

Teollinen rakentaminen, kiertotalous ja digitalisoidut toimitusketjut

Building 2030 loppuraportti vuosina 2023–2025 toteutuista osatutkimuksista

Kirjoittajat¹:

Antti Peltokorpi, Petri Uusitalo, Tuomas Valkonen, Robert van den Brink, Teemu Alaluusua, Bettina Ruottinen, Aalto-yliopisto, Rakennustekniikan laitos



12.3.2026

¹ Tutkimuksen toteutuksessa on ollut mukana Aalto-yliopiston Rakennustekniikan laitoksen Building 2030 tutkimushankkeen yrityskumppanit: Admicom, A-Insinöörit, Asensi, Fira, Haahtela, Hilti, Skanska, Granlund, Jatke, Lujatalo, Parma, Pohjola Rakennus, Rakennustieto, Rakli, Ramboll, Ramirent, Rejlers, SRV, Stark, Trimble ja Vastuu Group.

Sisällysluettelo

1	Tiivistelmä	3
2	Johdanto.....	4
3	Teollinen rakentaminen	6
3.1	Teollisen rakentamisen ilmentymät ja innovaatiot	6
3.2	Talotekniikan esivalmistus ja toleranssien hallinta	11
3.3	Betonielementtien toleranssien kustannukset	15
4	Kiertotalous: Enabling Circular Construction Through Supply Chains and Business Models.....	18
4.1	Introduction.....	18
4.2	Research methods	19
4.3	Findings	20
4.4	Discussion	23
4.5	Concluding remarks	25
5	Toimitusketjun digitalisointi ja tiedon virtaus	26
5.1	Tarve ja tavoitteet	26
5.2	Digitalisaation tiekartta rakennusalalla	27
5.3	Toimitusketjujen digitalisaatio	30
5.3.1	Tilauksesta suunniteltavien (ETO) rakennustuotteiden toimitusketjun digitalisointi	31
5.3.2	Vakiotuotteiden (MTS) toimitusketjun digitalisointi	34
5.4	Digitalisaation seuraavat askeleet: Kokonaisarkkitehtuuri ja yhteentoimivuuden teorettinen viitekehys	39
5.5	Toimitusketjujen digitaalisen hallinnan maturiteettimalli.....	40
6	Lähdeluettelo.....	44

1 Tiivistelmä

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, miten teollinen rakentaminen, toleranssien hallinta, kiertotalous sekä toimitusketjujen digitalisoitu tiedon virtaus voivat parantaa rakennusalan tuottavuutta, laatua ja kestävyyttä. Raportti kokoaa Building 2030 -konsortion kahden osahankkeen (2023–2025) tulokset ja tarkastelee rakentamista koko toimitusketjun ja rakennuksen elinkaaren näkökulmasta.

Teollisen rakentamisen osalta tutkimus osoittaa, että standardointi, esivalmistus ja modulaariset ratkaisut mahdollistavat lyhyemmät läpimenoajat, tasaisemman laadun ja paremman resurssitehokkuuden. Teollinen toimintatapa ei rajoitu yksittäisiin teknologioihin, vaan edellyttää koko suunnittelu-, tuotanto- ja toimitusketjun yhteensovittamista. Kansainväliset esimerkit osoittavat, että teollinen rakentaminen toimii myös kestävien ratkaisujen mahdollistajana.

Toleranssien hallinta nousi keskeiseksi kehityskohteeksi sekä talotekniikassa että betonielementtirakentamisessa. Talotekniikan esivalmistusta koskevissa tapaustutkimuksissa havaittiin, että perinteinen suunnittelutarkkuus ei riitä teolliseen valmistukseen, vaan rakenteiden ja asennusten vaihtelut aiheuttavat lisätyötä työmaalla. Betonielementtien toleranssien kustananalyysi osoitti, että poikkeamien suorat kustannukset voivat olla yli 1 % hankkeen arvosta, minkä lisäksi syntyy merkittäviä epäsuoria vaikutuksia tuotannon sujuvuuteen ja esivalmistuksen hyödyntämiseen.

Kiertotalouden osalta tutkimus syvensi ymmärrystä rakennusosien uudelleenkäytön vaatimista toimitusketjuista ja liiketoimintamalleista. Tapaustutkimukset osoittivat, että kiertotalouden toimitusketjut eivät ole välttämättä perinteisiä ketjuja monimutkaisempia, mutta ne edellyttävät uusia toimijaroolien yhdistelmiä, oikein ajoitettua materiaalien hankintaa ja joustavaa suunnittelua.

