hyödykekeskeiseen logiikkaan perustuvat arvonluontimallit hyötyivät usein esimerkiksi lähes vastikkeettomasta neitseellisten resurssien käytöstä sekä matalista jätemaksuista, jotka osoittautuivat pidemmällä aikavälillä ja globaalilla tasolla ympäristön kannalta kestävämmiksi. Pysyäkseen ympäristön ja ihmiskunnan kantokyvyn rajoissa, arvonluonti on kytkettävä irti tuotantosyklistä, joka perustuu tavaroiden luontiin ja niiden arvon nopeaan alenemiseen (Raworth 2017.)

Vaihtoehtoisen näkemyksen arvonluontiin tarjoaa palvelukeskeinen logiikka (SDL), joka näkee, että arvo perustuvan palveluun. Kun hyödykkeet ovat mukana, ne ovat työkaluja palveluresurssien toimittamiseen ja soveltamiseen. Koska hyödykkeet toimivat palvelun toimitusvälineinä, niiden kunnon ylläpitoon kannattaa panostaa sivukustannusten vähentämiseksi. Kilpailuedun kannalta keskeisiä resursseja ovat tieto ja taidot. Toisin kuin hyödykekeskeisessä logiikassa, palvelukeskeinen logiikka määrittelee arvon aina yhteistyössä asiakkaan kanssa. Tästä näkökulmasta arvo luodaan yhteisen yrityksen, henkilökunnan, asiakkaiden ja muiden sidosryhmien yhteisellä panoksella, mutta arvon määrittää aina vastaanottaja, esim. asiakas (Wennerholm 2012.)

Vaikka historiallisesti rakennusten ylläpito ja käyttöään pidentämiseen liittyvät toimenpiteet olivat merkittävässä roolissa omaisuuden elinkaaren aikana, markkinatalouden aiheuttamat paineet ovat aiheuttaneet kiinteistökehityksen asenteiden siirtymistä hyödykekeskeisen logiikan suuntaan. Tämän lähestymistavan vuoksi resurssien optimaalinen käyttö vaikeutuu, ja toisaalta varat käytetään optimaaliselta poikkeavalla tavalla.

Rakennetun ympäristön päättäjien käyttöön kehitettyjen (Acharya et al. 2020) kiertotalouden mukaisten arvomallien tarkoitus on puuttua resurssikäytön merkittävimpiin pullonkauloihin kuten:

- yleensä käyttömallin rajoituksesta johtuva vaajakäyttö, esimerkiksi rakennus tai sen osat ovat käytössä vain osan viikkopäivistä tai vuorokaudesta.
- hallitsematon teknisen velan kasvu ja käyttökustannusten nousu.
- teknisestä velasta tai puutteellisesta toteutuksesta johtuva vaajakäyttö, oletetusta negatiivisesti poikkeavat käyttökokemukset tai tuotot.
- rakennusten purku ennen niiden teknisen käyttöiän päättymistä,

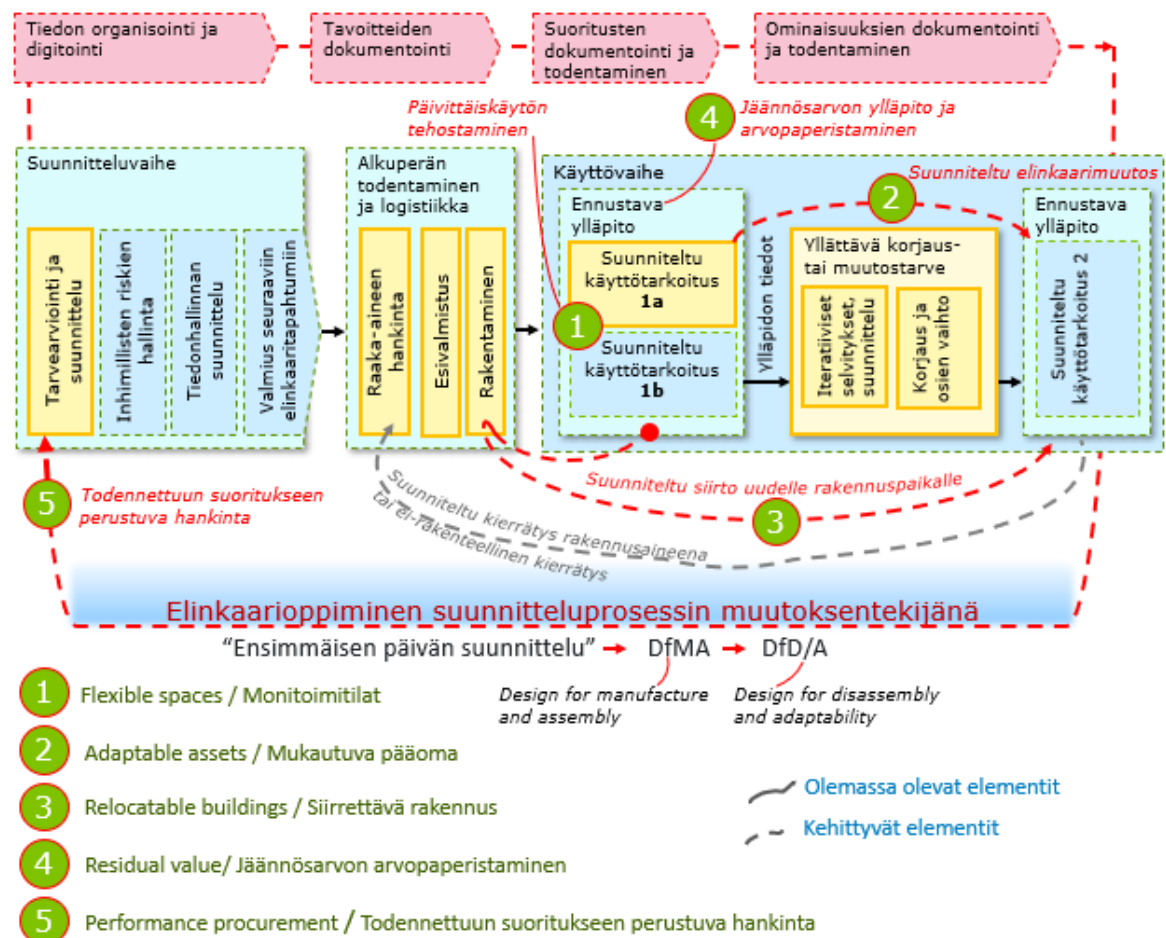
On tunnistettu ainakin viisi toisistaan erottuvia arvonluontimallia, jotka tarjoavat innovatiivisia lähestymistapoja rakennusalan kiertotalouteen ja yksiloivat niiden mukaiset keinot ympäristövaikutusten ja taloudellisen kannattavuuden parantamiseksi. Näiden uudenaikaisen liiketoimintamallien periaate on esitetty kuviossa 2. *Flexible Spaces* eli tilojen muuntojoustavuuteen perustuva malli mahdollistaa rakennusten hyötykäyttöajan optimointia jopa päivittäin. *Adaptable Assets* eli muutosrakentamisen edistämiseen perustuvan mallin tavoite on parantaa rakennusten sopeutumiskykyä muuttuviin markkinaolosuhteisiin ja yhteiskunnallisiin odotuksiin ja näin vähentää hyväkuntoisten rakennusten ennenaikaisia purkupäätöksiä. *Relocatable Buildings* eli rakennusten siirrettävyyteen perustuva liiketoimintamalli keskittyy tonttien puutteellisiin käyttöasteisiin sekä niiden käyttötarkoituksen muutostarpeisiin (Acharya et al. 2020.)

Tämä opinnäytetyö keskittyy erityisesti kahden jälkimmäisen mallin fasilitointiin anturiseurannan ja siihen liittyvän tiedon hallinnan keinoin. *Residual Value* eli jäännösarvomalli kuvaa tulevaisuuden sopimusjärjestelmiä, joissa rakennuskomponenttien säilyvyyttä olisi ylläpidetty käytön aikana purun jälkeisen myyntiarvon maksimoimiseksi. Materiaalien arvon aleneminen rakennetussa ympäristössä vastaa noin 2,1 miljardia euroa menetettyä arvoa vuosittain. Jäännösarvomalleissa tähän arvohukkaan puututaan komponenttien kuntoseurannan, ennustavan ylläpidon, ja suorituskykyarviointien keinoin. Laajentamalla jäännösarvomallin periaatteita koko rakennuksen mittakaavaan, puhutaan *Performance Procurement* eli suorituskykyyn perustuvan hankinnan maalista. Esimerkiksi rakennuksissa käytetystä energiasta 20-40 % voitaisiin säästää kannattavasti varmistamalla, että rakennukset toimivat suunnitelmien mukaisesti. Kun tätä testattiin Lontoossa sijaitsevassa "build-to-rent" -kehityshankkeessa, saavutettiin jopa 3 %:n parannus sisäisessä tuotto prosentissa 30 vuoden aikana (Acharya et al. 2020.)

Rakennetun omaisuuden lineaarinen elinkaarimalli



Rakennetun omaisuuden kiertotalouteen perustuvat elinkaarimallit ja tietohallinnan tehostamisen rooli



Kuvio 2. Lineaarinen malli ja kiertotalouteen perustuvat arvonluontimallit kiinteistöjen elinkaareissa sekä tiedon ehyttämisen ja virtauttamisen rooli kestävässä siirtymässä. Oma kuva, perustuen Acharya et al. (2020); Raivio et al. (2020)

2.2 Rakennusten vaipparakenteiden ennustava kuntoarvio ja ylläpito

Rakennusten energiatehokkuuden parantamista voidaan edistää joko kehittämällä energiaa kuluttavien laitteiden (kuten lämmitys- ym. järjestelmien) tehokkuutta, tai vähentämällä lämmitys- ja viillennysenergian hukkaa rakennuksen ulkokuoren (rakennusvaipan) kautta. Yksinkertaisimmillaan energiatehokkuuden parantumisen arviointikriteereinä käytetään parametreja kuten takaisinmaksuaika, nettonykyarvo, sisäinen korkokanta tai säästetyn energian kustannus (Martinaitis et al. 2007). Edistyneemmät menetelmät sisältävät skenaariotyöskentelyn vaiheet niin energiakorjausten talousseurannan kuin materiaalitekniikan osalta.

Martinaitis et al. (2007) täydentää rakennushankkeiden ja -investointien taloudellisen kannattavuuden arvioimiseen yleisiä menetelmiä, kuten NPV (Net Present Value) ja IRR (Internal Rate of Return), kaksivaiheisella monitavoitepäättöksentekoa tukevalla prosessilla, joka ottaa huomioon hankkeen vaikutuksia laajemminkin. Täten pyritään paremmin hahmottamaan energiansäästöjen vaikutuksia terveyteen ja asumismukavuuteen. RAP-Retro tutkimusprojektin ohjejulkaisussa (Bednar & Hagentoft 2015) keskitytään puolestaan todennäköisyysarviointeihin, jotka voivat vaikuttaa energiakorjauksen suorituskykyyn ja kustannuksiin. Tärkeitä tekijöitä ovat esimerkiksi rakennuksen iän ja kunnan arviointi, rakennusmateriaalien ominaisuudet, korjausmenetelmien valinta, korjausten laatu ja oikeellisuus, käytönaikainen ylläpito, käyttäjien käyttäytymismallit, ilmastonmuutoksen vaikutukset sekä taloudellisten tekijöiden ja viranomaissääntelyn vuorovaikutteinen kehittäminen.

Skenaariotyöskentelyyn perustuva, monitavoitteinen ja riskitietoinen päätöksentekoprosessi on erittäin tärkeä laajamittaisen energiaremontin onnistumisen kannalta, sillä puutteet voivat johtua niin suunnittelu- kuin toteutusprosessin ohjauksen virheistä, virheellisesti tai puutteellisesti ilmoitetuista materiaaliominaisuuksista tai suunnittelu- ja asennusvirheistä. Tällöin kosteusongelmien tai muiden materiaalitekniikkaan liittyvien seikkojen seurauksena energiakorjaus voi aiheuttaa enemmän haittaa kuin hyötyä.

Esimerkkinä mittavasta energiakorjausten aiheuttamasta vahingosta voidaan käyttää Ison-Britannian julkisivukriisiä. Tämä kriisi kehittyi useamman vuosikymmenten ajan joutuessa lukuisten tekijöiden yhteisvaikutuksesta, joihin kuuluivat heikko viranomaissääntely, rakennusalan epäonnistuminen paloturvallisuusstandardien noudattamisessa ja paloturvallisuusongelmiin liittyvien riskien vähättelyn kulttuuri suunnittelussa. Kriisin syntymiseen ovat vaikuttaneet turvallisuusarviointien kilpailutuslainsäädännön voimaantulo 1980-luvulla sekä Building Research Establishment (BRE) asiantuntijapalvelun uudistus vuonna 1997. BRE:n, eli testaus-, sertifiointi- ja konsultointipalveluita tarjoavan valtakunnallisen organisaation yksityistämisen johdosta tämän toiminta muuttui asiantuntijavetoisesta voitonta-

voitteluvetoiseksi. Näiden muutosten yhteisvaikutuksena viranomaiset ovat joutuneet luottamaan entistä enemmän rakennusalan toimijoiden omaan paloturvallisuusosaamiseen (Wikipedia, n.d.-b.)

Rakennusalan toimijoiden riskienhallintaa oli puolestaan altistettu taloustavoitteille. Julkisivukriisin mittakaava tuli ilmi, kun vuonna 2017 Grenfell Tower-tornitalo syttyi tuleen, joka levisi nopeasti tarkoitukseen sopimattoman julkisivujen energiakorjauksessa käytetyn eristemateriaalin takia. Tapahtumassa menehtyi 72 ihmistä. Jatkoselvityksissä paljastui, että myös monissa muissa Ison-Britannian rakennuksissa oli käytetty paloturvallisuuden kannalta riskialtista julkisivumateriaalia. Löydösten seurauksena monet rakennusten asukkaat ovat joutuneet maksamaan kalliita korjauskustannuksia, ja joissain tapauksissa jopa siirtymään pois myyntikelvottomiksi muuttuneista kodeistaan, joiden paloturvallisuutta ei voinut taata. Kriisi on vaikuttanut laajasti Iso-Britannian rakennusalan yrityksiin, vakuutusyhtiöihin ja lainsäädäntöön, sillä pelkästään yli 18 metriä ylittävien rakennusten paloturvallisuuden varmistamisen kustannusarvio on 10-15 miljardia puntaa. Laajoissa selvittelyissä, poliittisissa ja yhteiskunnallisissa keskusteluissa ehdotettiin myös systeemisen tason kehityssuunnat muutosjohtamisen, normistotyön ja turvallisuuden parissa (GOV.UK 2023; Kernick 2021; Sagar 2021; Wikipedia n.d.-a.)

Suomessa ensimmäinen energiakorjausten aalto tapahtui 1970-luvun energiakriisin jälkeen. Johtuen rakennusmateriaalien kosteudenkäyttymisen puutteellisesta ymmärryksestä, korjauskohteissa ilmestyi merkittävin määrin kosteusvahinkoja (Mölsä 2016). Tämä johti rakennusfysiikan tutkimuksen, suunnitteluohjeistuksen ja lainsäädännön kehitykseen (Vinha 2019). Kuitenkin rakennusfysiikka on pysynyt toistaiseksi muusta rakennesuunnittelusta irrallisena osaamisalueena, joka ei ole aina helposti skaalattavissa yhtenäisen ohjeistuksen tai rakenneteknisen ratkaisun tuotteistuksen keinoin, lähtötilanteiden ja osatekijöiden moninaisuuden vuoksi.

Kokonaisvaltainen kosteusriskin hallinta vaatii materiaalien ominaisuuksien tuntemusta, materiaalikerrosten sijoittelun laadunvarmistusta sekä poikkeavalla tavalla toimivien osien (ns. kylmäsiltojen) turvallistamista. Tämän lisäksi rakennuksen suunnittelijoiden arviot perustuvat yleisesti oletuksiin ympäristön vaikutuksista, kuten sädemääristä ja tuulettuvuudesta (Jylhä et al. 2020). Viimeiseksi työmaatoteutuksen yksityiskohdat, kuten esimerkiksi suojapellitysten toteutus, voi vaikuttaa jopa ratkaisevalla tavalla rakenteen toimintaan (Terveet Tilat 2022). Näiden tekijöiden yhteisvaikutusten mekanismien todentaminen edellyttää yleensä anturiseurantaa. Anturityökalujen tai -palveluiden kysyntä tarjonta on kuitenkin tällä hetkellä melko vähäinen, eli kyseessä on toistaiseksi kehittymätön markkina-alue.

Erillisenä tuotteistamisen luokkana voidaan mainita energiatehokkuuden parantaminen arvokiinteistöissä ja suojelluissa rakennuksissa, joissa on usein vain rajoitetusti mahdollisuuksia suorittaa energiaremontti tavanomaisin menetelmin. Esimerkiksi, eristysmateriaalin lisääminen ulkopuolelta voi olla kiellettyä, sikäli kun toimenpiteellä on vaikutusta rakennuksen ulkonäköön. Tällöin kaikki muutokset on tehtävä sisäpuolelta, mikä voi tehdä vanhasta rakenteesta alttiimman jäätymis-sulamissykleistä johtuville vaurioille tai muille vai-pan heikennetystä kuivumisesta johtuville vaurioille.

Vaikka rakennesuunnittelija antaa perustellun arvauksen rakenteen toimintaperiaatteesta, monessa käytännön tapauksessa tieto todellisesta toimintaperiaatteesta on saatavilla vain anturimittauksen avulla. Useammissa tapauksessa täydentävä tieto, kuten verrokkianturin lukemat, asiakirjat, sekä taloussuunnitteluun liittyvä vuorovaikutus, tarjoaa arvokkaita lisäyksiä seuraavien toimenpiteiden suunnittelua varten. Täydentävän tiedon monipuolisuuden vuoksi sen hyötykäytön skaalautumisesta muodostuu merkittävä haaste, jonka ratkaiseminen edellyttää monialaista yhteistyöpanoksen mahdollistamista. Tätä aihetta jatketaan luvussa 3.3.2 Vol-menetelmän parissa.

2.3 Anturidatan hyötykäytön kehityssuunnat arvohallinnan tukena

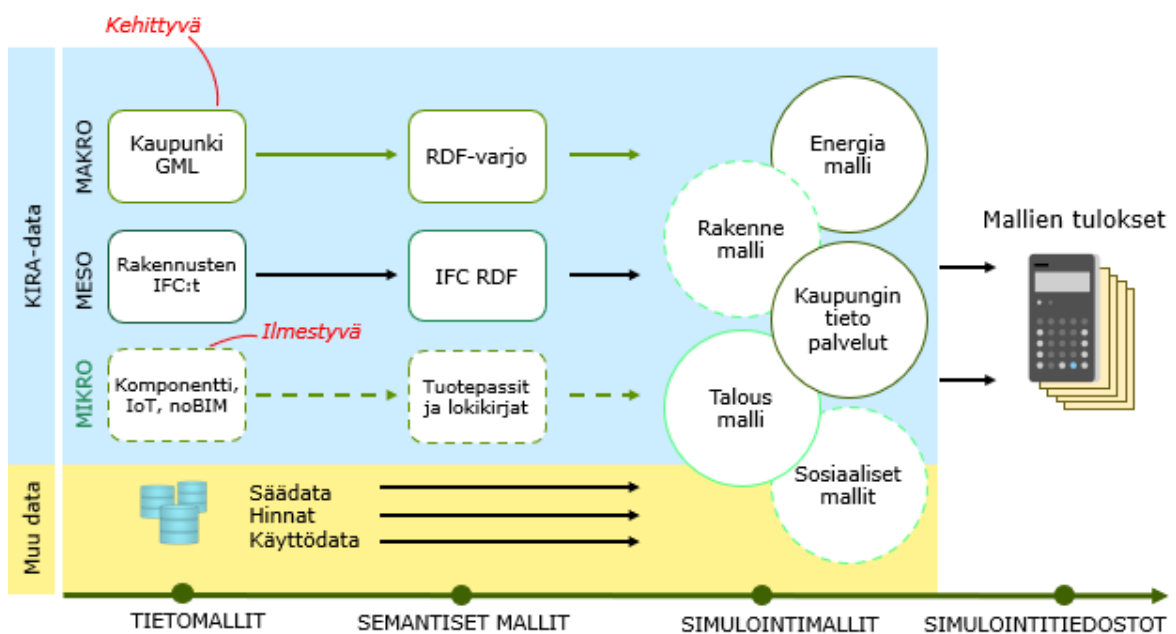
EU:n tason hiilidioksidipäästöjen vähentämisen päämäärien yksittäiset osatekijät ovat siirtyminen vähähiilliseen rakentamiseen, kiertotalouden materiaalivirtojen tehostaminen sekä uudistuvan EU:n energiatehokkuusdirektiivin tavoitteet. Tässä luvussa selvitetään, miten nämä tavoitteet voidaan vastuullisesti siirtää käytäntöön, varmistamalla holistisen optimoinnin ja käytännöllisyyden periaatteita.

Liittyen energiatehokkuustavoitteisiin, Costa et al. (2016) esittämä esimerkki havainnollistaa (ks. kuvioon 3 ehjin viivoin esitetyt toiminnot) eri mittakaavan tietomallien yhdistämisen kaupungin tason elinkaarimalliksi. Costa et al. (2016) esittämässä tapauksessa energiakulutuksen seurantadataa havainnollistetaan käyttäen rakennusten IFC (Industry Foundation Classes) mallit, joita viedään pilviympäristöön merkintäkielen (engl. *serialization language*) RDF (*Resource Description Framework*) ifcOWL- ontologiaa käyttäen. Tämä suoraviivainen ja vakioitu siirtoteknologia, joka tukee myös yhteensopivuutta aiempien versioihin, mahdollistaa kuitenkin vain yleispiirteisten ja vahvasti vakioitujen mallien siirtoa (Pauwels et al. 2022).

Costa et al. (2016) esimerkissä IFC-lähtöistä dataa yhdistetään kaupunkimittakaavan GML (Geography Markup Language) tietomallin kustomoituun RDF-varjoon. Pilvessä tieto yhdistetään ja manipuloidaan luodessa arviointimalleja, jotka tuottavat syötteitä analyysi-

ja strategiatyöhön. Datan hyötykäyttöä tukevat mm. energiasäästötoimien kirjastot ja simulointityökalut. Costa et al. (2016) kehittämä platformityökalu toimittaa suosituksia niin strategisella tasolla, kuten kaukolämmön jälkiasennus- ja käyttöönottoalueiden määrittelyn parissa, kuten myös yksittäisen rakennuksen toimenpiteiden määrittelyn tasolla.