Toimitusketjujen digitalisoidun tiedon virtauksen osalta tutkimus osoitti, että suurimmat pulonkaulat syntyvät tiedostopohjaisesta tiedonkäsittelystä ja ei-konekäsiteltävästä tiedosta. Suunnittelu- ja tuotetiedon vakiointi, tuoteyksilöinti ja sanomapohjainen tiedonsiirto muodostavat perustan tehokkaalle toimitusketjun hallinnalle, kiertotalouden toteuttamiselle ja vastuullisuusraportoinnin automatisoinnille.

2 Johdanto

Tähän raporttiin on koottu keskeiset tutkimustulokset kahdesta Building 2030 konsortion osahankkeesta:

- 1. Teollisen rakentamisen ja toimitusketjujen merkitys virtaustehokkuuden parantamisessa (2023-2024)**
- 2. Rakentamisen kiertotalous: tiedon virtautus ja liiketoimintamallit (2024-2025)**

Molemmissa hankkeissa tutkittiin ja kehitettiin rakentamisen tiedon digitalisoitua rikastamista ja hyödyntämistä rakennushankkeen prosesseissa ja toimitusketjuissa. Lisäksi tutkittiin teollista rakentamista ja kiertotalouden toimitusketjuja ja liiketoimintamalleja. Aiheet liittyvät myös toisiinsa, sillä teollinen toimintatapa on yksi digitalisoinnin hyödyntämisen mahdollistaja: kun suunnitteluratkaisuja vakioidaan ja käytettyjä samoja hyväksi todettuja tuotteita, helpottuu suunnittelu- ja tuotetiedon hallinta ja integrointi. Rakennusten elinkaaren lopussa as-built tiedon laatu ja saatavuus on puolestaan merkittävä rakennusosien uudelleenkäytön mahdollistaja. Lisäksi modulaarisilla tuotteilla ja teollisilla valmistustavoilla voidaan oikein suunniteltuna edistää rakennusten purettavuutta ja rakennusosien uudelleenkäyttöä.

Teollisen rakentamisen osalta hanke keskittyi teollisen rakentamisen ilmentymien tunnistamiseen ja luokitteluun sekä toleranssien hallintaan ja toimitusketjujen ja tuotetiedon hallintaan. Toleranssien hallinta valikoitui yhdeksi alateemaksi, koska keskeinen osa parempaa vaihtelun hallintaa on tuotteen toleranssien ja niiden vaikutusten ja hallintakeinojen ymmärtäminen koko rakentamisen prosessissa. Esimerkiksi betonielementtirakentamisen yhteydessä on usein keskusteltu liian väljistä valmistus- ja asennustoleransseista, jotka johtavat lisätyöhön ja improvisointiin työmaalla sekä estävät teollisen asennustoiminnan runkoa seuraavissa rakennusvaiheissa. Osahankkeen tutkimuskysymykset ovat seuraavat:

- 1. Miten teollinen rakentaminen määritellään ja millaisia ilmentymiä siitä on maailmalla?**
- 2. Mikä on nykyisen betonielementtirakentamisen toleranssiongelmien suuruusluokka?**
- 3. Mitkä ovat toleranssien hallinnan parhaat käytännöt suunnittelusta ja hankinnasta valmistukseen ja rakentamiseen?**

Kiertotalouden tutkimusosiossa pääpaino oli lisätä ymmärrystä rakennusosien uudelleenkäytön vaatimista toimitusketjuista, liiketoimintamalleista ja tiedon hallinnasta. Rakennusosien uudelleenkäytöstä on paljon tutkimusta liittyen mm. purkuprosesseihin ja tuotteiden teknisen suorituskyvyn testaamiseen, mutta ymmärrys siitä, millaisia uusia toimijoita uudelleenkäyttö vaatii ja miten purettavan rakennuksen ja uuden rakennuksen prosessit linkittyvät toisiinsa, on vielä vähäistä. Tutkimusosion tutkimuskysymykset olivat:

- 1. Millaisia ovat rakennusosien uudelleenkäyttöön liittyvät toimitusketjut ja prosessit?**

2. Miten prosessit eroavat perinteisestä lineaarisesta rakentamisesta?

Toimitusketjun digitalisoinnin ja tiedon virtauksen osalta tutkimuksen tavoitteena oli lisätä ymmärrystä siitä, miten suunnittelu- ja tuotetiedon harmonisointi sekä digitalisointi voidaan toteuttaa käytännössä. Aiempi tutkimus on tunnistanut vakioinnin tarpeen erityisesti suunnittelutiedon, tuoteyksilöinnin, -tunnistamisen ja logististen toimitusten osalta. Näiden osa-alueiden yhteinen nimittäjä on tiedon konekäsiteltävyys, joka muodostaa perustan CO₂-raportoinnin ja kiertotalouden toteutumiselle. Kun tieto on rakenteista, standardoitua ja digitaalisesti siirrettävissä, voidaan varmistaa toimitusketjun tehokkuus, vastuullisuus ja jäljitettävyys. Osa-hankkeen tutkimuskysymykset ovat seuraavat:

- 1. Millainen tulisi olla digitalisaation tiekartta rakennusallalla?**
- 2. Miten digitalisaatiota tulisi edistää ETO ja MTS tuotteiden toimitusketjuissa?**
- 3. Millä mittaristolla ja kypsyysmallilla voidaan arvioida toimitusketjun hallinnan maturiteettia?**

Tutkimusmenetelmät valittiin tutkimusteemoittain. Menetelmät pitivät sisällään kirjallisuuskatsauksia, haastattelututkimuksia ja tapaustutkimuksia Suomessa ja ulkomailla. Tuloksia validoitiin kahdeksassa työpajassa, joihin osallistui 20-30 asiantuntijaa erilaisista rakennusalan yrityksistä.

3 Teollinen rakentaminen

3.1 Teollisen rakentamisen ilmentymät ja innovaatiot

Teollinen rakentaminen on moderni rakentamisen muoto, jossa hyödynnetään standardisointia, kiertotaloutta, alustaratkaisuja ja tuotteistamista. Tämä rakentamistapa mahdollistaa tehokkaamman resurssien käytön, lyhyemmät rakennusajat ja pienemmät kustannukset perinteisiin rakentamistapoihin verrattuna.

Nyky-yhteiskunnassa teollisen rakentamisen merkitys kasvaa, kun kaupungistuminen, ilmastomuutoksen haasteet ja kustannuspaineet pakottavat rakennusallalle uusia ratkaisuja. Teollinen rakentaminen ei ole vain teknologiaa, vaan myös toimintatapa, joka kattaa suunnittelun, tuotannon ja koko toimitusketjun hallinnan.

Stanford Industrialized Construction Forum on tuonut yhteen asiantuntijoita ympäri maailmaa pohtimaan, miten teollista rakentamista voidaan kehittää ja laajentaa. Tämä raportti esittelee teollisen rakentamisen menetelmiä, määritelmiä ja erityisesti kansainvälisiä esimerkkejä Yhdysvalloista, Ruotsista ja Australiasta sekä Singaporen erityispiirteitä.

Teollinen rakentaminen ei ole uusi ilmiö, mutta sen nykyaikainen soveltaminen tarjoaa mahdollisuuksia rakentaa käyttäjäkeskeisiä, käytännöllisiä ja kestäviä ratkaisuja. Opit maailmalta tarjoavat arvokkaita lähtökohtia Suomen rakennusalan tulevaisuuden kehitykseen.

Määritelmät

Teollisella rakentamisella tarkoitetaan rakennusprosessia, jossa pyritään yhdistämään esivalmistetut komponentit, modulaarisuus ja teollinen tuotantotapa yhtenäiseksi ja tehokkaaksi järjestelmäksi. Sen tavoitteena on optimoida resurssien käyttöä, vähentää jätettä ja lyhentää rakennusaikoja. Seuraavassa esitellään teollisen rakentamisen keskeisiä määritelmiä ja käsitteitä:

- **Esivalmistus (Prefabricated Construction):** Rakennusosien valmistus tehtaalla, minkä jälkeen ne kuljetetaan ja kootaan työmaalla. Tämä vähentää työmaan työvoiman tarvetta ja nopeuttaa prosessia.
- **Modulaarinen rakentaminen (Modular Construction):** Rakennuksen moduulien, kuten kokonaisen huoneen tai rakennusosan, valmistaminen tehdasolosuhteissa. Moduulit voidaan toimittaa valmiina työmaalle ja asentaa nopeasti paikalleen.
- **Työmaan ulkopuolinen rakentaminen (Off-Site Construction):** Rakentamisen prosessien siirtäminen pois työmaalta, mikä lisää tarkkuutta ja vähentää työmaolosuhteiden aiheuttamia riskejä.
- **DfMA (Design for Manufacturing and Assembly):** Suunnittelutapa, jossa rakenteet ja komponentit suunnitellaan helpottamaan teollista valmistusta ja nopeaa kokoonpanoa. Tämä menetelmä korostaa yksinkertaisuutta ja tehokkuutta.