Yllä kuvatun kaltaiset järjestelmät hyödyntävät lähtökohtaisesti sähkölaitteisiin asennettujen mittareiden dataa, jolloin päätöksenteko perustuu toteutuneen ja suunnitellun energiakulutustiedon vertailuun. Yleisemmin, kuten esitetystä esimerkistä, rakennuskomponentikohtainen mikrotason mallinnus ja tiedon hyödyntäminen jää toteuttamatta. Tässä työssä havainnollistetaan, kuinka monipuolisemman mikrotason tiedon ja erityisesti anturitiedon avulla voi käynnistää useampia muitakin arvoketjuluonnon prosesseja.

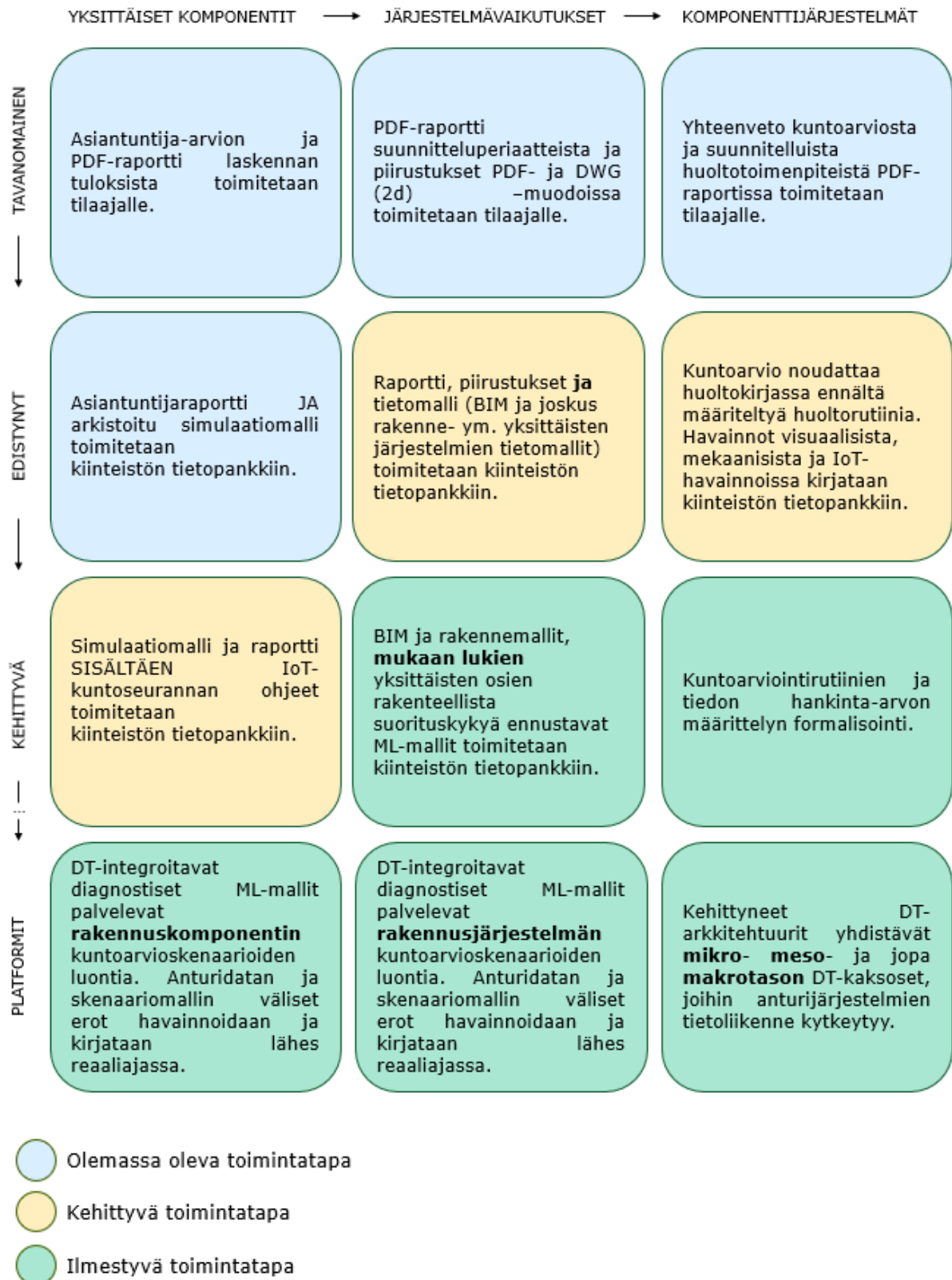


Kuvio 3. Rakennuksen BIM-mallista kaupungin energiamalliin ja kiertotalouteen: tietoliikenteen toteutuneet, kehittyvät ja ilmestyvät väylät (kehitetty lähteiden Boje et al. 2022; Costa et al. 2016; Elagiry et al. 2020 perusteella)

Ensinnäkin sekä korjaus- että uudisrakennushankkeissa energiatehokkuuteen tähtäviä tavoitteita voidaan lähestyä eri tavoin. Tässä opinnäytetyössä keskitytään rakennusvaipan (rakennuksen ulkoisen kuoren) luvun 2.2. mukaisiin lisälämmöneristämisen ratkaisuihin ja niiden laadunvarmistustehtäviin. Digitaalisen tietohallinnan alustatalouden kehityksen kannalta, tämä vaihe etenee kehittämällä kirjallisiin raportteihin perustuvia käytäntöjä kohti avointa lähdekoodia ja digitaalisesti luettavissa oleviin malleihin perustuvaa raportointia. Havaintojen perusteella voidaan muotoilla tarkempia, yksityiskohtaisempiin tulevaisuuden skenaarioihin perustuvia energiatehokkuuden parannusratkaisuja.

Seuraavaksi, kun käytännön kokemus rakennuksen arvon hallinnasta yksinkertaisten mallien perusteella on saatu, on mahdollista siirtyä uusiin menetelmiin vähähiilisen rakentamisen ja kiertotalouden suunnissa. Tämän vaiheen tehtävänannossa on tärkeää tunnistaa tavanomaisen rakennesuunnittelun, ja jo olemassa olevien rakenteiden rakennesuunnittelun, erot. Perinteisesti uudisrakentamisen suunnittelussa rakennesuunnittelija perustaa päätöksentekonsa joukolle oletuksia, joiden tarkoitus on varmistaa, että rakennusjärjestelmä on kestävä, samalla mahdollistaen suunnitteluprosessin kustannustehokkuuden. Erilaiset suunnitteluoletukset voivat kuitenkin tuottaa toisistaan poikkeavat tulokset. Vaikka oletukset yhdistettäisiin turvallisesti, tämä ei anna tarkkoja tietoja rakennusosien todellisissa käyttötilanteissa ilmenevistä rasituksista. (Rodionova 2021) Tässä tapauksessa asiakas voi pyytää rakennesuunnittelijaa määrittelemään rakennejärjestelmän seuranta-kohteet, joiden elinkaariaikaista toimintaa seuraten varmistetaan, että rakennus toimii suunnitteluoletusten mukaisella tavalla. Rikastuttamalla näin saadut tiedot muilla tietolähteillä ja muodostamalla rakennejärjestelmän ylläpitoskenaariot, siirrytään elinkaarisuunnittelun tehtäväpiiriin.

Lopuksi, kun rakennushankkeen tilaajan osaamisprofiili kehittyy kattamaan sekä rakennusosien paikallisen suorituskyvyn että rakennusjärjestelmän (tai muiden rakennusjärjestelmien) suorituskyvyn kannalta oleellisen digitaalisen tiedon hallinnan, edetään monimutkaisempia ja integroituja järjestelmiä kohti. Tällaiset järjestelmät antavat käsityksen omaisuuden arvosta ja sen komponenteista sekä nykyisessä käytössä että uudelleenkäytössä. (Ammar et al. 2022.) Yhteenveto esitetyistä kehitysprosessin vaiheista on esitetty kuviossa 4.



Kuvio 4. Asiantuntija-arvioiden digitalisointi platformin kehitysvaiheina: pdf:sta kohti IoT:ta ja tekoälyä rakennetussa ympäristössä (oma kuva)

3 Arvonluontiin keskittyvä prosessiohjaus monialatyöskentelyssä

3.1 Kehitysprojektin ohjauksen mallit

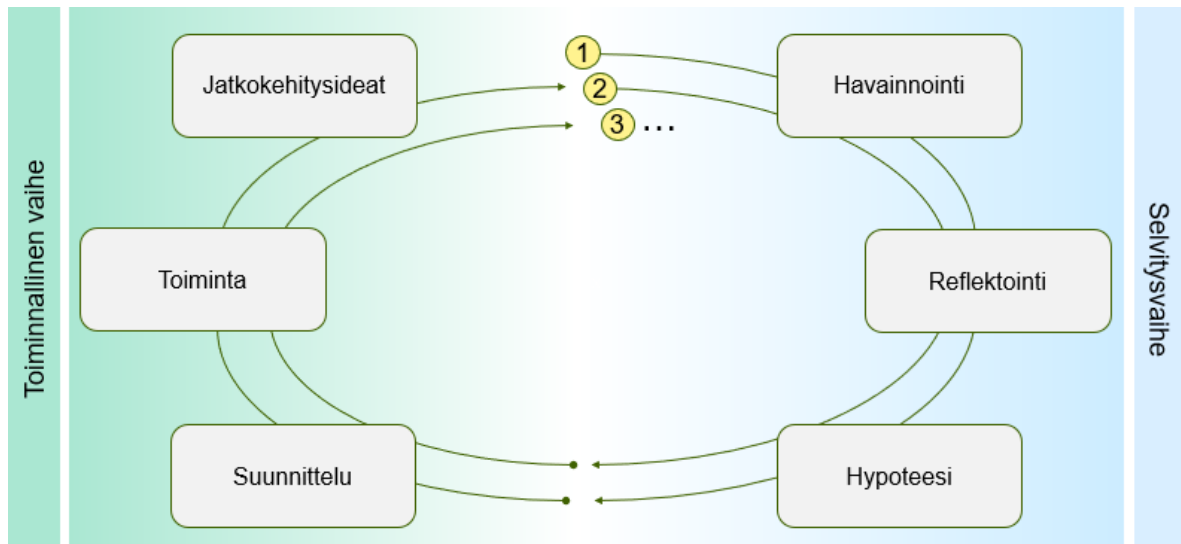
Tässä luvussa käsitellään yleisellä tasolla kehitystoiminnan eri tasoisia elementtejä. Käsitely aloitetaan yksittäiseen mock-up kokeiluun soveltuvasta lineaarisesta kehitysprojektin mallista. Kehitysprojektin iteratiivista kehitystä seurataan aina *spagettimaiseen* toimintamalliin (Toikko & Rantanen 2009, 69-72), joka perehdyttää todellisten tilanteiden ja kompleksisen kehitystoiminnan alkuperäisen suunnitelman välissä ilmestyviin ärsykkeisiin ja niiden käsittelytapoihin. Luku päättyy ekosysteemin tason muutosprosessien muotoiluun pullonkauloihin ja kehittämistyön käyttövoimana toimivan *energisoinnin* käsitteen läpikäynnillä.

3.1.1 Mock-up ja pilottivaiheen yksinkertaiset kehitystoiminnan ohjauksen mallit

Lineaarimalli on yksinkertaisin kehittämistoiminnan kokonaisuuksia kuvaava malli. Malli koostuu neljästä peräkkäisesti asetetuista vaiheista. Ensimmäisessä vaiheessa projektille asetetaan selkeä tavoite, joka voi pohjautua erilaisiin tekijöihin, kuten innovatiiviseen ideaan, havaittuun tarpeeseen tai jopa ulkopuolisiin paineisiin. Toisena tulee suunnitteluvaihe. Tämä vaihe kattaa useita keskeisiä tehtäviä: riskianalyysin tekemisen, projektin osallistujien määrittelyn ja projektin integroinnin organisaation laajempiin tavoitteisiin. Erityisesti suunnitteluvaiheen aikana on tärkeää tunnistaa projektiin liittyvät käytännönlähtöiset seikat ennen varsinaisen suunnitelman laatimista. Joissakin tapauksissa nämä kaksi osaa saatetaan erottaa toisistaan itsenäisinä vaiheina, mutta molemmat ovat kriittisiä projektin onnistumisen kannalta. Kolmas vaihe on toteutus. Tässä vaiheessa projekti siirtyy käytännön toteuttamiseen, ja sen perimmäinen tavoite on saavuttaa suunnitteluvaiheessa asetetut päämäärät. On kuitenkin yleistä, että suunnitelmia tulee muokata matkan varrella, koska projektiin liittyvät olosuhteet voivat muuttua tai uusia tietoja tulee ilmi. Projektin päättäminen ja arviointi on yksittäisen projektin viimeinen vaihe. Tällöin arvioidaan projektin tuloksia ja erotellaan varsinaisen projektin työsuoritukset tulevista jatkokehitysprojekteista. Tämä auttaa varmistamaan, että projektin tulokset voidaan hyödyntää tehokkaasti ja että tulevat kehitystoimet on suunniteltu järkevästi.

Yksittäisen mock-up tason pipelinen vaiheessa lineaarinen malli on riittävä. Mock-up prototyypeistä voidaan kehittää useampiakin vaihtoehtoisia ratkaisuja esimerkiksi yritysten tai korkeakoulujen järjestäminä opinnäytetöinä siten, että anturipalvelun tilaajalla ja lisäpalveluiden toimittajilla on suppeat, ennalta sovitut roolit projektissa.

Seuraavassa, pilottivaiheessa, lisääntyvä kompleksisuus ja käytännön tavoitteiden selvittämisen tarve edellyttää siirtoa kehitysprosessin spiraalimalliin. Lineaariseen malliin verrattuna, spiraalimalli mahdollistaa entistä vaativampien tavoitteiden saavuttamista. Tällöin pitkäjänteisiä kehitystavoitteita tarkennetaan iteratiivisesti, useampien ketjutettujen projektien aikana. Kehittämistoiminnan tulokset arvioidaan myös iteratiivisesti (Toikko & Rantanen 2009.) Spiraalimallin mukaiset projektivaiheet havainnollistettiin kuviossa 5.



Kuvio 5. Spiraalimallin kaavio. Yhteenveto lähteistä Ojasalo ym. (2009) sekä Williams (2006)

Pilottivaiheen edetessä kohti skaalautumista, kehitystoiminnassa on otettava käyttöön laajemmat tasomallit. Edellisten verrattuna, tasomalleissa huomioidaan myös kehittämissuunnitelman skaalautuminen eri tasoille, kuten esimerkiksi peräkkäisesti etenevässä Bikvasa (Brugerindragelse i kvalitetsvurdering, käyttäjien osallistumisen laadunarviointimalli), jossa arvioinnit kerätään asiakkailta, kenttätöntekijöiltä, hallintojohdolta ja poliittisilta päättäjiltä niin, että edellisen tason arviointitulokset tukevat seuraavan vaiheen tiedonkeruuta (Krogstrup 2004). Tasomalliin voidaan myös lisätä syklimäisyyttä muodostamalla ekspansiivinen kehittämissuunnitelma, joka etenee yksittäisestä käytännön ongelmasta kohti yhteisöllistä ratkaisua (Toikko & Rantanen 2009.)

3.1.2 Jatkuva integroitu kehitys: pullonkaulat ja prosessiohjauksen mallit

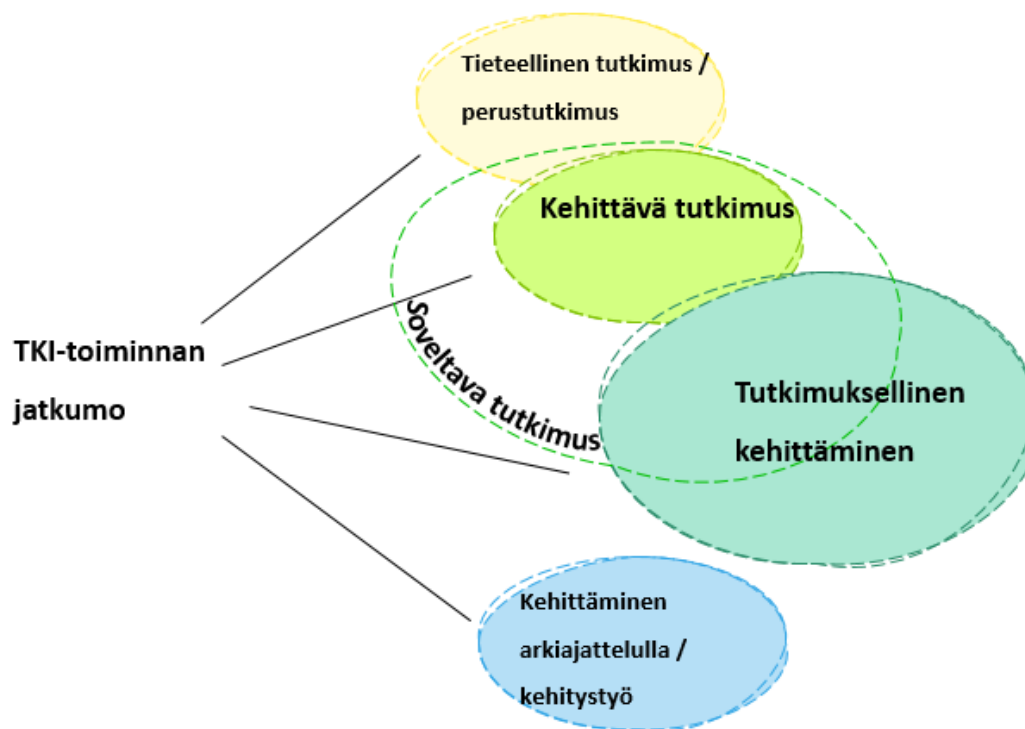
Edellä kuvattuja yksinkertaistettuja malleja kritisoidaan kolmesta näkökulmasta. Ensinnäkin projektin yksinkertaistettu vaiheistus ei ole aina hyödyksi tai sen noudattaminen voi olla ristiriidassa projektin todellisten tavoitteiden kanssa. Toiseksi näiden mallien oletusperiaate on se, että prosessit etenevät johdonmukaisesti ja progressiivisesti. Kolmanneksi ”kehittämistoiminnan malleihin sisältyy vain niukasti itsekritiikkiä” (Toikko & Rantanen 2009, 70.) Tällöin todellisten haasteiden luonne sekä käytännön kehittämistoiminnan kaottinen ja hidas luonne jäävät projektiorganisaation havainnoinnin ulkopuolelle. Tietoinfrastruktuurin kehittyessä yksinkertaisten menetelmien rajoittuneisuus vaikuttaa työn tehokkuuteen etenevässä määrin. Seurannan ja keskipitkän kehitysstrategian tavoitteisiin tällöin kuuluu puutteiden havainnointi ja *spagettimallin* mukaisen kehitysprosessin vaiheittainen käyttöönotto (Toikko & Rantanen 2009.)

Spagettimalli vastaa kehitysprosessien lineaarisen, tasomallin ja spiraalimallin yksinkertaistuksien kritiikkiin (Toikko & Rantanen 2009, 69-72). Mallin edut korostuvat silloin, kun yksittäinen kehittämisprosessi toimii integroituna osana organisaation tai organisaation mittakaavaa lähestyvän suurhankkeen kehitysprosessia. Tällöin dialoginen prosessi on välttämätön (Verveij 2017) kuvaamien kompleksisuuden tekijöiden hallittavuuden kannalta:

- Jatkuvuus ja epädiskreettisyys (*non-decomposability*) tekevät järjestelmien yksittäisten osien analyysit mahdottomiksi. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että järjestelmää ei voida jakaa erillisiin osiin analyysia varten, sekä että yksittäisten osien vaikutusta kokonaisuuteen on vaikea eritellä, ja toisaalta kokonaisuuden muutokset vaikuttavat välittömästi yksittäisiin osiin.
- Todellisuuden satunnaisuus (*contingency of reality*) kiinnittää huomioomme soioteknisten tekijöiden, kuten kulttuurin, kommunikaation ja vuorovaikutuksen vaikutuksiin. Nämä tekijät vaikuttavat siihen, miten samankaltaiset strategiat voivat johtaa erilaisiin tuloksiin eri yhteyksissä. Todellisuuden satunnaisuus haastaa ajatuksen siitä, että samat toimenpiteet johtaisivat aina samoihin lopputuloksiin.
- Kokoon puristumattomuus (*non-compressibility*) viittaa ihmisen käsityskyvyn rajoittuneisuuteen, joka tekee suurien järjestelmien havainnoinnista aina lähtökohtaisesti asenteellisen.

Yksittäiset ja ketjutetut kehitysprojektit yhdistyvät organisaatioiden ja laajemman ekosysteemin kuviossa 6 havainnollistetuksi kehitysjatkoksi. Kuvio 6 havainnollistaa, että tutkimuksellinen kehittämistyö ”on asetettu keskelle jatkumoon, jonka toisessa ääripäässä on

tieteellinen tutkimus ja toisessa kritiikitön omiin näkemyksiin pohjautuva kehittämistyö” (Ojasalo et al. 2014, s.17) (Ojasalo et al. 2014; Toikko & Rantanen 2009.) Vuorostaan Heikkilä et.al. (2008) tunnistaa (Ojasalo et al. 2014) kuvattua jatkumoa tutkimus- ja kehittämistoiminnan kokonaisuutena. Heikkilän et al. (2008) mukaan, tutkivassa kehittämisessä yhdistyvät tutkimuksellisen asennoitumisen ja aktiivisen, tavoitteellisen ja kehittävän toiminnan merkityksiä. Puolestaan Toikko & Rantanen (2009) erottavat tutkimuksellisen kehittämisen ja kehittävän tutkimuksen käsitteitä siten, että ensimmäisen lähtökohtana toimii toiminnallinen muutos, kun taas jälkimmäisen lähtökohtana toimii tutkimuksellinen asenne.



Kuvio 6. Tutkimuksellisen kehittämistyön luonne ja käsitteistöt. Yhteenveto lähteistä Heikkilä et.al. (2008), Ojasalo et.al. (2009) sekä Toikko & Rantanen (2009).

Toikko & Rantanen (2009) käyttävät tieteellisen tutkimuksen vastineena termiä perustutkimus. Perustutkimuksella pyritään luomaan uutta teoriaa, joka ”selittää tai kuvailee tutkitavaa ilmiötä” (Toikko & Rantanen 2009, 19) noudattaen tieteellisiä perinteitä siten, että tutkija on mahdollisesti irrallaan tutkimuksen kohteesta eikä välttämättä tähtää käytännöllisiin tavoitteisiin (Ojasalo et.al. 2009, Toikko & Rantanen 2009.) Arkiajattelulla kehittämällä ymmärretään pyrkimystä ratkaisemaan käytännön ongelmia, jolloin tietoa kerätään sattumanvaraisesti, päätökset perustuvat omiin ideoihin ja vuorovaikutus työn aikana on vähäinen. Raportointi tällaisessa työssä tehdään vasta työn päätyttyä (Ojasalo et.al.