Lisäksi käytössä on seuraavia termejä, jotka liittyvät teolliseen rakentamiseen:

- **Tehdasrakentaminen (Factory-Built Construction):** Rakenteiden valmistus tehtaassa, mikä mahdollistaa vakioidun laadun ja tuotannon mittakaavaedut.
- **Järjestelmärakentaminen (System-Built Construction):** Rakennusjärjestelmien kokonaisvaltainen suunnittelu ja toteutus.
- **Massaräätälöinti (Mass Customization):** Prosessi, jossa standardoituja komponentteja yhdistellään räätälöityjen ratkaisujen luomiseksi. Tämä mahdollistaa yksilölliset ratkaisut ilman suuria kustannuksia.
- **Edistyneet rakentamistekniikat (Advanced Construction Techniques):** Uusia teknologioita ja menetelmiä, kuten 3D-tulostusta ja robotiikkaa, hyödynnetään rakennusprosessin eri vaiheissa.

Teollisen rakentamisen edut

Teollisen rakentamisen etuja ovat muun muassa:

1. **Nopeus ja tehokkuus:** Rakennusosien valmistus ja asennus on nopeaa verrattuna perinteisiin menetelmiin. Tämä vähentää hankkeiden viivästymisiä ja mahdollistaa resurssien optimoinnin.
2. **Kestävä kehitys:** Materiaalien käyttöä voidaan optimoida ja hukkaa vähentää merkittävästi. Lisäksi työmaan ympäristövaikutukset pienenevät.
3. **Laatu ja turvallisuus:** Teollisessa rakentamisessa komponenttien valmistus tapahtuu hallituissa olosuhteissa, mikä parantaa laatua ja turvallisuutta.
4. **Kustannustehokkuus:** Standardisoinnin ja mittakaavaetujen ansiosta kustannukset voidaan pitää kurissa, erityisesti suurissa hankkeissa.

Kehitysnäkymät

Teollinen rakentaminen on yhä suosittumpaa eri puolilla maailmaa. Innovatiiviset ratkaisut, kuten modulaariset järjestelmät ja esivalmistetut rakenteet, tarjoavat uusia mahdollisuuksia niin kaupallisessa kuin asuinrakentamisessakin. Näitä menetelmiä voidaan soveltaa laajasti esimerkiksi koulujen, sairaaloiden ja toimistorakennusten rakentamiseen. Yhdistämällä digitaaliset työkalut, kuten tietomallinnus (BIM), ja teollisen tuotannon prosessit voidaan saavuttaa entistä parempia tuloksia.

Rakentaminen Singaporessa

Singapore on yksi maailman tiheimmin asutuista kaupungeista, jossa rakentaminen on merkittävä osa taloutta. Vuonna 2022 rakentamisen arvo oli noin 20 miljardia euroa, ja alalla työskenteli noin 350 000 työntekijää.

Rakentaminen Singaporessa on pitkälti perinteistä ja työvoimavaltaista. Noin 80 % rakennustyömaiden työvoimasta on ulkomaalaista, ja monet heistä saavat suhteellisen alhaista palkkaa. Tämä heijastaa alan haasteita: suuri vaihtuvuus ja riippuvuus ulkomaisesta työvoimasta.

Työlupajärjestelmät asettavat lisähaasteita, sillä ulkomaisten työntekijöiden luvat ovat usein määräaikaista, mikä johtaa henkilöstön suureen vaihtuvuuteen.

Singaporen hallitus on kuitenkin ottanut merkittäviä askelia modernisoidakseen rakentamista. Esimerkiksi DfMA-menetelmien käyttöä on edistetty Buildability Legislative Frameworkin kautta. Vuonna 2022 voimaan astuneen lainsäädännön mukaan suuret hankkeet, joiden kerrosala ylittää 25 000 neliömetriä, on vaadittu toteuttamaan DfMA:n mukaisesti. Tämä tarkoittaa, että suunnittelun ja tuotannon tulee olla tiiviisti integroitua, mikä mahdollistaa resurssien tehokkaan käytön ja rakennusaikojen lyhentämisen.

Erityisen huomionarvoisia ovat esivalmistetut ja tilaelementtiratkaisut, kuten PPVC (Prefabricated Prefinished Volumetric Construction). PPVC-menetelmällä rakennuksen moduulit valmistetaan tehtaalla, mikä vähentää työmaan rakennusaikaa jopa 40 %. Tehtaalla valmistetut moduulit sisältävät valmiiksi asennetut sähkö- ja LVI-järjestelmät, mikä minimoi työmaan asennustarpeet.

Singaporen Housing Development Board (HDB) on ollut johtavassa roolissa PPVC-tekniikan hyödyntämisessä julkisen asuntorakentamisen projekteissa. HDB:n tavoitteena on parantaa rakentamisen tuottavuutta ja vastata kaupungin asuntokysyntään kestävästi. HDB:n projekteissa PPVC-moduuleja käytetään erityisesti korkeiden asuinrakennusten rakentamisessa, mikä on mahdollistanut rakennusten valmistumisen ennätysajassa.



Kuva 1 Pienoismalli Singaporen uudesta asuntoalueesta.

Innovaatiot ja kestävä kehitys

Singaporen rakennusala on myös ottanut käyttöön muita innovaatioita, kuten massiivipuun (Mass Engineered Timber, MET) ja kehittyneen esivalmistetun betonijärjestelmän (Advanced Precast Concrete System, APCS). Nämä teknologiat täydentävät PPVC-menetelmää ja tarjoavat vaihtoehtoja erilaisiin rakennustarpeisiin. Massiivipuun on ympäristöystävällinen vaihtoehto, joka vähentää hiilidioksidipäästöjä perinteisiin rakennusmateriaaleihin verrattuna.

Logistiikan haasteet ovat olleet keskeinen kysymys tiheästi asutussa Singaporessa. Moduulien valmistusaste ennen työmaalle toimitusta on keskimäärin 70 %, mikä vähentää tarvetta työmaan materiaalivarastoinnille. Moduulien kuljetuksessa käytetään erityisiä reittejä ja aikatauluja, jotta liikenteen häiriöt voidaan minimoida.



Kuva 2 Moduulitehtaan tuotantoa

Tulevaisuuden näkymät

Singapore jatkaa rakentamisen modernisointia ja pyrkii olemaan maailman johtava kaupunki esivalmistettujen ja modulaaristen rakennusmenetelmien hyödyntämisessä. Uudet teknologiat, kuten tekoäly ja digitaalinen tietomallinnus (BIM), integroituina teolliseen rakentamiseen tarjoavat merkittäviä mahdollisuuksia parantaa rakennusprosessien tehokkuutta ja laatua.

Singaporen hallituksen jatkuvat investoinnit tutkimukseen ja kehitykseen takaavat, että ala pysyy kilpailukykyisenä ja vastaa muuttuvan maailman tarpeisiin. Näiden ratkaisujen menestyksensä toteuttaminen Singaporessa tarjoaa arvokkaita oppeja, joita voidaan hyödyntää myös muualla maailmassa, mukaan lukien Suomessa.

Vierailu Stanford Industrialized Construction Forum 2024 -tapahtumassa

Helmikuussa 2024 järjestetty Stanford Industrialized Construction Forum toi yhteen alan huippuasiantuntijoita ja innovoijia ympäri maailmaa. Tapahtuma tarjosi laajan katsauksen teollisen rakentamisen nykytilaan, sen haasteisiin ja tulevaisuuden mahdollisuuksiin. Forumissa korostettiin erityisesti modulaarisen rakentamisen roolia ja standardoinnin merkitystä rakennusteollisuuden kehittämisessä.



Kuva 3 Foorumi kokosi yhteen teollisen rakentamisen asiantuntijoita ympäri maailmaa

Yksi tapahtuman keskeisistä teemoista oli, miten digitaalinen teknologia voi mullistaa rakennusprosessit. Esimerkiksi tietomallinnus (Building Information Modeling, BIM) ja tekoäly mahdollistavat entistä tarkemman suunnittelun ja rakentamisen hallinnan. Esityksissä käsiteltiin myös tapoja, joilla teollinen rakentaminen voi edistää kestävä kehitystä, esimerkiksi vähentämällä rakennusjätteen määrää ja energian kulutusta.