2009). Arkiajattelulla kehittämisen synonyymina käytetään, mm. lähteessä Toikko & Rantanen (2009), yksinkertaistettua käsitettä ”kehitystyö”.

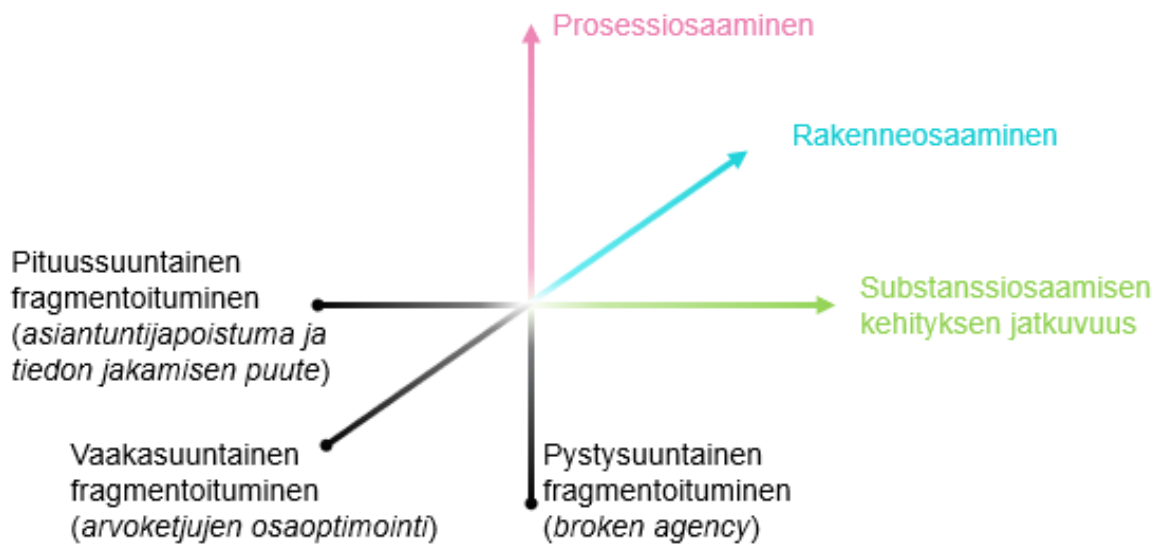
Edelliseen verrattuna, tutkimuksellisella kehittämisellä pyritään ratkaisemaan käytännön ongelmia tai uudistamaan käytäntöjä keräämällä määrätietoisesti tietoa niin käytännöstä kuin myös teoriasta. Työhön kuuluvat niin monipuolinen vuorovaikutus kuin myös tutkimusmenetelmien laaja kirjo. Työn dokumentointia ja vuorovaikutuksellista esittämistä eri vaiheissa tunnustetaan tutkimuksellisen kehitystyön veturina (Ojasalo et.al. 2009.)

Tämän jatkumon strategiakehitykseen liittyen, jo Jätteenmäen ja Vanhasen hallitusten selonteossa 2000-luvun alkupuolella tunnustettiin hyvin innovaatioympäristön hallinnollisten ja lainsäädännöllisten puolien kehittämisen tärkeä rooli tulevaisuuden menestymisen ja kansainvälisen kilpailukyvyn kannalta, kuten myös ”byrokratiahajuisen ja -makuisen innovaatiotoiminnan” sekä johtamisen, organisaatioiden toimintatapojen ja vuorovaikutusosaamisen pullonkaulojen aiheuttamat riskit (Ståhle et al. 2004). Kuitenkin edelleen, perustutkimuksen jalkauttaminen uusiin tuotteisiin, palveluihin ja tuotantoprosesseihin kohtaa merkittävät ja järjestelmälliset esteet (Kangasharju & Vasara 2023). Näitä ilmiöitä havainnollistavat myös rakennusalan digitalisaation kehityksen noidankehää kuvaavat tutkimustulokset. Alan ekosysteemin pelisäännöt käytännössä palkitsevat suuria toimijoita innovoinnin tukahduttamisesta; rajoitettu ja valikoiva tiedon siirto tutkimuksesta käytäntöön mahdollistaa edelleen muun muassa materiaalien ja ihmisten työpanosten kestävän kehityksen periaatteiden vastaisia käytötapoja, koska vaikutusvaltaiset sektorin toimijat kannattavat vallitsevan tilanteen säilymistä (Aksenova 2020).

Innovatiivisen ympäristön kehittämisen ja ylläpidon edellytyksenä Ståhle et al. (2004) on kuvannut dynaamisen toimintaympäristön johtamisen kolmitasoista osaamista, joka muodostuu substanssi-, rakenne- ja prosessiosaamisesta. Tunnistaen rakennusalan valikoivan suhteen transformatiiviseen innovaatioon, Hall et al. (2014) ovat arvioineet, että arvoketjujen ja perinteisten ammattirajojen uudelleenmuotoilua vaativa, eli integraalinen innovaatio *diffusoi* (Pernaa 2013) rakennusteollisuudessa kolme kerta hitaammin kuin olevia arvoketjuja täydentävä, eli modulaarinen kehitystuote. Hall et al. (2014) julkaisussa innovaatiotoiminnan pullonkaulojen kartoitukseen on ehdotettu Ståhle et al. (2004) johtamisen osaamisen elementtejä noudattava 3-ulotteinen koordinaatisto (kuvio 7).

Vaakasuuntainen fragmentoituminen kuvaa arvoketjujen osaoptimointia siten, että kokonaiskuvasta puuttuu yksittäisten kehitystoimintojen synergiavaikutusten arviointi ja ristiin-subventointi. Sen sijaan innovaatioekosysteemin yksittäisten elementtien resurssoinnista päätetään yksitellen siten, että transformatiivisen innovaation tärkeät aspektit jäävät toteuttamatta, koska itsenäisinä suorituksina ne eivät pysty kilpailemaan perinteisten ratkai-

sujen kanssa. *Pystysuuntainen fragmentoituminen* käsittää kullakin projektivaiheella vaikuttavien sidosryhmien ja päätöksentekijöiden intressien ja arvojen ristiriitaisia vaikutuksia, joita kuvataan myös termillä *broken agency*. Tällöin jokaisessa vaiheessa vaikuttavat osapuolet voivat siirtää kustannuksia myöhempien vaiheiden sidosryhmille. Puolestaan *pitkittäinen fragmentoituminen* viittaa vaihtuvuuteen projektitiimeissä ja yhteistyökuvioissa, jonka vaikutuksesta hiljaisen tiedon kertyminen, vaihto ja kodifointi heikentyy tai estyy kokonaan. Tällöin jokaisessa kehitysvaiheessa uudelleen muodostettu tiimi aloittaa lähes nollasta eikä hyödy aikaisemmissa projekteissa saadusta kokemuksesta. Proaktiivisen arvohallinnan 3d-integraatio koostuu näin organisaation ja ekosysteemin kyvykkyyksien kehittämisestä kolmella akselilla. Pystysuuntainen akseli kuvaa arvoketjun vaiheiden yhdistämistä, vaakasuuntainen arvoketjun monialaintegrointia sekä aikajana kuvaa kehitysprosessin jatkuvuuden varmistamista (Hall et al. 2014.)



Kuvio 7. Innovaatiojohtamisen edellytykset ja pullonkaulat Ståhle et al. (2004) sekä Hall et al. (2014) perusteella.

Jatkuvaan kehitykseen perustuva prosessiohjaus edellyttää siten jatkuvaa työyhteisön osaamisen ja oppimiskykyjen ylläpitoa. Työyhteisöissä tämä tarkoittaa tutkimuksellinen kehittämistyön periaatteiden pitkäaikaista soveltamista yrityksen omaan toimintaan, yhteistyö- ja arvoverkostoihin sekä oppilaitos- ja tutkimuslaitosyhteistyöhön. Dynaamisten kyvykkyyksien näkökulmasta kehitystoiminnan integrointi alkaa kentältä nousevien akuuttien tutkimustarpeiden järjestelmällisestä selvittämisestä (*sensing*), edistäen sellaisten tarpeiden proaktiivista ja ennustavaa keruuta sekä liittyvien tietohallinnollisten, viestinnällisten ja hallinnollisten työkalujen kehitystä. Selvitystyön myötä varmistetaan myös kehi-

tysresurssien saamisen ja palvellaan osaamishallinnan resurssoinnin riittävyyden ja enustettavuuden tavoitteita. Selvitystyö luo pohjan varsinaiselle tutkimustyölle (*seizing*) ja sitten kehitystyölle (*transforming*), joka on kolmesta vaiheesta vaativin (Adam & Lindahl 2017.)

Kehittämistyön käyttövoimana toimii *energisointi*, eli sellainen toiminta, joka ”aktivoi toimijoita ja vahvistaa heidän kyvykkyytään vastata muuttuvaan toimintaympäristön haasteisiin” (Salonen ym. 2017, 21). Energisointia kuvataan myös työyhteisön yhteisenä flowtilana (Salonen ym. 2017.) Energisoinnin onnistuessa organisaation muutosprosessin skaalalla, käynnistynyt prosessi vetää mahdollisesti puoleensa toimijoita myös laajemmin näin edesauttaen myös ekosysteemin tason muutosprosesseja (Stähle et al. 2004). Transformatiivinen innovaatio voi siis oletetusti kehittyä paitsi ylhäältä alas säädeltynä, myös ruohokuuritasolta silloin, kun työkuultuurin, organisaatioiden toimintatapojen ja vuoro vaikutusosaamisen oikeanlainen yhdistelmä syntyy yksittäisessä markkinatoimijassa tai koko sektorissa.

3.2 Rakennetun ympäristön elinkaaritiedon hallinta: käsitteet ja menetelmät

3.2.1 Service-Dominant Logic (SDL) eli hyödykekeskeisen logiikan soveltaminen rakennetun ympäristön tiedonhallintaan

Tiedonhallinnan arkkitehtuurien kehittyessä luvussa 2 kuvatulla tavalla, rakennetun ympäristön kompleksiset ohjelmisto- ja palvelujärjestelmät, kuten rakennusten digitaaliset kaksoiset, tullaan kehittämään olevien ohjelmistotyökalujen tai sovellusten päälle. Tämän prosessin aikana tiedonkeruun tarpeiden huomioiminen tulee vaikuttamaan arvoketjujen perinteisiin rooleihin ja määrittämään ne uudelleen. Service-Dominant Logic (SDL) menetelmää soveltaen, voidaan lähestyä arvoverkostojen uudelleenmäärittelyyn ja kodifiointiin kolmesta avainnäkökulmasta (Camposano et al. 2021).

Ensimmäinen havainto on, että yhä useammalla arvoketjun, tai pikemmin arvoverkoston, osallistujalla tulee olemaan mahdollisuus tuottaa arvokasta tietoa. Tällaisissa arvoverkostoissa ei ole ennalta suunniteltuja ”kuluttajan” tai ”tuottajan” rooleja, vaan toimijat yhdistävät resurssinsa ja osallistuvat palveluiden vaihtoon arvon luomiseksi. Tällaisen tai vastaavan muutoksen tarve on tunnustettu myös kansallisessa digitaalisessa strategiassa, jonka mukaan, ”[t]eknologian hyötyjä ei saada vanhoja malleja digitalisoimalla, vaan palveluiden järjestämisen logiikka ja prosessit on järjestettävä uudelleen.” (Camposano et al. 2021; Valtioneuvosto 2022).

Toiseksi, vaikka rakennuksen BIM-tietomallilla on merkittävä roolinsa digitaalisessa elinkaaritiedon hallinnassa, se on todennäköisesti vain osa jatkuvaa oppimista helpottavaa tietoaalustaa. SDL-menetelmää hyödynnetään digitaalisten kaksosten kehittämisessä Product Lifecycle Management (PLM) mukaisista ratkaisuksista kohti Building Lifecycle Management (BLM)-alustaa, joka palvelee erityisesti rakennetun omaisuuden elinkaarihallintaa. (Camposano et al. 2021.)

Samalla rakennuksen tietomalli muuttuu kertakäyttöisestä, rakennuksen valmistusta palvelevasta digitaalisesta tuotteesta moniulotteiseksi ja päivittyväksi yhteistyöalustaksi, joka palvelee uusien arvoketjujen luontia rakentamisprosessin ja etenevin määrin rakennuksen koko elinkaaren aikana. Lopuksi suunnittelutiedon ja muun yksityiskohtaisen tiedon skaalautuvuus päätöksenteon tarpeisiin tunnustetaan arvon luomisen avaimeksi. SDL-menetelmä tarjoaa yhteistyön ja palvelusuunnittelun puitteet digitaalisten kaksosten skaalautumiselle teollisuuden verkostoissa, yksittäisten elementtien kaksosista kohti rakennusten ja älykaupunkien digitaalisia kaksosia.

3.2.2 Value of Information (Vol), eli tiedon arvoanalyysimenetelmä

Keskeisessä roolissa SDL-menetelmän mukaisessa arvonluontiprosessin esimerkissä on tiedon arvon (Value of Information, Vol) käsite. Vol auttaa siis tunnistamaan, milloin lisätiedon hankkiminen on kustannustehokasta sekä määrittämään, kuinka paljon kannattaa sijoittaa tiedon hankkimiseen. Vol-analyysiin liittyy useita tekijöitä, kuten tiedon tarkkuus ja luotettavuus, sen vaikutus päätöksentekoon, ajoitus ja kustannukset. Tämän analyysin avulla voidaan tehdä parempia päätöksiä, sijoittaa varoja tehokkaammin ja vähentää riskejä (Kangas et al. 2010; Keisler et al. 2014; Long et al. 2022). Tiedon hallinnalla ja jalostamisella on avainrooli yhteiskunnan toimintojen siirtymisessä kohti kestävien talousmallien kehitystä (Kauppila et al. 2022). Oletetusti myös tämän roolin kvantitatiivinen arviointi voidaan päätöksenteon tueksi suorittaa Vol:n avulla menetelmän kehittyessä.

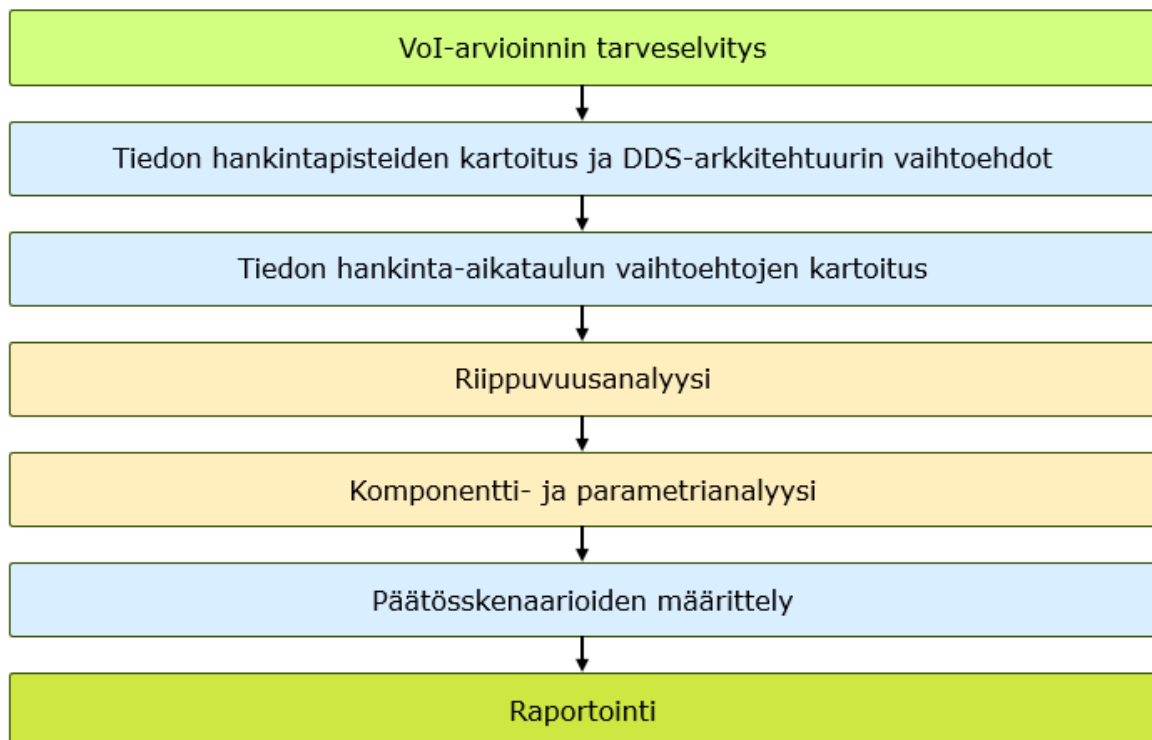
Vol:ta voidaan soveltaa monilla aloilla, rakennustekniikan lisäksi lääketieteessä ja ympäristötieteissä kuten monessa muussakin. Tämän tutkimuksen aiheeseen liittyvissä käytännön sovelluksissa Vol voi auttaa esimerkiksi määrittämään, kuinka paljon kannattaa sijoittaa rakennusten kunnossapitoon, arvioimaan uusien teknologioiden käyttöönoton vaikutuksia, tai arvioimaan ympäristövaikutuksia päätöksenteossa. Rakennetussa ympäristössä Vol määrittämisen menetelmiä sovelletaan esimerkiksi liittyen rakenteiden vaurioanalyysiin (DDS, Damage Detection System) ja rakenteiden kuntoseurannan (Structural Health Monitoring, SHM) tarpeisiin.

Anturiseurannan sovelluksissa Vol-analyysiä sovelletaan päätöksenteon tueksi silloin, kun työn vaativuus ja anturijärjestelmän mahdollinen kustannus on niin iso, että on tarpeen arvioida lisätiedon hankkimisen kustannuksia ja hyötyjä. Tällöin Vol-analyysin avulla tehdään päätöksiä kuntoseurannan kannalta optimaalisen anturijärjestelmän konfiguraatiosta, kuten antureiden määrästä, asennuspisteistä, sekä seurannan kestosta. Joissakin tapauksissa pitkäaikaista seuranta voidaan hyväksyä kallisarvoisten korjaustöiden vaihtoehtona, kun taas toisessa tapauksessa kertamittauksilla saadaan jo riittävästi tietoa toimenpiteiden määrittämiseksi (Long et al. 2022; Stepinac et al. 2019.)

3.3 Kehitysjohdamisen ja tiedon arvohallinnan mallien soveltaminen IoT-DT pipelineen kehitysprosessissa

3.3.1 Tiedon arvon (Vol) lineaarisen analyysin malli

Long et al. (2022) yksilöi anturijärjestelmän muotoiluun liittyen seuraavat vaiheet, joita voidaan suorittaa lineaarisesti siten, että tilaajan päätöksenteko tapahtuu Vol-analyysin alkuvaiheessa. Tällöin prosessissa tunnistetaan seitsemän erillistä vaihetta, joiden sisällä iterointi tapahtuu vain asiantuntijatyössä. Lineaarisen prosessin vaiheet ovat kuvattu seuraavaksi sekä havainnollistettu kuviossa 8.



Kuvio 8. Tiedon arvon määrittämisen lineaarinen toteutusprosessi. Oma kuva Long et.al (2022) prosessikuvauksen perusteella.

Ensimmäisessä vaiheessa eli Vol-analyysin tarvearviointivaiheessa varmistetaan, että anturiseurannan tuottaman tiedon perusteella voidaan kvantifioida korjaustoimenpiteiden tai vaihtoehtoisten toimenpiteiden kustannuksia. Tällöin kartoitetaan esimerkiksi kokemusperäisesti vastaavien kohteiden kustannusarvioiden tarkkuus ja hyödynnettävyys ja selvitetään, miten havainnot voivat vaikuttaa päätöksentekoon ennen anturijärjestelmän toteuttamista. Ensimmäisen vaiheen päätteeksi tehdään päätös Vol-analyysin käynnistämiseksi.

Anturiseurannan kannalta optimaalisten seurantapisteen ja anturijärjestelmän kokonaisarkkitehtuurin vaihtoehdot määritellään toisessa vaiheessa yhteistyössä seurattavan kohteen rakennejärjestelmän haasteisiin perehtyneen rakennusinsinöörin tai -tutkijan kanssa. Rakennusalan ammattilainen määrittää tällöin mittauspisteet, joiden seurantadatan perusteella voi tehdä päätökset joko yksittäisten elementtien ominaisuuksista tai niiden muutoksesta, tai kokonaisen rakennejärjestelmän tai sen osan toimintaperiaatteesta tai muutoksesta. Ratkaisevan tärkeää on yksilöidä rakenteellisia järjestelmäparametreja, joita tarvitaan odotetun riskin ja kustannusten vähentämiseksi. Rakentamisen aikaisissa projekteissa insinöörien on mietittävä, integroidaanko anturijärjestelmää osaksi suunnittelu- tai rakennusvaiheita, joka saattaa vaatia laajempaa, projektin eri osapuolien välistä koordinaatiota. Olemassa olevien rakenteiden osalta anturijärjestelmän toteuttamista koskevat päätökset tehdään huolto- ja korjaustoimenpiteiden yhteydessä sekä käyttöiän päättämiseen liittyvän päätöksenteon yhteydessä, jolloin seurantapisteen määrittelyyn saattavat vaikuttaa kohteen käyttöön liittyvät seikat. Tällaiset seikat, kuten myös ympäristön aiheuttamat häiriöt ja mittausmelutaso, ovat yksittäisen anturijärjestelmän *stokastiset ominaisuudet*, joita tulisi huomioida järjestelmän arvioinneissa. Näitä ominaisuuksia ei valvota tai ne ovat vain osittain anturijärjestelmän käyttäjän hallinnassa (Long et al. 2022.)

Sen jälkeen kuin ensimmäisen vaiheen päätteeksi muodostellaan useammat anturijärjestelmän arkkitehtuurin skenaariot, täydennetään ne toisessa vaiheessa monitoroinnin jatkuvuuteen liittyvillä skenaarioilla. DDS sovelluksissa, joiden tarkoitus on esimerkiksi selvittää yksittäisen vahinkotilanteen vaikutukset, jo yksittäinen mittaus voi riittää tuomaan merkittävää arvoa, kun taas laajempi SHM valikoimakirjo voi hyötyä useammastakin datapistestä tai jopa jatkuvasta monitoroinnista. Jatkuvan monitoroinnin tapauksessa hyötykustannussuhteen laskentaa voi merkittävästi tarkentaa päätöstekoskenaarioiden avulla, joihin sisällytetään tietyt anturilukeman raja-arvot sekä niiden perusteella käynnistämät ylläpito- tai korjaustoimenpiteet.

Tarkoitusta palvelevasta anturijärjestelmästä riippuen, luotettavuuden ja vikasetokyvyn vaatimukset saattavat edellyttää useampien anturien asennusta, kun taas normaalitilassa näiden täydentävien sensoreiden toimittama tieto on päällekkäinen, tai niiden toimittamassa tiedossa on järjestelmävaikutusten takia merkittäviä keskinäisiä riippuvuuksia (Long et al. 2022.) Tarvittaessa näitä riippuvuuksia tulisi tutkia esimerkiksi numeerisen analyysin keinoin ja selvittää kohdat, missä täydentävä tieto voi johdattaa numeerisesti seurantajärjestelmän luotettavuutta menettämättä. Kehittyneemmissä tapauksissa rakennusalan ammattilainen voi yhteistyössä anturitoimittajien ja anturijärjestelmän arkkitehdin kanssa soveltaa anturijärjestelmän suunnitteluun anturifuusion (*sensor fusion*) menetelmän (Lea 2020, 67-68, 357-358) mukaisia toimintoja. Anturifuusion menetelmän avulla eri sensoreiden kerättyä data yhdistetään parantaakseen järjestelmän yleistä toimintakykyä ja tarkkuutta.

Parametrisen analyysin keinoin tutkitaan seuraavassa vaiheessa valittujen DDS-järjestelmien hyöty- ja kustannusominaisuuksien, ja rakennetun omaisuuden kohteen heikkenemiseen liittyvien riskiarvioiden päätöksentekoon vaikuttavuuden arviot. Seurantapisteiden sijoitteluun liittyvässä päätöksenteossa, joka palvelee seurannan hyötykäyttöpotentiaalin, sekä seurannan aikaisten riskien minimoinnin ja hallinnan kustannusten optimointia, Long et al. (2022) ehdottavat päätöspuiden ja Bayesilaisen teorian hyödyntämistä.

Parametrisen analyysin havainnot käytetään tarvittaessa ja mahdollisuuksien mukaan alkuperäisiä anturiseurannan skenaarioita muokatessa ja optimoidessa. Yleensä useampien mallien parametrisen analyysin perusteella voidaan tehdä havainnot, jotka ohjaavat alkuperäisten tai uusien mallien optimointia ja kalibrointia. Tällöin Vol-analyysia suoritetaan vaiheita 2...6 iteroiden asiantuntijan tai asiantuntijaryhmän toimesta. Viimeistellyjä skenaarioita esitetään analyysin tilaajalle, joka tekee päätökset skenaarioiden kustannus-hyötysuhdetiedon perusteella.

3.3.2 Tiedon arvon (Vol) analyysi ja hallinta monitoimijaverkostoissa

Laajemmin SDL-menetelmän mukaisessa arvonluontiprosessissa Vol:n perustuva palvelumuotoilu voidaan aloittaa tuottajien ja kuluttajien kartoituksesta. Tällaisen monialaisen tai verkostoidun päätöksenteon tueksi sovelletaan lineaarimallin verrattuna edistyneempiä päätöksentekoprosesseja.

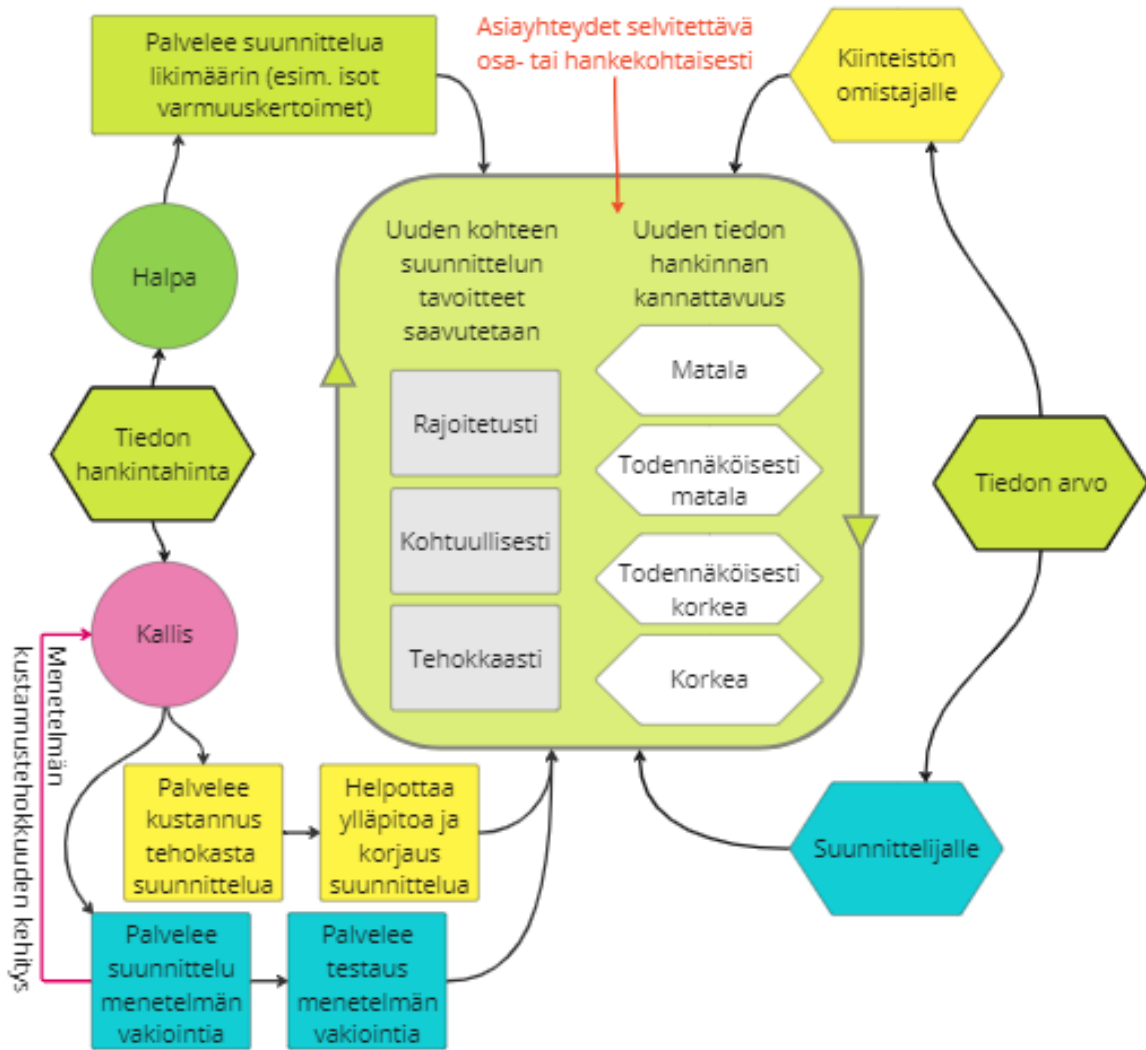
Yksinkertaisen monialasuunnittelun tapauksen havainnollistamiseksi, rakenneantureista kerätyn anturidatan hyötykäyttöön omistetussa kirjallisuustarkastelussa (Riggio & Dil-

maghani 2020) yksilöivät kahta pääasiallista tiedonkäyttäjää, eli kiinteistönomistajaa ja suunnittelijaa.

Kiinteistönomistajien kannalta anturidatan merkitys liittyy usein kiinteistön tai rakenteen historialliseen, kulttuurilliseen tai infrastruktuuriseen arvoon. Esimerkiksi historiallisesti merkittävässä rakennuksessa anturidata voi tarjota kriittistä tietoa rakennuksen kunnosta, mikä puolestaan voi vaikuttaa päätöksiin rakennuksen huollosta, korjauksesta tai jälkihuollossa. Tämän tyyppiset tiedot auttavat kiinteistönomistajia ymmärtämään, milloin ja missä korjaukset ovat tarpeen, ja miten ne tulisi toteuttaa vahingoittamatta rakennuksen historiallista arvoa.

Rakennusten suunnittelijoiden näkökulmasta anturidatan arvo taas liittyy enemmän suunnittelutyöhön ja sen tehokkuuteen. Tietojen avulla suunnittelijat voivat kehittää ja parantaa suunnittelumenetelmiään, optimoida suunnittelutuloksiaan ja varmistaa, että suunnitellut ratkaisut vastaavat todellisia olosuhteita. Esimerkiksi vertaamalla anturitietoa, joka kuvaa rakenteen todellista käyttäytymistä, alkuperäisiin suunnitteluoletuksiin, suunnittelijat voivat tunnistaa mahdolliset suunnitteluvirheet tai -puutteet. Tämä puolestaan auttaa heitä tarjoamaan entistä laadukkaampia ja tehokkaampia suunnittelupalveluita, mikä parantaa heidän kilpailukykyään markkinoilla.

Käytännössä, anturitiedolla voidaan täydentää myös laboratoriotutkimusten otannat tai anturitiedon avulla voi tarkentaa laboratoriotutkimuksen suunnitelmia. Näin arvonluontiin voi kytkeä myös varsinainen tieteellinen tutkimus. Kuviossa 9 esitetyn mukaisesti, monitoimijaverkostoissa tiedonhankinnan strategian optimointiprosessia käydään iteratiivisesti, huomioiden eri osapuolten eri tasoiset kehitystavoitteet.

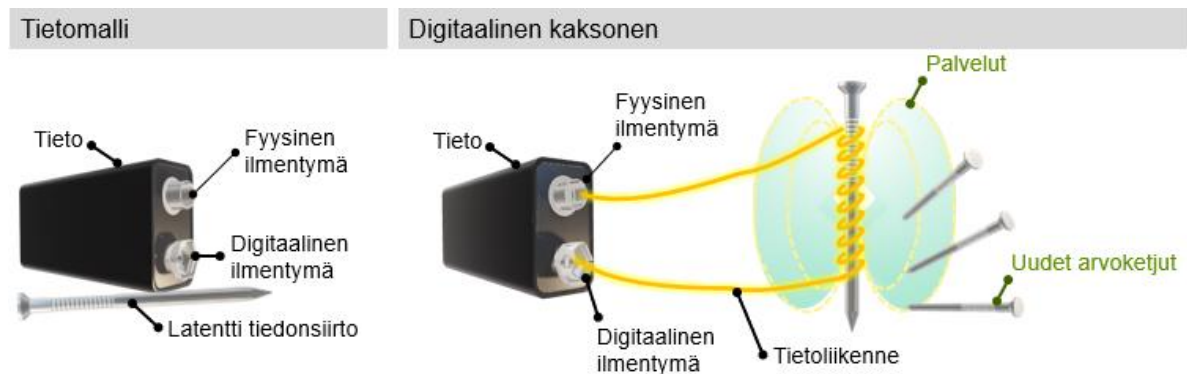


Kuvio 9. Tiedon arvon määrittämisen iteratiivinen vuoropuheluprosessi (oma kuva Long et.al (2022) sekä Franke & Franke (2014) perusteella)

4 Digitalinen kaksonen: käsitteet ja roolit älykaupungin digitaalisessa infrastruktuurissa

4.1 Digitaalisen kaksosen yleiskuvaus

Digitaalinen kaksonen on käsite, joka tarkoittaa digitaalista mallia todellisesta kohteesta, jota kutsutaan digitaalisen kaksosen fyysiseksi ilmentymäksi (DTI). DTI:n ja sen digitaalisen kopion, eli mallin, lisäksi digitaaliseen kaksoseen kuuluvat myös tieto, tämän tiedon yhteydet ja liittymät sekä tietoon perustuvat palvelut. Tieto käsittelee yleensä molempien mallien tuottamaa dataa. Palvelun käsite erottaa digitaalista kaksosta muista kyberfysikaalista järjestelmistä, joiden tuottama hyöty voi olla esimerkiksi puhtaasti tieteellinen. Digitaaliset kaksoset edustavat siis kyberfysikaalisten järjestelmien alajoukkoa, joka lähtökohtaisesti palvelee käytännönläheisiä, sovellettuja ja arvoketjutietoisia tarkoituksia (Boje et al. 2022, 8.1.2.) Fyysisen ja digitaalisen ilmentymien välisen tietoliikenteeseen perustuvien palveluiden jatkuva kehitys on myös digitaalisen kaksosen ja tavanomaisen tietomallin periaatteellinen ero (ks. kuva 1).



Kuva 1. Tietomalli vai digitaalinen kaksonen: arvonluonti ratkaisee.

Tietoliikenteen arkkitehtuuri on siten ratkaisevassa roolissa digitaalisen kaksosen hyöty-potentiaalin ja kaupallistamisen näkymien kannalta. Luoden tietoliikenteen infrastruktuuri luvussa 2.3 esitettyjen tietosisältöjen ylläpitoon, digitaalisten kaksosten ekosysteemi voi lähtökohtaisesti yhdistää eri tasoisia tietomalleja. *Makrotason* kaksoset käsittävät kaupungin tai alueen tietovarantoja, esimerkiksi Helsingin kaupungin digitaalinen kaksonen tarjoaa tietoa niin rakennusten energiakulutuksesta kuin myös kaavoitusten muutoksista (Helsingin kaupunki 2023). *Mesotason* kokonaisuuksia käsittelevä digitaalinen kaksonen voi esimerkiksi fasiloida aluetason ja yksittäisen rakennuksen digitaalisen mallin välistä tieto-

liikennettä. *Mikrotason* digitaalinen kaksonen voi esimerkiksi tukeutua koko rakennuksen suunnittelun aikana luotuun tietomalliin (BIM:n) tai vaihtoehtoisesti sen fyysisenä ilmestymänä voi toimia rakennuskomponenttien kuntoa seurattava anturijärjestelmä tai rakennusta hyödyntävä ja palautteita toimittava yhteisö (Boje et al. 2022.)

Kiinteistö- ja rakennusalan (KIRA) perinteinen ymmärrys digitaalisesta kaksosesta juontuu 1960-luvulta, jolloin tietokonemallien käyttö yleistyi rakennus- ja infrastruktuuriprojekteissa. 1980-luvulla käyttöön tuli tietokonemallinnusohjelmia, jotka mahdollistivat tarkemman ja monipuolisemman mallinnuksen. Seppäsen et al. (2023) mukaan, rakennusalalla digitaalinen kaksonen on pitkään ymmärretty tämän kehityksen jatkovaiheena eli lähinnä tietomallina, jota käyttö- ja ylläpitovaiheessa rikastetaan reaaliaikaisella tiedolla rakennuksen toiminnasta. Digitaalisen kaksosen suunnittelu- ja rakennusvaiheen käyttötapaukset ovat saaneet huomiota ja kehitysrahoitusta Sacksin et al. (2020) läpimurtavan julkaisun jälkeen (Seppänen et al. 2023.) Lu et al. (2020) mukaan, digitaalisen kaksosen käyttö- ja ylläpitovaiheen toiminnot olivat samassa ajankohdassa vielä kehittymättömät. Kehitys selkeää ja skaalautuvaa ratkaisuarkkitehtuuria kohti on siis tapahtunut olennaisin määrin viimeisten vuosien aikana ja on edelleen merkittävästi kesken.

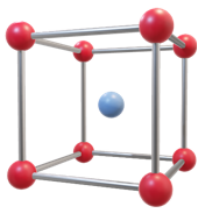
El-Diraby & Sobhkhiz (2022) mukaan, tietomalliin perustuvan digitaalisen kaksosen konsepti kohtaa edelleen useampia käytännön rajauksia. *Yhteentoimivuuden* tavoitteiden optimoinnin kannalta, digitaalisen kaksosen ja sen fyysisen ilmentymän täydellisen yhteentoimivuuden saavuttaminen on mahdollista rakennuksen yksittäisen järjestelmän tasolla. Tällöin tiedon automaattisen jalostuksen, uudelleenkäytön ja yhdistämisen tarpeisiin käytetään esimerkiksi luvussa 2.3 käsiteltyä RDF-pohjaista ifcOWL-ontologiaa tai edistyneempää LBD (Linked Building Data) modulaarista teknologiaa. RDF:n edistyneempienkin ratkaisujen käyttö ei ole kuitenkin suoraviivainen olio-ohjelmointiympäristöissä (Pauwels et al. 2022). IFC:n kapasiteetti on kuitenkin rajallinen, ja kaiken potentiaalisesti hyödyllisen tiedon, sekä eri järjestelmien vuorovaikutusten linkittäminen varsinaiseen tietomalliin on todennäköisesti mahdotonta huomioiden KIRA-alan ja muun relevantin tiedon formaattien ja rakenteen monimuotoisuuden (El-Diraby & Sobhkhiz 2022 209-210).

Käytettävyyden optimoinnin kannalta tiedon hyötykäyttö arvoketjussa ei aina edellytä sen esittelyä samalla yksityiskohtaisella tasolla, joka on tarpeen yksittäisen järjestelmän toimintaperiaatteiden havainnollistamisen kannalta. Lisäksi IFC sen nykyisessä muodossa ei tarjoa liiketoiminnan suunnittelun tai kiinteistöohjauksen rajapintoja. Tiedon skaalautuminen arvoketjun todellisten tarpeiden mukaisesti mahdollistaa virtuaalisen mallin keventämistä, tai edellyttää sen täydentämistä uusilla toiminnoilla niin, että IFC-toimintojen hyödyllisyys jää vähäiseksi.

Viimeksi *toiminnallisuuden* optimoinnin kannalta kehittyneen digitaalisen kaksosen pitäisi tukea niin analyttisiä, olemassa olevaan tietoon perustuvia malleja (descriptive models) kuin myös tulevaisuuden skenaarioiden ymmärrystä tukevia malleja (prescriptive models). Digitaalinen kaksosen voi siis jäljitellä fyysisen ilmentymänsä todellista käyttäytymistä, tai voi toimia myös sen digitaalisena prototyypinä (DTP), jonka kehitys edeltää varsinaisen fyysisen ilmentymän valmistusta (Bolton et al. 2018; Grieves 2016). Näkemykset digitaalisen mallin suunnitteluperiaatteista ja käyttötarkoituksista eroavat digitaalista kaksosta kehittävä tahon ja sen arvoketjukonfiguraation mukaan.

Nämä rajaukset huomioiden muodostuu näkemys digitaaliseen kaksoseen itsenäisenä, fyysisistä ilmentymää edeltävänä tai täydentävänä tietotalouden artefaktina, joka fasilitoi työskentelyä niin strukturoitujen kuin puoli- ja strukturoimattomien tietokantojen parissa (ks. kuva 2). Digitaalisen kaksosen tehtäväksi muodostuu tällöin myös sellaisten ominaisuuksien varjostus, joiden ilmentymä ei ole välttämättä fyysinen vaan esimerkiksi ilmiöperäinen (oleskelumukavuus), sosiaalinen (turvallisuus) tai taloudellinen (vuokratulot).

Strukturoitu data



Taulukoitu tieto, jolla on selkeä rakenne.

- *Tabuloitua laskentaraaportit*
- *IoT-data*

Puolistrukturoitu data



Asiakirjat ja muu kirjallinen tieto

- *Teksti, jossa ei ole selkeää rakennetta*
- *Tiedon tulkinta edellyttää ihmisen osallistumista.*

Strukturoimaton data



Hiljainen tieto

- *Valokuva-aineistot*
- *Dokumentoimaton tieto*

Kuva 2. KIRA-alan eri tietolähteiden jäsentely tietorakenteen perusteella.

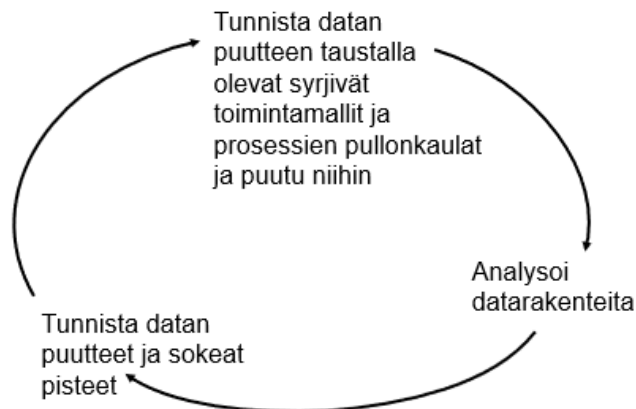
Tällä hetkellä ihmistä rakennetun ympäristön käyttäjänä ei pääsääntöisesti sisällytetty osana DT-malleja, joka on tunnistettu kestävästä kehitystä rajoittavana tekijänä (El-Diraby & Sobhkhiz 2022). Kehitysprosessin muotoilussa älykaupunkien suunnittelun tarpeisiin on kuitenkin tärkeä edistää eri ihmisryhmien tarpeiden tasavertaista huomioimista, ja kaupunkiympäristön parantamista käyttäjäkeskeisesti sekä elinympäristömme muiden elollisten ja elottomien järjestelmien ylläpitotarpeiden huomioivaksi. Nämä tavoitteet ovat tunnistettu EU:n Industry 5.0 visiossa (European Commission 2022). Puolestaan Matternin

(2021) nykykaupunkien antropologiaan ja teknologiaan keskittyvä monialainen tarkastelu tarjoaa näille tavoitteille sekä niiden yhteydessä tunnistetuille pullonkauloille laajan pohjituksen digitaalisen teknologiakehityksen ja yleensä tiedon hallinnan näkökulmasta.

Industry 5.0 periaatetta voidaan soveltaa digitaalisen kaksosen muotoiluun, joka tällöin toimisi osaamisenhallinnan ja kehittämisen alustana tukien ihmisten hyvinvoinnin edistämistä itsenäisesti sekä kytkennässä eri tason alueellisiin järjestelmiin. Optimaalisessa tilanteessa digitaalinen kaksosen voi toimia rakennetun omaisuuden, Industry 5.0 mukaisen kestäväan rakentamisen ja sosiaalisen kehityksen, ja älykkäiden kaupunkien periaatteita yhdistävänä rajapintana. Digitaalisen kaksosen fasilitoimien oivallusten myötä voidaan potentiaalisesti nopeuttaa alan perinteisten tietoliikenteen pullonkaulojen havainnointia ja niiden ratkomista (Rodionova & Oldenburg 2023).

Kuviossa 10 esitettyä periaatetta noudattaen, tietorakenteen analyysiä voidaan hyödyntää paitsi välittömästi palvelukeskeisten arvoketjujen kehitykseen, myös sellaisten alueiden havainnointiin, joiden dokumentointi on syystä tai toisesta puutteellinen. Näiden klustereiden tietohallinnan vahvistaminen ja hiljaisen tiedon siirto analyyttisen käsittelyn ja havainnollistamisen piiriin luo pohjan uusien oivallusten ja tuotekehityksen jatkuvalle kehitykselle myös tulevaisuudessa.

Industry 4.0:sta kohti Industry 5.0:aa



Kuvio 10. Digitaalinen kaksosen tietoliikenteen diagnostiikan ja kestäväan kehityksen väli-neenä

4.2 Digitaalisen kaksosen laatuvaatimukset ja kehitysvaiheet.

Gemini-periaatekehitys on kehitetty UK:ssa ”Data for public good” periaatteiden pohjalta, ja se sisältää seuraavat viisi kehitysvaihetta (Bolton et al. 2018):

1. Yksinkertainen tietomalli: Tämä vaihe keskittyy perustietojen keräämiseen rakennuksesta ja sen ympäristöstä.
2. Laajennettu tietomalli: Tässä vaiheessa tietomalli laajenee sisältämään rakennuksen tekniset järjestelmät ja yksityiskohtaisemman tiedon rakenteesta.
3. Liitettävyyden: Tässä vaiheessa digitaalinen kaksonen liitetään rakennuksen IoT-järjestelmiin ja muihin ulkoisiin tietolähteisiin.
4. Kehittyneet analytiikkaominaisuudet: Tässä vaiheessa digitaalinen kaksonen mahdollistaa monimutkaisten analyysien suorittamisen, kuten ennustavan ylläpidon ja energiatehokkuuden optimoinnin.
5. Kokonaisvaltainen liiketoimintakäyttö: Viimeisessä vaiheessa digitaalinen kaksonen on integroitu kaikkiin liiketoimintaprosesseihin ja sen avulla voidaan optimoida kaikkia rakennuksen toimintoja.

Suomessa noudatetaan käytännössä samankaltaisia kehitysvaiheita, joissa keskitytään tietomallien laajentamiseen, liitettävyyteen ja edistyneisiin analytiikkaominaisuuksiin. Käytännön syistä yksinkertaisen tietomallin vaiheessa voidaan lisäksi erotella tietoarkkitehtuurin suunnittelun ja visuaalisen rajapinnan vaiheita. Tämä mahdollistaa tiedon hyötykäyttöpotentiaalin havainnollistamista, jonka avulla perustellaan investoinnit varsinaisen visuaalisen rajapinnan kehitykseen.

Kestävän kehityksen tietokäsittelyn tarpeet nivoutuvat Bolton et al. (2018) muotoiltuun Gemini-periaatteen viitekehikseen. Ensimmäisessä vaiheessa keskitytään yksittäisen rakennetun omaisuuden tietorakenteiden määrittelyyn ja niiden ylläpidettävyyden varmistamiseen, eli pystysuuntaisen integraation (ks.3.1.2) fasilitointiin. On luotava myös periaatteet, joita noudattaen asiayhteyksien ja yksittäisten tekijöiden keskinäisten epälineaaristen vaikutuksien dokumentointi on jatkossa mahdollista. Tämä tarkoittaa, että koska järjestelmän suunnittelun ajanhetkellä ei ole mahdollista tietää sen kaikista kehitystarpeista ja esimerkiksi tulevaisuuden tutkimuksissa havaituista riippuvuuksista, on hyvä varmistaa, että mikään tietovaranto ei ole rakenteellisesti asetettu siiloon. On varmistettava, että kehittyvän järjestelmän jatkossa tarjoamat tilannekuva ja suositukset eivät aiheuta kartoittamattomia ulkoisvaikutuksia (Mattern 2021).

Tämän jälkeen on luotava mekanismit strukturoitujen ja strukturoimattomien tietolähteiden, kuten aikasarjadatakantojen ja PDF-dokumentaation, aitouden ja paikkansapitävyyden varmistamiselle. Tietorakenteen ja resurssien määräytyessä on luotava edellytykset tiedon toimittamiselle. Käytännön kokemuksella tämä toteutuu luomalla tiedon vastaanottamisen periaatteet kuten esimerkiksi tarkastuslistat. Seuraavassa vaiheessa huomio kiin-

nitty rakennuksen eri järjestelmien keskinäisiin vaikutuksiin. Tässä kohdin luodaan ja testataan alustavia parametrisia optimointiskenaarioita sekä kehitetään tarvittavat tiedon siirron mekanismit. Sensemaking-menetelmien kehittyessä, on kehitettävä ja vakioitava oppimismenetelmiä. Nämä menetelmät tukevat tiedon skaalautumista ja visualisointia eri tarpeisiin. Lopullisessa vaiheessa digitaalisen kaksosen arvoketjurajapinta viimeistellään. Tämä toimenpide perustuu aiempien vaiheiden kehitystuloksiin ja tukee elinkaaritloudelista päätöksentekoa, esimerkiksi investointi- tai vakuutus päätösten yhteydessä. Näiden kehitysvaiheiden graafinen yhteenveto on esitetty myös kuviossa 11.

Anturijärjestelmän tietohallinnan alustana, digitaalisen kaksosen tulisi tukea sen vaaka- ja pystysuuntaisen integraation (ks. 3.2.1) toimintoja ja kehittyä tiedonhallinnan pitkittäisen integraation apu työkaluna, fasilitoimalla rakennetun omaisuuden elinkaariaikaisen tiedon ylläpidon. Tällöin digitaalisen kaksosen arkkitehtuuria tulisi suunnitella huomioiden sen tulevien integraation ja kehitystehtävien tarpeita. Ajallisesti kehitystarpeet voi jaksoitella siten, että vain osa digitaalisen kaksosen toiminnoista ovat käytössä välittömästi sen käyttöönoton hetkellä. Tärkeä on kuitenkin huomata, että elinkaaren aikaisten toimintojen käyttöönottoa tulisi varmistaa jo rakennetun omaisuuden ja sen digitaalisen kaksosen suunnittelun alkuvaiheessa modulaarisen rakenteen ja laajennettavuuden keinoin. Digitaalisen kaksosen tilaaja voi siis määrittellä jopa useamman vuoden pituisen kaksosen kehitys- ja käyttöönotto-ohjelman siten, että sen toimittamat hyödyt vastaavat jokaisessa vaiheessa sen fyysisen kaksosen hallintaan liittyviä tarpeita ja projektin kustannushallinnan edellytyksiä. Tehtävien vaiheistus on suppeasti havainnollistettu Taulukossa 1.

	Vaihe	Tehtävä
1	Strategiavaihe	Hankkeen toiminnallisen vision ja strategian laadinta.
2	Hankeryhmän muotoilu	Strategian mukaisten roolien ja -vastuiden määrittäminen. Suunnittelun aikaisen tavoitteiden seurannan suunnitelma.
3	Esisuunnitteluvaihe	Kehityssuunnitelma vaiheille 2...8. Arkkitehtuuripäätösten kirjausten (ADR, mm. van Heesch et al. 2012) sekä rinnakkaisen viestinnällisen Soft Landings-prosessin (UK BIM Framework 2019) käynnistäminen.
4	Suunnittelu- ja toteutusvaihe	Riskianalyysi (aikaisempien hankkeiden vaiheen 8 perusteella)

		Staattisen mallin toimitus, joka palvelee rakennetun omaisuuden ja sen osien tunnistamista.
5	Käynnistysvaihe	Relevanttien sidosryhmien kartoitus. Käytön aikaisen tavoitteiden seurannan suunnitelma Seurannan ja valvonnan toiminnot sekä hälytykset.
6	Käytön alkuvaihe	Jäljitettävyyys ja dokumentointi. Rakennetun omaisuuden kuntotiedon lokikirjojen käyttöönotto.
7	Käytön jatkovaihe	Omaisuuden tulevaisuuskenaarioiden kehitys ja seuranta. Kiinteistön liiketoiminta- ym. talousmallien tarkennus.
8	Oppimisvaihe	Toimituksen ja käytön aikaiset palautteet ja menetelmien kehitys.

Taulukko 1. Digitaalisen kaksosen käyttöönoton vaiheistus (Bolton et al. 2018; Camposano et al. 2021; UK BIM Framework 2019; van Heesch et al. 2012)

4.3 Digitaalinen kaksonen IoT-pipelinen frontend-ratkaisuna: riskit ja hyödyt

Digitaalisiin kaksosiin perustuvan ja kestävästä kehitystä tukevan tietoliikenneinfrastruktuurin tavoite on uudelleenmäärittellä rakennettu ympäristö ja sen yksittäiset rakennukset muutosprosessin katalysaattoriksi. Tästä näkökulmasta digitaalisten kaksosten rooli monenlaisia tietolähteitä hyödyntävänä ja monenlaisia sidosryhmiä palvelevana alustana on suuri. Toisaalta tämän arvolutapauksen jäsentely aiheuttaa merkittäviä haasteita tietoliikenteen ja sidosryhmien käyttörajapintojen suunnittelussa. Ensisijaisen tärkeää on varmistaa, etteivät tiedon integroinnin puutteet taikka tiedon tulkintatavat asettaisivat eri sidosryhmät eriarvoiseen asemaan tai ylläpitäisivät olemassa olevaa eriarvoisuutta (Mattern 2021).

Tietojen keräämisen lähteistä ja menetelmistä, sekä tiedon merkityksestä ja käytöstä sopiminen edellyttää yhteistä ymmärrystä ja standardointia. *Standardoinnin* haasteet voivat ilmestyä esimerkiksi havainnollistamisen ja visualisoinnin parissa johtuen sidosryhmien moninaisuudesta. Digitaalinen kaksonen voi olla liian passiivinen, reaktiivinen tai ennustava ilman toimia ja päätöksentekoa fasilitoivia tukitoimintoja. Puolistrukturoituihin ja strukturoimattomiin tietolähteisiin, kuten teksteihin ja kuviin, liittyvät integroinnin vajavuudet voivat myös osoittautua digitaalinen kaksonen tarjoaman analytiikan haavoittuvuudeksi (El-Diraby & Sobhkhiz 2022.)

Integrointihaasteita ilmestyy varsin sellaisten IoT-laitteiden parissa, jotka käsittelevät henkilötietosuojan alaista tietoa tai sellainen tieto voi tallentua anturiseurannan sivutuotteena. Kun järjestelmän toimintaperiaate edellyttää IoT-laitteiden tai muun jatkuvasti tuottaman datan reaaliaikaista integrointia, päätöksenteon laatua voivat lisäksi heikentää myös viiveet ja synkronoinnin puutteet. Seuraavissa kehitysvaiheissa fyysisen ja digitaalisen västineen kahdensuuntaisen integroinnin puute tai heikkous voi rajoittaa tiedon saantia ja hyötykäyttöpotentiaalia (El-Diraby & Sobhkhiz 2022.)

Yllä kuvattujen haasteiden ratkaisuna Camposano et al. (2021) lähestyy digitaalisten kaksosten käyttötapausten määrittelyä Service-Dominant Logic (SDL) näkökulmasta, tarjoten seitsemän digitaalisen kaksosen hyötykuvioltaan selkeästi erottuvaa käyttötapausta. Jokainen näistä käyttötapauksista edellyttää tiettyjä tietoteknisiä ja organisaatiotason valmiuksia, sekä on omillaan fasilitoimaan omanlaatuisia arvoketjuja. Näitä tapauksia on kuvattu alla erityisesti suhteistaen IoT-tiedon hyödyntämiseen.

Yksinkertaisessa tapauksessa digitaalinen kaksonen tarjoaa *virtuaalisen mallin* rakennuksesta, joka sisältää tietyt tiedot ja ominaisuudet. Tällöin digitaalinen kaksonen toimii käytännössä rakennuksen tietopankin visuaalisesti edistyneempänä navigointijärjestelmänä. Tämä malli voi olla yhteydessä rakennuksen IoT-järjestelmään, jolloin myös reaaliaikaiset päivitykset voivat näkyä virtuaalisessa mallissa. Digitaalinen kaksonen voi toimia rakennuksen IoT-järjestelmien visuaalisesti edistyksellisenä *älykkäänä ohjausjärjestelmänä*. Tällöin virtuaaliseen rakennusmalliin lisätään ohjaustoiminnot, joiden avulla käyttäjä tai ohjelmoitu prosessi voi toimia IoT-järjestelmien operaattorina.

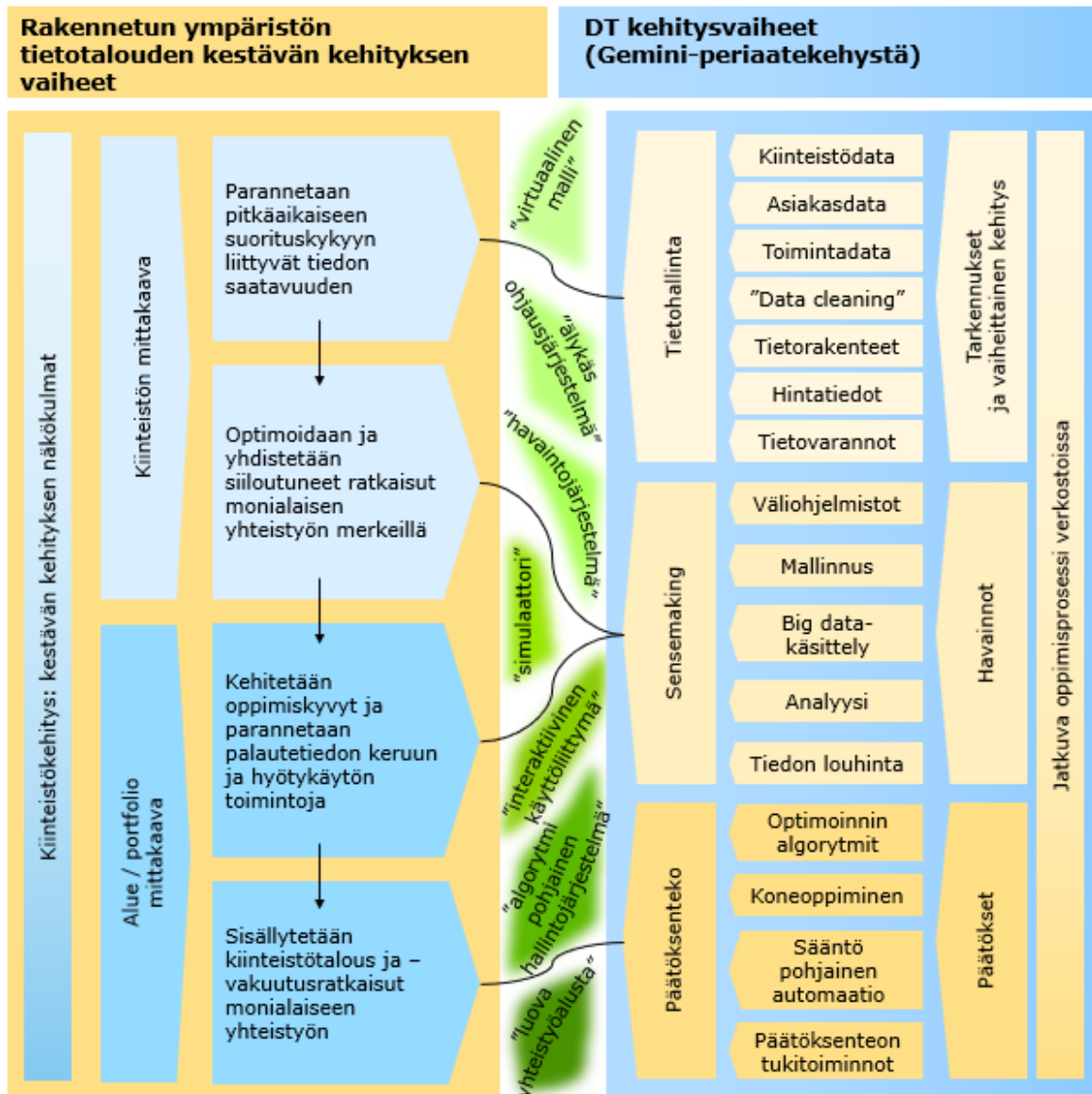
Digitaalinen kaksonen voi toimia *havaintojärjestelmänä*, joka prosessoi rakennuksen IoT-järjestelmistä kerätyt tiedot ja tarjoaa reaaliaikaista näkymää rakennuksen tilasta. Tämän toiminnon tarkoitus on auttaa tunnistamaan ongelmia lähes reaaliajassa. Tällöin havainnointitoiminto voi olla yksinkertainen ja perustua suoraan anturilukemaan (kuten esimerkiksi vesivuodon tapauksessa), tai sisällyttää useammasta lähteestä kerätyn datan edistyneempää analysointia.

Asiantuntijakäytössä digitaalinen kaksonen voi toimia monialaisten työryhmien käytössä *simulaattorina*. Suunnitteluvaiheessa IoT-järjestelmien simulointi digitaalisen kaksosen pariin antaa käyttäjälle mahdollisuuden testata erilaisia IoT-järjestelmän konfiguraatioita ja ennustaa niiden vaikutusta ja potentiaalia rakennuksen energiatehokkuuden ja toimintavarmuuden edistämisen parissa. Elinkaarivaiheessa simulaattoria voi käyttää skenaariotyöskentelyn tukena erilaisten käytön, kiinteistönkehityksen ja ulkoisten tekijöiden (kuten ilmastonmuutoksen) vaikutuksiin liittyvässä päätöksenteossa.

Digitaalinen kaksonen voi tarjota valituille käyttäjille *interaktiivisen käyttöliittymän*, joka edistää käyttäjän interaktiivisen työskentelyn kokemuksen, esimerkiksi virtuaalimallin tietosisällön tai ohjausjärjestelmän toimintaperiaatteiden päivityksen, simulaattorin skenaarioiden muotoilun ja testauksen, tai havaintojärjestelmän toimintasääntöjen päivitysten parissa.

Digitaalisen kaksosen fasilitoiman tiedonsaannin ja interaktiivisen käyttöliittymän ympäri määrittellen uudet *algoritmipohjaisen hallinnon* työskentely- ja arvontuontimekanismit, joissa operaattorit tai tutkijat kehittävät edistyneemmät resurssi- ja tilakäytön sekä käyttömukavuuden liittyvät ratkaisut käyttäen kaksosen tukitoiminnot. Kaksisuuntainen tiedon virtauttaminen luo edellytykset myös rakennusten käyttäjien osallistamiselle kiinteistöjen hallinnan ja kehittämiseen liittyvään päätöksentekoon (El-Diraby & Sobhkhiz 2022.)

Viimeiseksi digitaalista kaksosta voidaan muotoilla *luovana yhteistyöalustana*, joka kannustaa tilojen käyttäjät ja muut sidosryhmät tuottamaan uutta tietoa, johtaa omaisuuden kehitystä ja luoda uusia, parempia käyttöratkaisuja. Tällöin digitaalinen kaksonen toimii uusien tietolähteiden, keskinäisten yhteyksien ja riippuvuuksien havainnointia sekä verkostoitumis- ja yhteistyökuvioiden kehitystä palvelevana alustana. Kuviossa 11 esitetään luvun 4 yhteenveto, havainnollistaen näiden digitaalisten kaksosten käyttötapausten yhteyksiä digitaalisen kaksosen kypsyyssasteisiin sekä hyödynnettävyyteen rakennetun ympäristön kestävä kehityksen tukivälineenä.



Kuvio 11. Rakennetun ympäristön tiedonhallinnan kestävän kehityksen vaiheet, tämän prosessin suhteuttaminen digitaalisen kaksosen kypsyyssvaiheisiin ja digitaalisen kaksosen käyttötapauksiin (Boje et al. 2022; Bolton et al. 2018; Camposano et al. 2021, Rodionova & Riel 2023).

5 Pipeline julkisivujen anturijärjestelmästä

5.1 Pipelinen yleiskuvaus

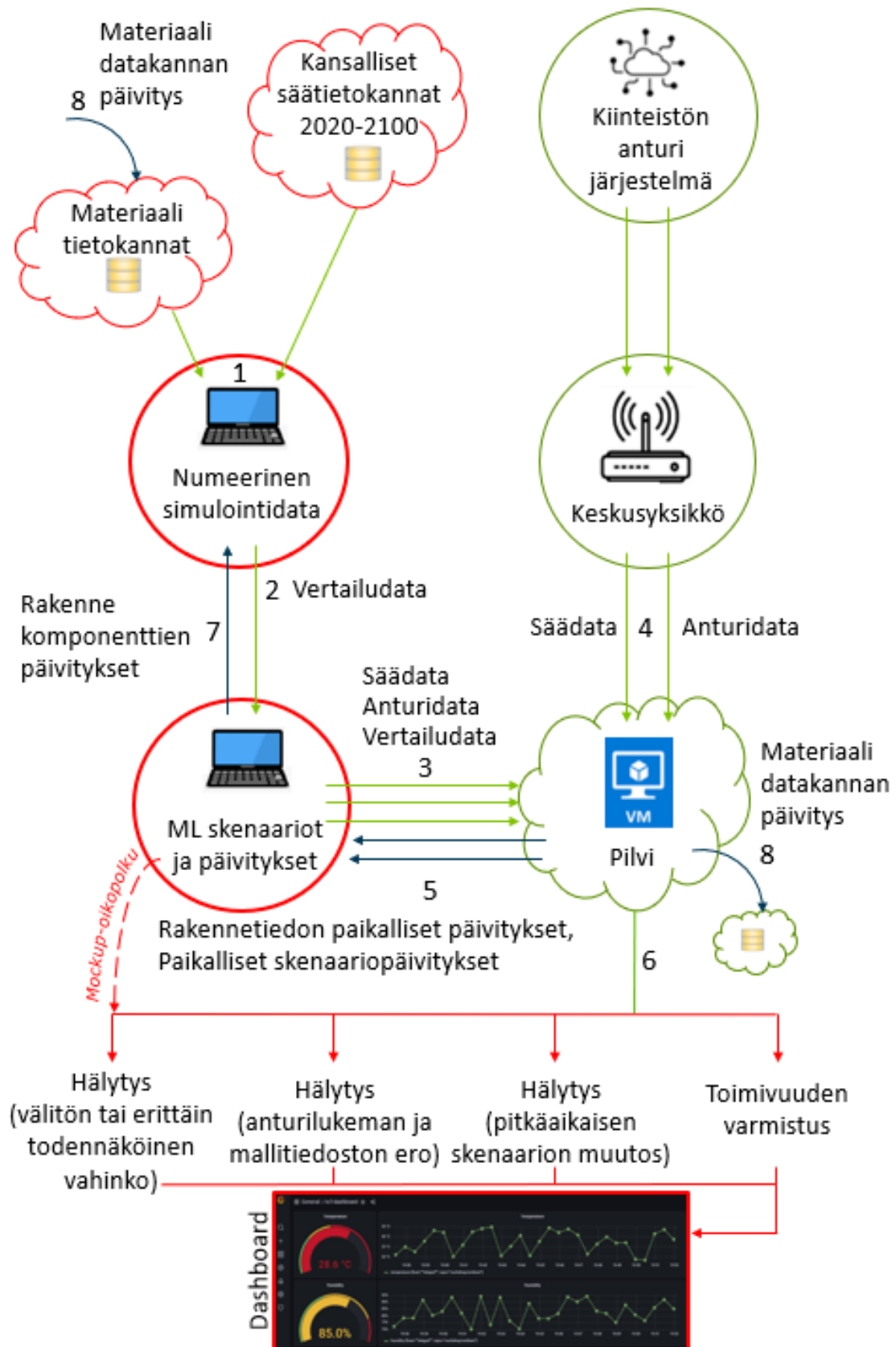
Laajamittaisessa energiakorjausten ja ilmaston muutokseen sopeutumisen suunnittelussa rakennusfysikaalinen riskienhallinta on tärkeässä roolissa. Pilvisyyden, sademäärän ja lämpötilan muutokset, aikaisempiin vuosikymmeniin verrattuna, altistavat kiinteistöjen julkisivut uudensuunniteltuihin kuormituksiin (Vinha et al. 2013). Tavanomaisissakin toteutuksissa virhesuoritukset ovat mahdolliset, kuten myös ympäristön oletusskenaarioista poikkeavat ympäristökuormat (ks. luku 2.2). Anturiseurannalla voidaan havaita rakennevahingon mahdollisuuksia parhaassa tapauksessa ennen kuin se pääsee vaikuttamaan merkittävästi rakenteisiin. Toisaalta analytiikkaa ja anturiseurantaa voidaan valjastaa ylimitoitettujen rakenteellisten ratkaisujen vaihtoehtona säästämällä rakennusmateriaaleja. Tämän lisäksi alustavia johtopäätöksiä olemassa olevien rakennusten mahdollisista rakenneteknisistä puutteista voi tehdä rakennusten laskennallisen ja todellisen toiminnan vertailun perusteella.

Anturi (tai anturijärjestelmä) asennetaan rakennuksen ulkovaipan kerrokseen sekä sisä- ja ulkopintaan. Rakennuksissa käytetään yleensä teollisen tason olosuhdeseurantajärjestelmiä, joiden toiminnallisuus on huomioitava kokonaisprosessin arkkitehtuurissa. Tällaiset järjestelmien perustoimintoihin kuuluu esimerkiksi välitön hälytyksen lähettäminen silloin, kun anturidatan vertailu osoittaa akuutin tai hyvin todennäköisen vauriotilanteen.

Pipelinen periaatteellinen kaavio esitetään kuviossa 12. Tässä esitetyn pipelinen ero anturipalveluiden perustoiminnoilta perustuu perusdatan rikastuttamiseen. Tämä toteutuu siten, että rakennuksen vaipan tai muiden vaurioherkkien rakenteiden toimintaa simuloidaan rakennusten suunnitteluvaiheessa asiantuntijasovelluksissa (1). Laskelmien tulokset ladataan kiinteistökohtaiseen tietopankkiin (2,3). Antureitten tuottama sää- ja rakennedata sekä simuloinneilla tuotettu vertailudata haetaan pilvipalvelusta ja siirretään koneoppimismalgoritmeilla suoritettuihin analyysille (5). Analyysi määrittelee, vastaako rakenteen toiminnallisuus suunnitelmia ja onko riski, että rakenteen toimivuus heikkenee vaihtoehtoisissa ilmastonmuutoksen skenaarioissa. Laskelmien tulokset palautetaan pilvipalveluun tai ladataan kiinteistökohtaiseen tietopankkiin (3). Laskelmien perusteella annetaan toimivuuden varmistuksen tai ilmoituksen lisäselvitysten tai lähtötietojen päivittämisen tarpeesta (6). Mikäli havaitaan anturilukeman ja odotetun toimintaperiaatteen välisiä eroja, voidaan suorittaa lisätarkastelut ja päivittää myös rakennuskomponentin simulointimallia vastaamaan todettuja materiaali- ja komponentt ominaisuuksia (7). Mikäli tällaiset erot havai-

taan laajamittaisesti, voidaan myös materiaaliominaisuuksien päivityksen tehdä laajemmin esimerkiksi kansallisen tason ohjeistukseen ja datakantoihin (8).

Seuraavasti luvussa 5.2 esitetään palvelun mock-up prototyypin rakenne sekä luvussa 5.3 IoT järjestelmien, IT-arkkitehtuurien ja digitaalisen kaksosen liittymävaihtoehdot jatkokehitysvaiheiden tarpeisiin.



Kuvio 12. Pipelinen periaatekuvaus

5.2 Koneoppimisalgoritmin yleiskuvaus

Rakennetun ympäristön suunnittelun, toteutuksen ja omaisuudenhallinnan tietorakenteessa eniten edustettu puolistrukturoitu tieto, kuten pdf-muotoiset asiakirjat ja piirustukset. Parametrinen suunnittelun sekä BIM-yhteistyöalustojen kehittyessä, kehittyvät myös mahdollisuudet strukturoidun ja strukturoimattoman, eli hiljaisen tiedon tallentamiselle ja käsittelylle. Puolistrukturoidun ja strukturoimattoman datan suuri osuus rajoittaa tavanomaisten analyyttisten menetelmien sovellettavuutta, sekä näiden käsittelylle tyypilliset pullonkaulat ovat historiallisesti vaikeuttaneet myös tietoteknistä kehitystä alalla (Luoma et al. 2021).

Tässä mock-up suorituksessa käytetty rakennuskomponentin kosteustekniseen käyttäytymiseen liittyvä aikasarjatieto edustaa edelleen harvinaista, tietorakenteeltaan täysin ennustettavissa olevaa datakantalaatua ja tällaisena luo helpot edellytykset tiedon virtauttamisen esimerkin tarpeisiin. Jatkokehityksenä tämä strukturoitu tieto todennäköisesti täydentyy puolistrukturoidulla tiedolla, esimerkiksi materiaalisertifikaatteja, tarkastus- ja huoltoraporttien asiakirjoilla sekä valokuva-aineistolla. Tällainen täydennys kuitenkin edellyttää välivaiheita, kuten puolistrukturoidun tiedon dokumentointi- ja metatieto-ohjeistuksen kehitystä. Tämän takia täydentävää dataa ei ollut sisällytetty mock-up esimerkkiin. Rajoitetun rakennevaihtoehtojen otannan vuoksi mock-up suorituksessa käytettyä koneoppimisalgoritmia ei voi myöskään suoraan hyväksyä vastaavien suoritusten vaihtoehtona, vaan algoritmikehitystä on suoritettava ja dokumentoitava tapauskohtaisesti, kunnes kokemusperäisen havaintokannan laajuus on riittävä suositusten laadintaan. Tämän vaiheen havaintojen jatkokehityksenä laaditaan lähinnä käytettyjen koneoppimisalgoritmien dokumentointiin ohjeita.

Mock-up suorituksessa käytetyn algoritmin päämäärä oli ennustaa rakennuksen sisäilman lämpötila- ja kosteusarvoja ulkoilman ja edeltävien tuntien sisäilman mittausten perusteella. Ennustusmallia koulutettiin Vantaan ilmastodatan perusteella ja testataan sekä vuoden 2050 Vantaan ennustettuja arvoja, että edellisestä merkittävästi poikkeavan Münchenin ilmastodatan perusteella. Riippumattomina muuttujina käytettiin ulkoilman lämpötilan ja kosteuden, sekä edeltävien tuntien sisäilman lämpötilan ja kosteuden. Datan prosessoinnissa käytettiin numpy, pandas, seaborn, matplotlib.pyplot sekä pickle ja sklearn kirjastot. Lähtötietoina ladattiin ulko- ja sisäilman mittaustietoja Vantaan, Vantaan 2050 ja Münchenin ilmastodatoista, joita yhdistetään yhdeksi DataFrameksi. Tiedon vähäisen määrän (3 aikasarjaa) ja synteettisen luonteen vuoksi tiedonkäsittelyn vaatimuksia olivat tässä tapauksessa alhaisia.

Alustavassa tarkastelussa tuotiin ja testattiin Scikit-learn paketista yksinkertaisia koneoppimismalleja, kuten lineaarinen regressio ja logistinen regressio, jotka tarjoavat NodeRe-

din sisäänrakennettujen regressioanalyysin toimintoja vastaavaa tasoa. Tämän kokeilun perusteella voidaan jo kuitenkin todeta, että NodeRedin sisäänrakennettujen regressioanalyysin toiminnot eivät ole sinällään riittäviä tyydyttävien ennusteiden prosessoinnin kannalta. Tällöin skenaariodatan päivityksiin on varauduttava varmistuen pilvipalvelun regressioanalyysin työkalujen riittävyys tai määrittelemällä pidempiaikaisia päivystäviä asiantuntijasopimuksia. Jälkimmäinen vaihtoehto on mahdollinen, koska akuutteja vauriutilanteita lukuun ottamatta skenaariopäivityksiä on tarpeen suorittaa niinkin harvoin kuin vuoden tai jopa muutaman vuoden välein.

Seuraavassa vaiheessa lisäksi testattiin Scikit-learn päätöspuu, SVM, sekä Random Forest -regressiomalli. Tämän kokeilun perusteella toteutus on keskittynyt Random Forest -regressiomalliin. Optimaalisten parametrien valintaan Random Forest -mallissa käytettiin Randomized Search CV -menetelmää. Tämä menetelmä on tehokas hyperparametrien säätämiseen. Erityiset parametrit, kuten puiden lukumäärä, kussakin jaossa huomioon otettavien ominaisuuksien lukumäärä, puun maksimisyvyys, solmujen jakamiseen ja lehtisolmuihin vaadittavat miniminäytemäärät sekä bootstrap-menetelmä, optimoitiin.

Random Forest -mallin suorituskyky arvioitiin käyttämällä R^2 -pisteystystä, tilastollista mittaria, joka edustaa riippuvan muuttujan vaihtelun osuutta, jonka itsenäiset muuttujat selittävät. Piste 1 tarkoittaa, että malli ennustaa tuloksen täydellisesti, kun taas piste lähempänä 0 tarkoittaa, että malli ei ole parempi kuin kohdemuuttujan keskiarvon ennustaminen. Huomionarvoista on, että lämpötilaennusteille Vantaan perusdatasettiä käyttäen saavutettiin R^2 -pisteet 1.0, mikä osoittaa täydellisen sovituksen. Suhteellisen kosteuden ennusteelle saatiin pisteet 0.99. Kun mallia käytettiin ennusteiden tekemiseen Vantaan 2050 datasetillä, lämpötilaennusteen osalta saavutettiin 1.0, mutta suhteellisen kosteuden ennusteet laskivat hieman eli 0.86:een. Samoin Münchenin datasetille lämpötilaennusteet saivat pisteet 0.99 ja suhteellisen kosteuden ennusteet pysyivät 0.86:ssa. Kunkin ehdokasmallin sovittamiseen liittyvä suoritus aika kirjattiin myös ylös. Randomized Search CV -prosessointia mukaan lukien, mallin toimitus kesti kannettavalla tehoyöasemalla noin 16,6 minuuttia lämpötilalle ja 19,8 minuuttia suhteelliselle kosteudelle.

Erityisesti lämpötilalukemien osalta malli osoitti vahvan ennustuskyvyn annetuille data-seteille. Selityksenä tälle on se, että lähes tavanomaisella kosteusvaihtelulla, kuten käyttämämme dataseiteillä, on kohtuullisen pieni vaikutus lämmönjohtavuuden ominaisuuksiin. Lievä lasku suhteellisen kosteuden ennusteissa vuoden 2050 ja Münchenin dataseiteissä osoittaa potentiaalisia parannuksen kohteita, mikä edellyttää mallin yleistämiskyvyn jatkotutkimusta.

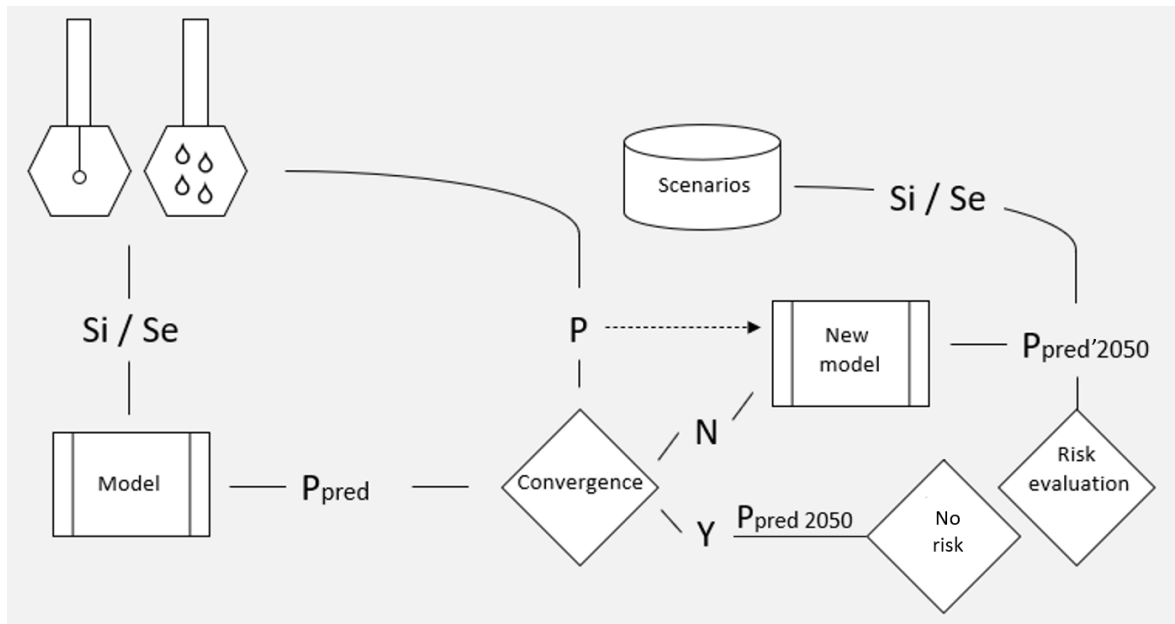
5.3 Mock-up pipeline rakenne, visuaalinen käyttörajapinta ja arkkitehtuuri

5.3.1 Mock-up prototyypin rakenne

Mock-up prototyyppiä on kehitetty paikallisella työasemalla siten, että se jäljittää yllä esitetyn arkkitehtuurin toiminnot mahdollistaen nopeutettua aikasarjakäsittelyä. Prototyyppi havainnollistaa siis anturidatan, simulointidatan ja simulointidatan perusteella viritetyn koneoppimismallin hyötykäyttöä siten, että vuoden aikaiset havainnot ja niiden edellyttämät toimenpiteet voidaan esittää noin 10 minuutin suorituksena.

Mock-up pipeline periaatteellinen kaavio esitetään kuviossa 13. Mock-up pipeline syöteinä käytetään viittä esivalmistettua aikasarjaa, joihin kuuluvat ilman lämpötilan (T) ja suhteellisen kosteuden (RH) arvot. Aikasarjojen pituus on yksi vuosi, jolloin lukeman arvona käytetään tunnin keskiarvoa, joka on rakennusfysikaalisen analyysin aikasarjojen perusyksikkö.

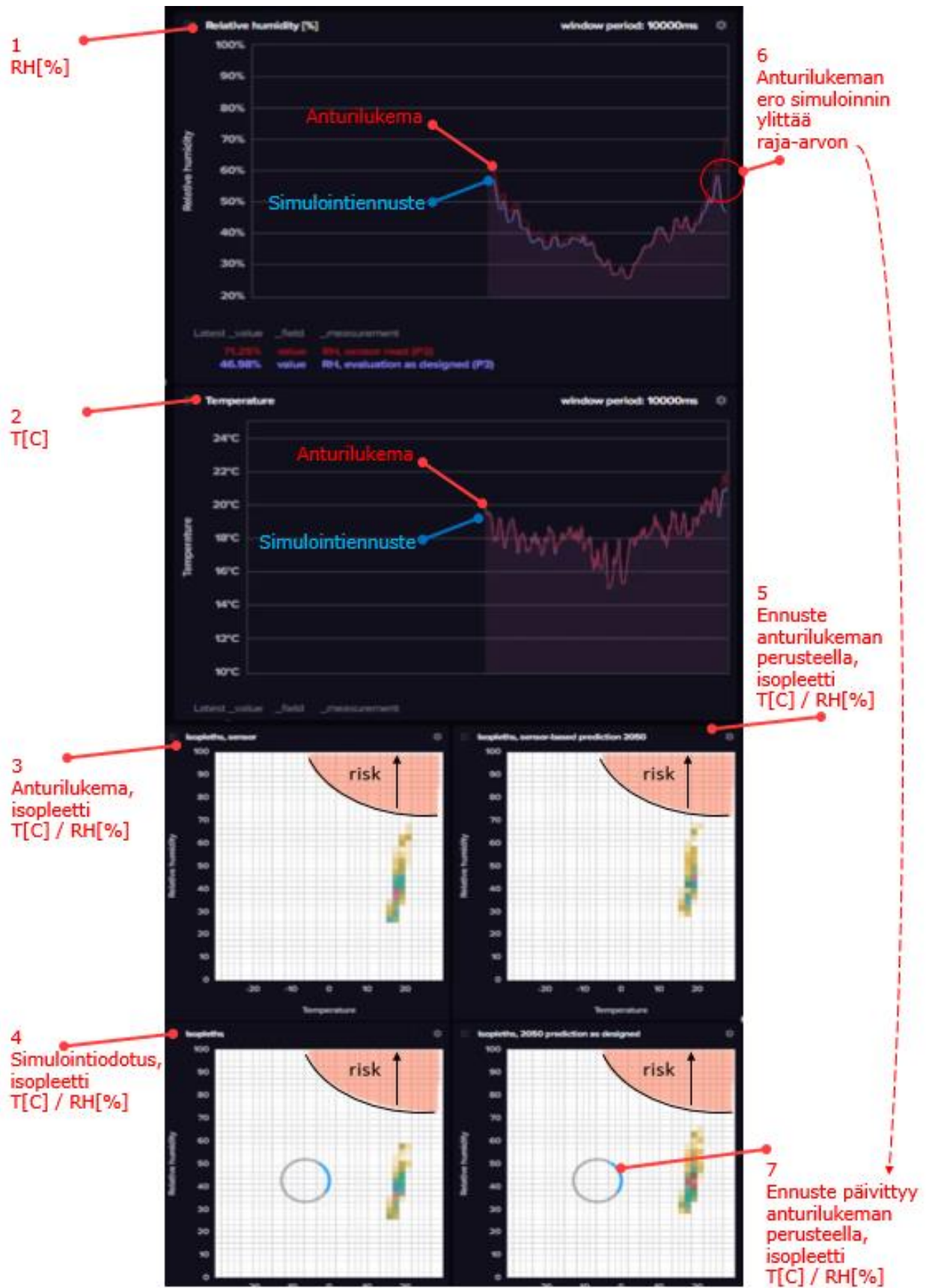
- Aikasarja *Si/Se* edustaa anturidatan ulko- ja sisäilmaston lukemat.
- Aikasarja *Ppred* edustaa rakenteen sisällä olevan tarkastuspisteen ennusteen, jota on luotu WUFI-sovelluksella toimitetulla simulointidatalla valmennetun ML-mallin avulla ja jonka lähtötietoina käytetään anturilukemien ulko- ja sisäilmaston lukemat.
- Aikasarja *P* edustaa anturidatan rakenteen sisällä olevan tarkastuspisteen lukemat. *P*:n lukemat toimitettiin WUFI-sovelluksella siten, että sen lähtötietoina käytetään samat anturilukemien ulko- ja sisäilmaston lukemat kuten *Ppred* sarjassa, mutta rakenteen ominaisuuksien määrittelyssä tehtiin muutokset, jotka johtavat pidemmällä aikavälillä kosteusvahinkoon.
- Aikasarja *Ppred2050* edustaa rakenteen sisällä olevan tarkastuspisteen ennusteen, jota on luotu tulevaisuuden ilmastolle ML-mallin avulla, jota on valmennettu alkuperäisellä suunnitteludatalla.
- Aikasarja *Ppred'2050* edustaa rakenteen sisällä olevan tarkastuspisteen ennusteen, jota on luotu tulevaisuuden ilmastolle ML-mallin avulla, jota on päivitetty anturidatan perusteella.



Kuvio 13. Mock-up pipelineen periaatteellinen kuvaus

Mockupissa käytetty InfluxDB-dashboards on esitetty kuvassa 3 siten, että alkuperäistä ikkunoiden sijoittelua on muutettu havainnollistamisen tarpeita huomioiden. Aikasarjanäkymät 1 ja 2 esittävät aikasarjojen P ja P_{pred} suhteellisen kosteuden (RH[%]) ja lämpötilan (T[C]) mukaiset arvot. Isopleettinäkymät 3 ja 4 esittävät tuntitason havainnot T[C] / RH[%] koordinaatistossa, joka on yleensä käytössä rakennusfysikallisten kosteusvahingon arviointien parissa. Havaintojen sijaitessa riskialueella alkaa rakenteessa homekehitys, joka etenee riskialueen alaosan hitaalta ja vähäisellä kohti runsaampaa. Havaintojen sijaitessa riskialueen yläosissa, eli rakenteen ollessa märkä ja lämmin, ilmestyvät rakenteessa homeen nopealle ja runsaalle kasvulle otolliset olosuhteet.

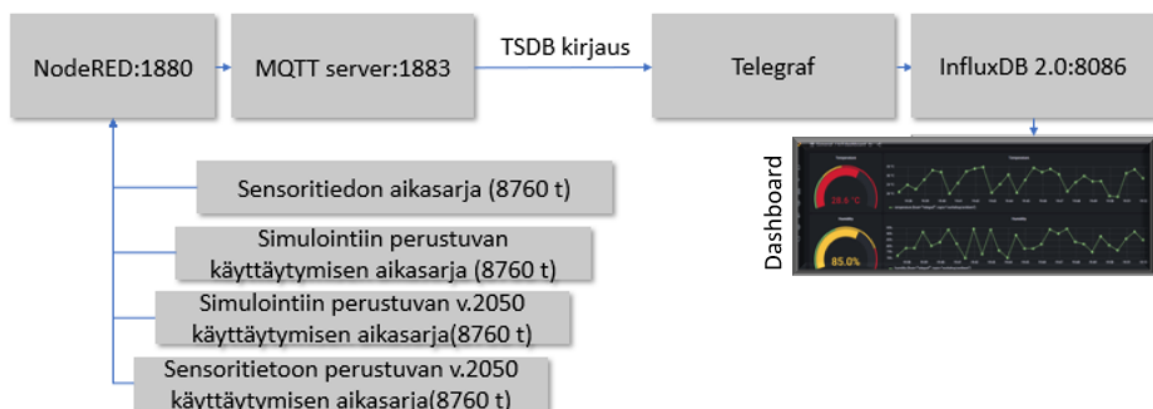
Isopleettinäkymä 5 puolestaan esittää T[C] / RH[%] koordinaatistossa tuntitason suunniteluennuste $P_{pred2050}$. Jos aikasarjan P lukemat poikkeavat P_{pred} lukemista merkittävästi (tässä tapauksessa suhteellisen kosteuden RH arvo on 5% odotettua suurempi), käynnistetään ennustusmallin päivitys. Tällöin dashboardiin ilmestyy myös päivitetty ennuste $P_{pred'2050}$, jonka perusteella työskentelyn seuraavissa vaiheissa tulisi päivittää riskiarviot ja toimintastrategiat. Kuvan 3 dashboardissa esitetyllä ajanhetkellä havaittiin juuri merkittävän, anturilukeman ja ennusteen välisen poikkeaman. Tässä vaiheessa kuitenkin, päivittyvän tiedon perusteella rakenteen toiminta sijaitsee edelleen turvallisella alueella myös tulevaisuudessa. Tällaisissa tapauksissa käytännön toimenpiteet voivat sisältää esimerkiksi tarkasteluvälin lyhentämistä.



Kuva 3. InfluxDB 2.0- dashboardin toiminnot

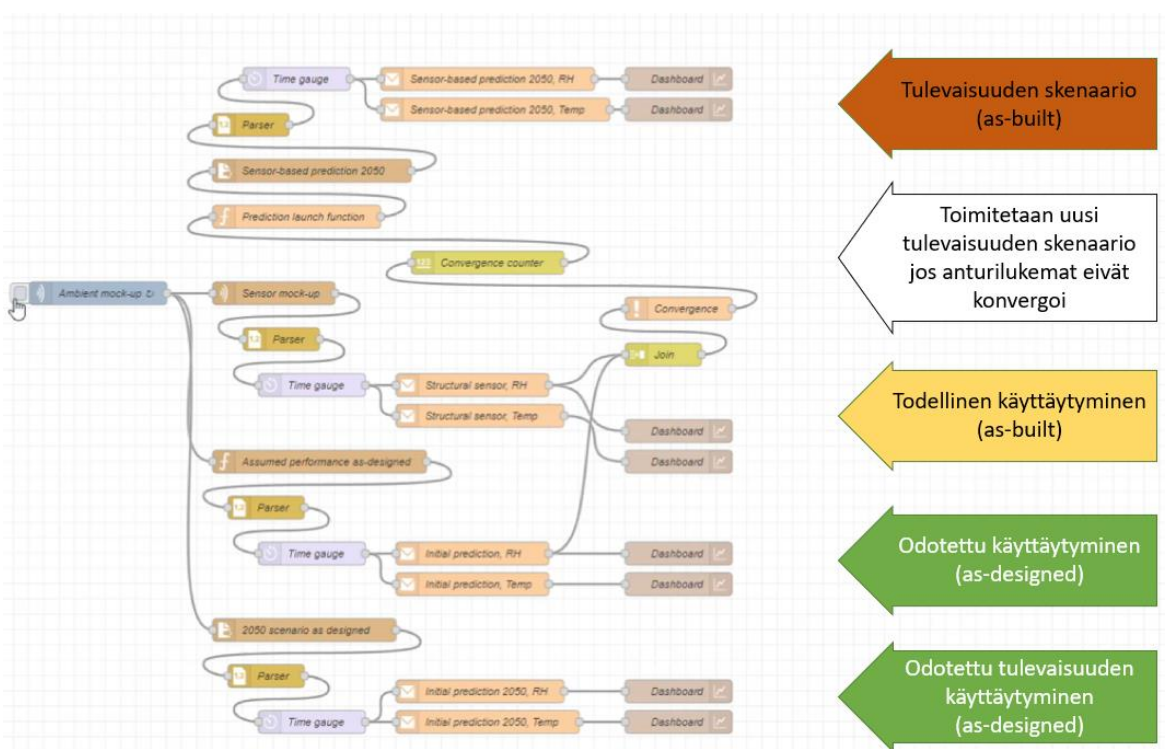
Mock-up pipeline arkkitehtuuri perustuu Docker kontteihin. Docker on avoimen lähdekoodin alusta, joka mahdollistaa sovellusten kontittamisen, toisin sanoen niiden pakkaamisen yhtenäiseen yksikköön, joka sisältää kaikki tarvittavat riippuvuudet ja asetukset. Ajankohtaisissa IoT-kehittäjäkyselyissä (Eclipse Foundation 2022) Docker edustaa ylivoimaisesti suosituimman ratkaisun IoT-ratkaisujen orkestroinnille yleensä. Dockerilla luotujen konttien keveys ja skaalautuvuus tekee niistä helposti lähestyttäviä ja houkuttelevia myös IoT-tuotteiden prototyyppivaiheessa. Docker-konttien käyttö mahdollistaa eri komponenttien ja palveluiden helpon integroimisen samaan järjestelmään, mikä vähentää kehitysaikaa ja lisää skaalautuvuutta. Lisäksi Docker mahdollistaa konttien käynnistämisen ja pysäyttämisen nopeasti ja helposti, mikä on hyödyllistä IoT-ratkaisujen jatkuvassa kehityksessä ja testauksessa. Docker-ratkaisun skaalautuvuuden suunnittelun yhteydessä on tarkasteltava muut vaihtoehdot, kuten perinteisemmät virtuaalikoneratkaisut, jotka voivat olla tallennustilan puolesta tehokkaampia. Lisäksi pitää huomioida, että Docker-ratkaisun toimeenpano edellyttää tavanomaisten virtuaalikoneratkaisuihin verrattuna erityistä huomiota mm. konttien verkottamisen ja kuvien hallinnan parissa.

Docker-kontaineriin perustuva ratkaisu on toteutettu seuraavasti. Tiedonkäsittelyn ohjaukseen hyödynnetään Node-RED-ohjelmistoa, joka toimii localhost-osoitteessa 1880. Todellisissa käyttötilanteissa anturitieto toimitetaan Node-RED:iin anturilaitteiston API:n ja esimerkiksi LoRaWAN (ks. 5.4.2) solmun kautta. Mock-up toteutuksessa esivalmistetut aikasarjatietokannat lisätään Node-RED kuvaan kommentorivin välityksellä. Node-RED:ssä anturitiedon aikasarjat käsitellään ja tieto siirretään Mosquitto-palvelimelle, joka toimii localhost-osoitteessa 1883. Mosquitto käyttää Telegrafia siirtämään tiedon InfluxDB-palvelimelle, joka toimii localhost-osoitteessa 8086. Lopuksi, tieto visualisoidaan InfluxDB-dashboardilla. Mock-up pipeline kokonaisarkkitehtuuri on esitetty kuviossa 14.



Kuvio 14. Mock-up pipeline IT-arkkitehtuurin kuvaus

Node-RED on avoimen lähdekoodin ohjelmisto, joka tarjoaa visuaalisen käyttöliittymän verkkopohjaisen IoT-tekniikan kehittämiseen. Ohjelmisto toimii JavaScript-pohjaisella runtime-ympäristöllä, joka käyttää Node.js:ää palvelimena. Node-RED:in keskeiset toiminnot liittyvät aikasarjakäsittelyyn, joka sisältää tietojen keräämisen, käsittelemisen ja visualisoinnin IoT-antureilta ja -laitteilta. Ohjelmisto tarjoaa myös erilaisia valmiita solmuja, jotka auttavat käyttäjää luomaan yhteyden pilvipalveluihin, kuten Microsoft Azureen. Näiden solmujen avulla käyttäjä voi integroida tietovirtoja helposti pilvipalveluihin ja tallentaa aikasarjadataa esimerkiksi InfluxDB-tietokantaan. Node-RED käyttöliittymän kuvaus on esitetty kuviossa 15.



Kuvio 15. Mock-up pipelinen IT-arkkitehtuurin kuvaus Node-RED visuaalisessa käyttöliittymässä

Telegraf on avoimen lähdekoodin palvelinohjelmisto, joka kerää ja käsittelee aikasarjadataa. Se tukee useita protokollia, mukaan lukien mock-upissa käytetty MQTT. MQTT on IoT-sovellusten suosituin, ISO/IEC 20992 mukainen protokolla, joka on useamman vuoden IoT-kehittäjäkyselyissä (Eclipse Foundation 2018-2022) ohittanut jopa HTTP:n mm. tiedonsiirron keveyden ja lähes 100-kertaisen tiedonsiirron nopeuden ansiosta. MQTT mahdollistaa tiedon siirron Mosquitto-palvelimelta InfluxDB 2.0-palvelimelle. InfluxDB on avoimen lähdekoodin tietokanta, joka on suunniteltu tallentamaan ja käsittelemään aika-

sarjatietoa. InfluxDB tarjoaa helppokäyttöisen perustasoisen dashboardin, joka mahdollistaa tiedon visualisoinnin ja analysoinnin. Yksittäisten elementtien kuntoseurantaan keskittyvän prototyypin pilotointivaiheessa Influxin dashboardin sijaan voidaan käyttää monipuolisempaa Grafana-dashboardia, joka tarjoaa enemmän mahdollisuuksia suuremman käyttäjämäärän sekä edistyneemmän tietokantatyöskentelyn ja visualisoinnin osalta.

5.4 Järjestelmän jatkokehitys: pilotointivaiheen suunnitelma

5.4.1 Tiedonkäsittelyn resurssointi

IoT-järjestelmän jatkokehitystä suunnitellessa tulisi huomioida yleisesti niin teknologiakehityksen suunnat kuin myös yksittäisten ratkaisujen yhteensopivuus. Tiedonkäsittelyn resurssointiin liittyvät ratkaisut tulisi harkita kehityksen alkuvaiheessa ja tarkastella riittävän usein, näin varmistetaan, että ratkaisut ovat myös ainakin keskipitkällä aikavälillä kustannustehokkaat. IoT järjestelmäkehitys perustuu yleensä neljään elementtiin: internettiin kytkettyihin objekteihin, paikalliseen tiedonkeruun, verkkoyhdyskanaviin, ja pilviverkostoihin (Costin & McNair 2022). Internettiin kytkettyinä objekteina tässä työssä käsitellään lähtökohtaisesti rakennusten komponentteja, mutta muihin elementteihin liittyen käsitellään tässä pääasialliset valinnat.

Pilviverkostoihin liittyen mock-upin jälkeisissä vaiheissa on tärkeää harkita kolme toisistaan erottuvaa pilvitopologiaa. *Yksityinen pilvi* tarjoaa kolmesta korkeamman tietoturvatason, jota tulisi huomioida erityisesti riippuen anturitiedon ja sen mahdollisten jalostamisen tuotteiden luonteesta. *Yksityinen pilvi* soveltuu hyvin organisaatioille, jotka haluavat pitää tietojärjestelmiään täydessä hallinnassa. *Yksityinen pilvi* erottavat yleensä organisaation järjestelmistä sen virtualisoinnin ja kuormituksen tasaamisen tehtävät. Virtualisointi palvelee erityisesti IoT-laitteiden suoritusympäristöjen eristämistä ja hallintaa, kun taas kuormitusten tasaamisen on tärkeää silloin, kun odotetaan, että tietoliikenteen määrät tulevat vaihtelemaan merkittävästi (Lea 2020.)

Yksityisestä julkiseen tai hybridi pilveen siirto voi olla perusteltua IoT-projektien tietohallinnan ja kapasiteetin kasvaessa. Tällöin onnistumisen keskeiset uudelleenmääriteltävät tekijän liittyvät kustannushallinnan suhteittamiseen datan eheyden, tietoturvallisuuden ja tietoliikenteen skaalautuvuuden tavoitteisiin. *Julkisen pilven* ylivoimainen etu on lähes rajaton skaalautuvuus, kun taas *hybridipilven* tavoite on yhdistää julkisen pilven tarjoaman skaalautuvuuden ja yksityisen pilven tietoturvallisuuden hyvät puolet. Hybridipilvi voi sopia

hyvin esimerkiksi IoT-järjestelmille, jotka käsittelevät sekä potentiaalisesti arkiluonteista, että merkittäviltä määrin avointa tai sellaiseksi kelpuutettavissa oleva tietoa (Lea 2020.)

Rakennusten anturijärjestelmiä suunniteltaessa tulisi huomioida edge computing-ratkaisujen potentiaalia (Costin & McNair 2022). Arkkitehtuuria ja tiedonkäsittelyn vaatimuksia laadittaessa tulisi varmistaa, millaisilta osin tieto voisi käsitellä laitteessa tai kiinteistön keskiyksikössä ennen lähettämistä pilvipalveluihin. Optimoitu esikäsitteily mahdollistaa nopeamman ja tehokkaamman tiedonkäsittelyn.

5.4.2 Tiedonsiirtoverkot ja protokollat

Jättämällä Suomessa käytöstä poistuvat 3G verkot huomiotta, tässä keskitytään erityisesti kehityksen kärjessä oleviin 5G ja LoRaWAN verkostoihin. 5G-verkot mahdollistavat nopean ja luotettavan verkon saatavuus isompien datamäärien välityksen tarpeisiin, mutta resurssikäytön näkökulmia on tarkasteltava myös holistisesti kestävä kehityksen näkökulmasta. Alla oleviin näkökulmiin liittyvät tarkastelut edustavat osan luvussa 3.3.2 esitettyä monitieteellistä Vol (Value of Information) tarkastelua.

Olettaen, että tietoliikenteen määrät pysyvät samanlaisina, 5G-verkon energiakulutus on lähtökohtaisesti vaihtoehtoisten ratkaisujen pienempi alueilla, missä tietoliikenne on intensiivinen, ja isompi vähäisen tietoliikenteen alueilla. Riskinä on kuitenkin se, että paremman tiedonsiirron kapasiteetin ansiosta tietoliikenteen määrät tulevat kasvamaan, aiheuttaen energiakulutuksen kasvua jo pelkän määrän vuoksi. Toisaalta 5G:n pienemmät solut mahdollistavat tarkan energiahallinnan ja resurssien optimoinnin. LoRaWAN-verkko (Low Power Wide Area Network) mahdollistaa pitkän kantaman yhteydet IoT-laitteille ja vähentää energiankulutusta jopa 5-10 kertaa 3G verkostojen energiakulutuksen pienemmäksi, mikä mahdollistaa yksinkertaisemmat ja halvemmat laitteet. LoRaWAN verkkoa voi rakentaa, kustomoida ja hallita niin julkinen kuin myös yksityinen taho. Lisäksi tähtitopologiaan perustuva LoRaWAN verkosto tarvitsee 4G verkostoon verrattuna jopa 5-10 kertaa vähemmän tukiasemia (Lea 2020.)

Mainittujen lisäksi IoT-sovelluksissa suosituimmista (Eclipse Foundation 2018) tiedonsiirron protokollista TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) -protokolla tarjoaa laajemman ja pidempikantoisen tiedonsiirron useiden eri verkkojen välillä, kun taas Ethernet ja Wi-Fi keskittyvät vastaavasti langallisiin ja langattomiin lähiverkkoihin.

5.4.3 Tietokannat

Tässä ratkaisussa käytetyn InfluxDB 2.0 tietokanta on erikoistunut aikasarjatiedon käsitteelyyn ja tarjoaa tehokkaita ratkaisuja myös jatkokehitysvaiheiden runsaamman alkuperäis-

tiedon käsittelyyn. InfluxDB 2.0 vaihtoehtona aikasarjakäsittelyssä voi toimia mm. Timescale DB, jota tunnetaan tietoturvallisempänä ratkaisuna. Kuitenkin Timescale DB:n käyttöönoton helppous rajoittuu lähinnä olevaan PostgreSQL infrastruktuuriin ja on muissa tapauksissa muita tietokantoja hankalampaa. Myös Graphite-tietokanta on tunnettu tietoturvaratkaisuistaan ja sitä voisi harkita InfluxDB 2.0:n vaihtoehtona silloin, kun ratkaisu edellyttää graafien visualisointia. MongoDB puolestaan tarjoaa aikasarjatiedon erikoistuneen rajapinnan laajempien datakantatoimintojen ohessa. Viimeiseksi, MySQL on yleisin tietokanta, joka tarjoaa helpon käyttöliittymän silloin, kun kyseessä on aikasarjatietaa monipuolisempi tietosisältö.

6 Johtopäätökset ja pohdintaa

6.1 Mock-upin viimeistelytaso ja jatkokehitys

Mock-up ratkaisun tulisi edetä kohti teollista pilottivaihetta todellisissa riskirakenteissa toteutetun koekäytön kautta. Mock-up on käytännössä valmis tähän vaiheeseen. Sen suunniteltua pilotointia Node-RED LoRaWAN solmun kautta kytkettävissä olevan todellisen anturijärjestelmän kanssa on vaikeuttanut potentiaalisen yhteistyökumppanin API-rajapinnan avauksen vaiheittainen siirtyminen 12.2022-6.2023 aikana, jolloin tämä työ oli jo viimeistelyvaiheessa. Tämä yksittäistapaus kuvaa hyvin monitoimijaverkostoissa toteutettavien teollisuuden kehitysprojektien orkestroinnin haasteita, joihin kehitystyön suunnittelijan tulisi varautua.

Mock-upin reaaliaikaisen testauksen jälkeen tuotteen ja työnkulun ominaisuudet tulisi kehittää insinöörien ja asiakkaiden yhteistyönä, jolloin kannattavuuden näkökulmat tulisivat vahvemmin mukaan päättelyn prosessiin. Tämän pohjana käyttöarvon määrittelyn, luonnin, arvotuksen, ja liittyvien päätösten vaikutuksia IoT-järjestelmien tietoliikenteen arkkitehtuuriin arvioidaan yhdistämällä luvussa 3 kuvattuja eri alojen menetelmiä. Itse arviointiprosessin muotoilu ja digitalisointi muodostuu kuitenkin jopa itsenäisenä metatason työpanoksena. Rakennusalaalla parametrinen suunnittelu on tunnetuinta rakenneteknisissä sovelluksissa, kuten rakenteiden tai energiakulutuksen moniparametrisessa optimoinnissa. Kuitenkin parametrinen suunnittelun arvo, toki myös haasteellisuus, ovat itse asiassa korkeimmillaan monialaisissa sovelluksissa, joissa asiantuntijatiedon vaihto on aikaa vievä elementti. Esimerkiksi energiakorjauksessa parametrinen monialatyöskentelyyn perustuva pipeline voi yhdistää energiakulutuksen, rakennusfysikaalisen suunnittelun, tilasuunnittelun ja materiaalipäästöjen optimoinnin suoritukset. Kun tekniset riippuvuudet ovat selvitetty, perinteisiä tai edistyneempiä taloussuunnittelun malleja voidaan yhdistää energiakorjauksen skenaarioihin. Viimeiseksi, digitaaliseen kaksoseen perustuvan laaja-alaisen sidosryhmien keskustelun tulisi mahdollistaa moninaiset arvonluonnin ja riskien tunnistamisen näkökulmat sekä arvioida, ovatko riskit hyväksyttäviä.

6.2 Tutkimuskysymykset

Tutkimuskysymysten selvitys tässä työssä on sekä onnistunut että epäonnistunut. Merkittäviltä osin työn aikana havaittiin monialaisen yhteistyön orkestrointia vaikeuttavat seikat, joiden selvittäminen jalkautetaan eteenpäin jatkuvan tutkimus- ja ohjeistustyön seuraaviin

vaiheisiin. Olennaisilta osin tämän työn luvut 2...4 toimivat alustavana kirjallisuustarkasteluna luoden näille jo aloitetuille projekteille teoreettisen viitemateriaalin.

Kiinteistöjen ennustavan kunnossapidon hallintamenetelmän skaalautuvan monialatyöskentelyalustan ratkaisut avattiin monipuolisesti luvussa 2 yleensä kiinteistön arvohallinnan dokumentoinnin ja dokumentointikierron kehitysvaiheiden näkökulmista sekä luvussa 4 syvennettiin digitaalisten kaksosten periaatteiden näkökulmasta. Eri luontoisten tietolähteiden ja dokumentaation käsittelyn kehitykseen liittyvien ammattiroolien ja vastuiden osalta tämän työn havaintoihin kuuluu, ettei yksittäisiä kehityssuuntia kuvaavissa alan lähteissä lähtökohtaisesti tarjota kuvausta työn onnistumisen kannalta oleellisilta ammattivalmiuksilta. Myös perustavanlaatuisen tason kirjajulkaisut keskittyvät lähinnä ammattilaisten käyttöön tarkoitettujen teknisten aspektien kuvaukseen.

Kokonaisratkaisun asiantuntijaosaamisen profiilit ja yhteistyökuviot ovat yllä mainituista syistä jääneet tässä työssä käsittelemättä. Asiantuntijaosaamisen profiilien kokemusperäinen selvitys olisi todennäköisesti vaatinut huomattavan laajaa haastattelututkimusta, jonka avulla olisi mahdollista kerätä vertailukelpoista tietoa useammasta eri muotoisista hankkeista. Tällaisen selvityksen laajuus olisi tämän työn mittakaavaa nähden iso. Asiantuntijatyöskentelyn viestinnällisten rajapintojen kehitykseen on tämän työn luvuissa 2...4 lähinnä luotu teoreettinen pohja. Käytännön soveltaminen ja ohjeiden laadinta jää jatkokehitykseksi seuraaviin projekteihin. Työn pääasiallisia havaintoja jalkautetaan yhteenvetona v.2024 julkaistavaksi suunnittelussa Rakennusinsinööriliiton ohjejulkaisussa *RIL 277-2024 Puukerrostalon elinkaarisuunnittelu: tilaajan ohje*. Tällöin toimintaohjeistuksen muotoilussa käytetään myös EU:n Energiatehokkuusdirektiivin mukaisen suunnittelutoiminnan osaamishallintaa käsittelevän INSTRUCT-projektin (INSTRUCT, n.d.) havainnot ja kehityksen tulokset, joiden kuvaus on jätetty tämän opinnäytetyön ulkopuolelle. Myös varsinaisesti tämän työn pääpisteenä olevan EU:n Energiatehokkuusdirektiivin mukaisille hankkeille tyypillisten ammattivalmiuksien määrittely jatkuu todennäköisesti iteratiivisesti INSTRUCT mukaisten käytäntöjen edetessä käytäntöön.

Anturipohjaisen kiinteistöjen arvohallinnan kokonaisratkaisun käyttöönoton ja skaalautumisen varmistamisen osalta tässä työssä täydennettiin lukujen 2 ja 4 kiinteistöjen arvohallinnan, tieto- ja asiakirjahallinnan menetelmät luvussa 3 kuvatuilla prosessiohjausmenetelmillä, kuten SDL ja Vol. Prosessiohjausmenetelmien avulla verkostoitu monialatyöskentely voidaan kehittää ohjatusti yksinkertaisista mock-up suorituksista isompiin kokonaisuuksiin. Luvussa 3 kuvattiin myös vastaavissa kansallisen tason kehitysprojekteissa havaitut haasteet, kuten kokonaisvaltaisen integroinnin puutteet ja arkikehityksen vallitsevuuden. Haasteiden selvittämisen tukena luotiin yhteenvedon kehitysprojektin muotoilu-

prosessin vaiheista ja vaihekohtaisista tehtävistä sisältäen innovaatiohallinnan eri vaiheiden tietotarpeet.

Kehitystyön välituloksia esitettiin 22-23.3.2023 järjestetyssä AI in AEC 2023 (tekoäly arkkitehti- ja rakennesuunnittelussa ja rakentamisessa) kansainvälisessä konferenssissa (Rodionova 2023).

Lähteet

- Acharya, D., Boyd, R., & Finch, O. 2020. From Principles to Practices: Realising the value of circular economy in real estate. Viitattu 08.07.2023. Saatavissa <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/Realising-the-value-of-circular-economy-in-real-estate.pdf>
- Adam, A., & Lindahl, G. 2017. Applying the dynamic capabilities framework in the case of a large public construction client. *Construction Management and Economics*, 35 (7), 420–431. Viitattu 15.07.2023. Saatavissa <https://doi.org/10.1080/01446193.2017.1309441>
- Aksenova, G. 2020. The dark side of ecosystem orchestration: an empirical investigation of building information management in the digital built environment sector. University of Liverpool. Viitattu 15.07.2023. Saatavissa <https://livrepository.liverpool.ac.uk/3092556/>
- Aloisio, A., Pasca, D., Tomasi, R., & Fragiaco, M. 2020. Dynamic identification and model updating of an eight-storey CLT building. *Engineering Structures*, 213 (March), 8. Viitattu 15.07.2023. Saatavissa <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110593>
- Ammar, A., Nassereddine, H., AbdulBaky, N., AbouKansour, A., Tannoury, J., Urban, H., & Schranz, C. 2022. Digital Twins in the Construction Industry: A Perspective of Practitioners and Building Authority. *Frontiers in Built Environment*, 8. Viitattu 15.07.2023. Saatavissa <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.834671>
- Bednar, T., & Hagentoft, C.-E. 2015. Risk management by probabilistic assessment. Development of guidelines for practice. IEA Annex 55 Reliability of Energy Efficient Building Retrofitting- Probability Assessment of Performance and Cost RAP-RETRO. 47. Viitattu 11.03.2023. Saatavissa http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/223306/local_223306.pdf
- Boje, C., Kubicki, S., Guerriero, A., Rezgui, Y., & Zarli, A. 2022. Digital twins for the built environment. *Teoksessa Buildings and Semantics* pp. 179–199. CRC Press. Viitattu 15.07.2023. Saatavissa <https://doi.org/10.1201/9781003204381-10>
- Bolton, A., Butler, L., Dabson, I., Enzer, M., Evans, M., Fenemore, T., & Harradence, F. 2018. The Gemini Principles. White paper. Cambridge: University of Cambridge. Viitattu 11.03.2023. Saatavissa <https://doi.org/10.17863/CAM.32260>
- Camposano, J. C., Smolander, K., & Ruippo, T. 2021. Seven Metaphors to Understand Digital Twins of Built Assets. *IEEE Access*, 9, 27167–27181. Viitattu 11.03.2023. Saatavissa <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3058009>

- Christersson, M., Vimpari, J., & Junnila, S. 2015. Assessment of financial potential of real estate energy efficiency investments-A discounted cash flow approach. *Sustainable Cities and Society*, 18, 66–73. Viitattu 05.03.2023. Saatavissa <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.06.002>
- Costa, G., Sicilia, A., Lilis, G. N., Rovas, D. V., & Izkarta, J. 2016. Framework for district energy retrofiting. *European Conference on Product and Process Modelling ECPPM*. Viitattu 18.03.2023. Saatavissa <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35829.37603>
- Costin, A., & McNair, J. 2022. IoT and edge computing in the construction site. *Teoksessa Buildings and Semantics* pp. 223–237. CRC Press. Viitattu 23.10.2023. Saatavissa <https://doi.org/10.1201/9781003204381-12>
- Eclipse Foundation. 2018. IoT developer survey results. Viitattu 15.07.2023. Saatavissa <https://iot.eclipse.org/community/resources/iot-surveys/assets/iot-developer-survey-2018.pdf>
- Eclipse Foundation. 2022. IoT & Edge Developer Survey Report. Viitattu 15.07.2023. Saatavissa <https://outreach.eclipse.foundation/iot-edge-developer-survey-2022>
- Elagiry, M., Charbel, N., Bourreau, P., Angelis, E. Di, & Costa, A. 2020. IFC to building energy performance simulation: A systematic review of the main adopted tools and approaches. *BauSIM 2020 - 8th Conference of IBPSA Germany and Austria*. Viitattu 08.07.2023. Saatavissa https://www.researchgate.net/publication/345983333_IFC_to_Building_Energy_Performance_Simulation_A_systematic_review_of_the_main_adopted_tools_and_approaches
- El-Diraby, T., & Sobhkhiz, S. 2022. The building as a platform: Predictive digital twinning. *Teoksessa Buildings and Semantics* pp. 201–221. CRC Press. Viitattu 18.03.2023. Saatavissa <https://doi.org/10.1201/9781003204381-11>
- Elson, J. S., Ward, K., Schuetzler, R., & Lundmark, L. 2019. Toward a theory of early trust in intelligent systems: exploring psychological factors and cognitive processes. *University of Nebraska*. Viitattu 23.10.2023. Saatavissa <https://www.proquest.com/openview/45b57e8c21ba72564c3ea1cc07fb1770/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>
- European Commission. 2021, July 14. Commission proposes new Energy Efficiency Directive. *Internet-julkaisu*. Viitattu 11.03.2023. Saatavissa https://commission.europa.eu/news/commission-proposes-new-energy-efficiency-directive-2021-07-14_en

European Commission. 2022. Industry 5.0, a transformative vision for Europe: governing systemic transformations towards a sustainable industry. Internet-julkaisu. Viitattu 15.07.2023. Saatavissa https://research-and-innovation.ec.europa.eu/news/all-research-and-innovation-news/industry-50-transformative-vision-europe-2022-01-13_en

Franke, S., & Franke, B. 2014. COST Workshop – Highly Performing Timber Structures : Reliability , Assessment , Monitoring and Strengthening. Viitattu 05.03.2023. Saatavissa https://www.researchgate.net/publication/312198355_COST_Workshop_-_Highly_Performing_Timber_Structures_Reliability_Assessment_Monitoring_and_Strengthening

Grieves, M. 2016. Origins of the Digital Twin Concept. Florida Institute of Technology / NASA. Viitattu 05.03.2023. Saatavissa <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26367.61609>

GOV.UK. 2023. Environmental principles policy statement. Internet-julkaisu. Viitattu 23.10.2023. Saatavissa <https://www.gov.uk/government/publications/environmental-principles-policy-statement/environmental-principles-policy-statement#:~:text=The%20polluter%20pays%20principle,damage%2C%20or%20the%20wider%20community>

Hagentoft, C.-E., Ramos, N. M. M., & Grunewald, J. 2015. Annex 55, Reliability of Energy Efficient Building Retrofitting - Probability Assessment of Performance and Cost (RAP-RETRO). International Energy Agency. Viitattu 23.10.2023. Saatavissa https://www.iea-ebc.org/Data/publications/EBC_Annex_55_RAP_RETRO_Practice_and_Guidelines.pdf

Hall, D., Algiers, A., Lehtinen, T., Levitt, R. E., Li, C., & Padachuri, P. 2014. The role of integrated project delivery elements in adoption of integral innovations. Proceedings – EPOC 2014 Conference, 1–20. Viitattu 23.10.2023. Saatavissa https://www.researchgate.net/publication/281064102_The_role_of_Integrated_Project_Delivery_elements_in_adoption_of_integral_innovations

Helsingin kaupunki. 2023. Helsinki 3D. Internet-sivu. Viitattu 23.10.2023. Saatavissa <https://Www.Hel.Fi/Fi/Paatoksenteko-Ja-Hallinto/Tietoa-Helsingista/Kartat-Ja-Paikkatieto/Helsinki-3d#kaupunkitietomalli>

Hevner, A. R. 2007. A Three Cycle View of Design Science Research. Scandinavian Journal of Information Systems Vol. 19, Issue 2. Viitattu 23.10.2023. Saatavissa <https://aisel.aisnet.org/sjis/vol19/iss2/4/>

INSTRUCT. n.d. New set of energy efficiency skills across construction value chain. Internet-sivu. Viitattu 10.11.2023. Saatavissa <https://instructproject.eu/>

IPCC WGII. 2022. Sixth Assessment Report, Technical Summary. Viitattu 05.03.2023. Saatavissa https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_TS.pdf

Jylhä, K., Ruosteenoja, K., Böök, H., Lindfors, A., Pirinen, P., Laapas, M., & Mäkelä, A. 2020. Nykyisen ja tulevan ilmaston sääätietoja rakennusfysikaalisia laskelmia ja energialaskennan testivuotta 2020 varten. Ilmatieteen laitos. Viitattu 05.03.2023. Saatavissa <https://doi.org/10.35614/isbn.9789523361287>

Kangas, A. S., Horne, P., & Leskinen, P. 2010. Measuring the value of information in multicriteria decisionmaking. *Forest Science*, 56 (6), 558–566. Viitattu 23.10.2023. Saatavissa <https://academic.oup.com/forestscience/article/56/6/558/4604174>

Kangasharju, A., & Vasara, A. 2023. Tutkimus- ja kehittämistyö on Suomen kohtalonkysymys. *Helsingin Sanomat*. Viitattu 23.10.2023. Saatavissa <https://www.hs.fi/mielipide/art-2000009455618.html>

Kauppi, T., Berg, A., Dahlbo, H., Eilu, P., Heikkilä, P., Hentunen, A., Hilska-Keinonen, K., Horn, S., Ilvesniemi, Ha., Jenu, S., Karhu, M., Karppinen, T., Kauppi, S., Kivikytö-Reponen, P., Lavikko, S., Lehtonen, E., Luostarinen, S., Majaniemi, S., Malmi, P., & Naumanen, M. 2022. Handbook for a Data-Driven Circular Economy in Finland. Sitra. Viitattu 18.03.2023. Saatavissa <https://cris.vtt.fi/en/publications/handbook-for-a-data-driven-circular-economy-in-finland-data-sourc>

Keisler, J. M., Collier, Z. A., Chu, E., Sinatra, N., & Linkov, I. 2014. Value of information analysis: The state of application. *Environment Systems and Decisions*, 34 (1), 3–23. Viitattu 18.03.2023. Saatavissa <https://doi.org/10.1007/s10669-013-9439-4>

Kernick, J. 2021. Catastrophe and Systemic Change: Learning from the Grenfell Tower Fire and Other Disasters. London: London Publishing Partnership.

Krogstrup, H. K. 2004. Asiakaslähtöinen arviointi Bikva-malli. *Stakes*. <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe201204193603>

Larjosto, V., Onnela, S., Ronkainen, T., & Mattinen-Yuryev, M. 2021. Tampereen kanta-kaupungin yleiskaava, valtuustokausi 2017-2021. Vaikutusarvio ilmastonmuutokseen sopeutumisesta ja ilmatoriskien hallinnasta. Tampereen kaupunki. Viitattu 18.03.2023. Saatavissa https://www.tampere.fi/sites/default/files/2022-05/Ilmastonmuutokseen_sopeutuminen_2020.pdf

Lea, P.; Shetty, A.; Gonsalves, J. 2020. IoT and Edge Computing for Architects. 2. painos. Birmingham: Packt Publishing.

Long, L., Döhler, M., & Thöns, S. 2022. Determination of structural and damage detection system influencing parameters on the value of information. Structural Health Monitoring, 21 (1), 19–36. Viitattu 15.07.2023. Saatavissa <https://doi.org/10.1177/1475921719900918>

Lu, Q.; Asce, A. M.; Parlikad, A. K.; Ranasinghe, D.; Liang, Z.; Konstantinou, E.; Heaton, J.; Schooling, J. 2020. Developing a Digital Twin at Building and City Levels: A Case Study of West Cambridge Campus. Viitattu 22.07.2023. Saatavissa DOI: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000763

Luoma, P., Toppinen, A., & Penttinen, E. 2021. The Role and Value of Data in Realising Circular Business Models-a Systematic Literature Review. Journal of Business Models, 9 (2), 44–71. Viitattu 15.07.2023. Saatavissa <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/111970>

Martinaitis, V., Kazakevičius, E., & Vitkauskas, A. 2007. A two-factor method for appraising building renovation and energy efficiency improvement projects. Energy Policy, 35 (1), 192–201. Viitattu 18.03.2023. Saatavissa <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.11.003>

Mattern, S. 2021. A City Is Not A Computer: Other Urban Intelligences. Woodstock: Princeton University Press.

Mölsä, S. 2016. Näin Suomi homehtui – hyvä rakentamistapa sai aikaan pahaa jälkeä. Rakennuslehti. Viitattu 22.10.2023. Saatavissa <https://www.rakennuslehti.fi/2016/06/nain-suomi-homehtui-hyva-rakentamistapa-sai-aikaan-pahaa-jalkea/>

Ojasalo, K., Moilanen, T., & Ritalahti, J. 2014. Kehittämistyön menetelmät. 2:n painos. Helsinki: WSOY.

Pauwels, P., Shelden, D., Brouwer, J., Sparks, D., Nirvik, S., & McGinley, T. P. 2022. Open data standards and BIM on the cloud. Teoksessa Buildings and Semantics pp. 101–136. CRC Press. Viitattu 15.10.2023. Saatavissa <https://doi.org/10.1201/9781003204381-6>

Pernaa, J. 2013. Rogersin innovaatio. Ajatuksia. Internet-sivu. Viitattu 14.10.2023. Saatavissa <https://peda.net/p/johannespernaa/ajatuksia/2013/rogersin-innovaatio>

Raivio, T., Laine, A., Klimscheffskij, M., Heino, A., & Lehtomäki, J. 2020. Rakennusteollisuuden ja rakennetun ympäristön vähähiilisyys tien kartta. Rakennusteollisuus RT. Viitattu 22.07.2023. Saatavissa <https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/ymparisto-ja->

[energia/vahahiilisyyys_uudet/rt_4.-raportti_vahahiilisyyden-tiekartta_lopullinen-versio_clean.pdf](#)

RAKLI ry. 2023. Rakennusten energiatehokkuusdirektiivi uhkaa johtaa Suomessa massiivisiin rakennusten pakkokorjauksiin. STT INFO. Viitattu 22.07.2023. Saatavissa <https://www.sttinfo.fi/tiedote/rakennusten-energiatehokkuusdirektiivi-uhkaa-johtaa-suomessa-massiivisiin-rakennusten-pakkokorjauksiin?publisherId=40066563&releasId=69968238>

Raworth, K. 2017. Doughnut Economics: Seven Ways to Think Like a 21st-Century Economist. Random House Business Books.

Riggio, M., & Dilmaghani, M. 2020. Structural health monitoring of timber buildings: a literature survey. Building Research and Information, 48 (8), 817–837. Viitattu 05.03.2023. Saatavissa <https://doi.org/10.1080/09613218.2019.1681253>

RIL ry. 2019. Rakennetun omaisuuden tila ROTI 2019. RIL ry. Viitattu 05.03.2023. Saatavissa https://www.ril.fi/media/2019/roti/roti_2019_raportti.pdf

Rodionova, K. 2021. Adapting our buildings for circular economy: harnessing risks and opportunities of structural timber. Dissertation for the degree of Master of Studies. University of Cambridge.

Rodionova, K. 2023. Potential uses of IoT-DT pipeline for value management of real assets: recommendations for investors and construction clients. <https://aiaec2023.exordo.com/programme/presentation/24>

Rodionova, K., & Oldenburg, J.-R. 2023. Holistic aspects and frameworks of lifecycle durability: climate change, sociotechnical robustness, and design for longitudinal learning. Teoksessa Design for Robustness, Adaptability, Disassembly and Reuse, and Repairability of Taller Timber Buildings: A State of the Art Report. COST Action CA 20139 Holistic Design of Taller Timber Buildings HELEN. Viitattu 04.11.2023. Saatavissa <https://cahelen.eu/2022/12/01/the-state-of-the-art-report-of-cost-action-helen/>

Sacks, R., Brilakis, I., Pikas, E., Xie, H. S., & Girolami, M. 2020. Construction with digital twin information systems. Data-Centric Engineering. Viitattu 14.10.2023. Saatavissa <https://doi.org/10.1017/dce.2020.16>

Sagar, A. 2021. Government considering 'Polluter Pays' Bill for cladding remediation. Viitattu 04.11.2023. Saatavissa <https://www.mortgagesolutions.co.uk/news/2021/08/10/government-considering-polluter-pays-bill-for-cladding-remediation/>.

Seppänen, O., Lappalainen, E., Al Barazi, A., Görsch, C., Zheng, Y., Abou, H., Aalto-Yliopiston, I., Laine, J., & Huovinen, A. 2023. Building 2030: Tuotantoprosessin digitaalinen kaksonen. Loppuraportti. Viitattu 22.07.2023. Saatavissa

<https://www.aalto.fi/sites/g/files/flghsv161/files/2023-03/Building-2030-digitaalinen-kaksonen-loppuraportti.pdf>

Stähle, Pirjo., Sotarauta, Markku., Pöyhönen, Aino. 2004. Teknologian arviointeja. Innovatiivisten ympäristöjen ja organisaatioiden johtaminen. Eduskunnan kanslia. Viitattu 18.03.2023. Saatavissa

https://www.eduskunta.fi/FI/naineduskuntatoimii/julkaisut/Documents/ekj_6+2004.pdf

Stepinac, M., Rajcic, V., & Honfi, D. 2019. Condition assessment of timber structures - Quantifying the value of information. IABSE Symposium, Nantes 2018: Tomorrow's Megastructures, 2019, S27-9-S27-18.

Teknologiategollisuus. 2023. Rakennetun omaisuuden tila ROTI 2023.

<https://skol.teknologiategollisuus.fi/sites/skol/files/inline-files/ROTI%202023.pdf>

Terveet Tilat. 2022. Terveet Tilat 2028: Koulutuksia kosteudenhallinnasta. Koulutusmateriaali. Valtioneuvoston kanslia. Viitattu 22.07.2023. Saatavissa

<https://tilatjaterveys.fi/kosteudenhallinta>

Toikko, T. & Rantanen, T. 2009. Tutkimuksellinen kehittämistoiminta: näkökulmia kehittämissprosessiin, osallistamiseen ja tiedontuotantoon. E-kirja. Tampere: Tampere University Press. Viitattu 26.11.2022. Saatavissa

https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/100802/Toikko_Rantanen_Tutkimuksellinen_kehittamistoiminta.pdf?sequence=1&isAllowed=y

UK BIM Framework. 2019. Government Soft Landings: Revised guidance for the public sector on applying BS8536 parts 1 and 2 Updated for ISO 19650. UK BIM Framework. Viitattu 18.03.2023. Saatavissa

https://ukbimframework.org/wp-content/uploads/2019/11/GSL_Report_PrintVersion.pdf

Valtioneuvosto. 2022. Valtioneuvoston selonteko: Suomen digitaalinen kompassi, VNS 10/2022 vp. Valtioneuvosto. Viitattu 25.02.2023. Saatavissa <https://valtioneuvosto.fi/-/10623/digitaalisen-kompassin-selonteko-asettaa-suunnan-suomen-digitalisaatiokehitykselle>

<https://valtioneuvosto.fi/-/10623/digitaalisen-kompassin-selonteko-asettaa-suunnan-suomen-digitalisaatiokehitykselle>

van Heesch, U., Avgeriou, P., & Hilliard, R. 2012. A documentation framework for architecture decisions. Journal of Systems and Software, 85 4), 795–820. Viitattu 29.07.2023. Saatavissa

<https://doi.org/10.1016/j.jss.2011.10.017>

Verveij, S. 2017. Socioeconomic Evaluation of Megaprojects. In Socioeconomic evaluation of megaprojects: Dealing with uncertainties pp. 220–240. E-kirja. Viitattu 25.02.2023. Saatavissa <https://www.routledge.com/Socioeconomic-Evaluation-of-Megaprojects-Dealing-with-uncertainties/Lehtonen-Joly-Aparicio/p/book/9780367026882>

Vinha, J. 2019. 25 vuotta rakennusfysiikkaa Tampereella-historiaa, nykypäivää ja tulevaisuutta. Rakennusfysiikkaseminaari 2019. Luento. Viitattu 04.11.2023. Saatavissa https://research.tuni.fi/uploads/2021/01/266829f6-rf2019_juhlaluento_juha-vinha.pdf

Vinha, J., Laukkarinen, A., Mäkitalo, M., Nurmi, S., Huttunen, P., Pakkanen, T., Kero, P., Manelius, E., Lahdensivu, J., Köliö, A., Lähdesmäki, K., Piironen, J., Kuhno, V., Pirinen, M., Aaltonen, A., Suonketo, J., Jokisalo, J., Teriö, O., Koskenvesa, A., & Palolahti, T. 2013. Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristykseen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Tutkimusraportti 159. Viitattu 05.03.2023. Saatavissa <https://researchportal.tuni.fi/en/publications/ilmastonmuutoksen-ja-l%C3%A4mm%C3%B6neristykseen-lis%C3%A4yksen-vaikutukset-vaipp-3>

Wennerholm, E. 2012. Transitioning from a Goods-dominant to a Service-dominant logic: Visualizing the role of Remote Monitoring Systems. Viitattu 22.07.2023. Saatavissa <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:539625/FULLTEXT01.pdf>

West, S., Stoll, O., Meierhofer, J., & Züst, S. 2021. Digital twin providing new opportunities for value co-creation through supporting decision-making. Applied Sciences (Switzerland), 11 9. Viitattu 15.10.2023. Saatavissa <https://doi.org/10.3390/app11093750>

Wikipedia. n.d.-a. Grenfell Tower fire. Wiki. Viitattu 04.11.2023. Saatavissa https://en.wikipedia.org/wiki/Grenfell_Tower_fire

Wikipedia. n.d.-b. United Kingdom cladding crisis. Wiki. Viitattu 04.11.2023. Saatavissa https://en.wikipedia.org/wiki/United_Kingdom_cladding_crisis