Tapahtumassa esiteltiin useita menestyksekkäitä projekteja eri puolilta maailmaa. Esimerkiksi Yhdysvalloista nostettiin esiin Volumetric Building Companyn saavutuksia, kuten modulaaristen asuntojen ja koulujen rakentaminen lyhyessä ajassa. Ruotsin esimerkeissä korostettiin puurakentamisen ja kiertotalouden yhdistämistä, kun taas Australian Lendlease esitteli tapoja, joilla integroidut liiketoimintamallit voivat parantaa rakennusprosessien tehokkuutta ja kannattavuutta.

Osallistujat pääsivät myös tutustumaan Stanfordin yliopiston tutkimukseen, jossa tarkastellaan rakennusprosessien automatisointia ja robotisaatiota. Näitä teknologioita pidettiin avainasemassa, kun pyritään lisäämään tuottavuutta ja vähentämään riippuvuutta inhimillisestä työvoimasta. Lisäksi keskusteltiin, miten rakennusalan sääntelyä ja standardeja voidaan kehittää tukemaan innovaatioiden käyttöönottoa.

Vierailun aikana sain myös mahdollisuuden tutustua Volumetric Building Companyn tehtaan Tracyssä, jossa näin modulaaristen rakennusosien tuotantoprosessin käytännössä. Lisäksi vierailin Goldbeckin innovaatiohubissa, joka esitteli tehokkaita ratkaisuja rakennusprosessien optimointiin ja uusien teknologioiden soveltamiseen käytännössä.

Vierailu tarjosi ainutlaatuisen mahdollisuuden verkostoitua alan johtavien toimijoiden kanssa ja oppia uusimmista trendeistä ja teknologioista. Tapahtuma ei ainoastaan tarjonnut

teoreettista tietoa, vaan myös konkreettisia esimerkkejä ja käytännön ratkaisuja, jotka voivat vaikuttaa merkittävästi rakennusalan tulevaisuuteen.

3.2 Talotekniikan esivalmistus ja toleranssien hallinta

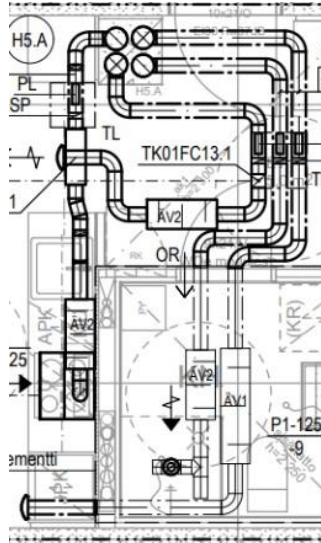
Tämä osio perustuu tutkimukseen, joka on julkaistu konferenssiartikkelissa:

O Alhava, T Valkonen, B Ruottinen, T Pitkäranta (2024). **Digitalising designing of prefabricated ventilation elements**. *Proceedings of the 41st International Conference of CIB W78, Marrakech, Morocco, 2-3 October, ISSN: 2706-6568*. (ISSN: 2706-6568), <http://itc.scix.net/paper/w78-2024-97>

Case yritys käytti runkovaiheen töihin ja sisävalmistusvaiheen töihin tahtituotantoa. Tahdin pituus oli neljä tuntia. Talotekniikkatyöt tehtiin pääosin rungon pystyttämisen jälkeen, ennen sisätehtaan käynnistymistä. Merkittävä osa talotekniikkatöistä tuotiin työmaalle valmiina kylpyhuone-elementtiin tehtaalla asennettuna. Talotekniikkatöitä haluttiin nopeuttaa ja teollistaa esivalmistamalla. Ensimmäiseksi esivalmistettavaksi osa-alueeksi valittiin ilmanvaihtoasennukset.

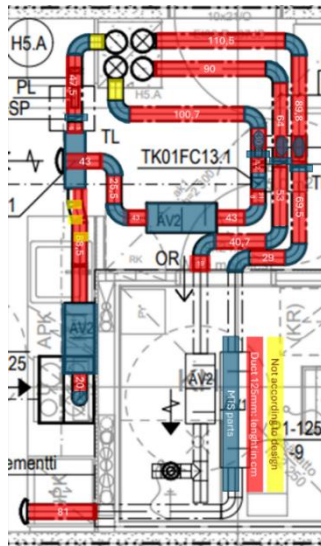
Esivalmistusta aloitettaessa tiedettiin, että perinteisillä toteutussuunnitelmilla esivalmistaminen ei olisi mahdollista. Tämä johtuu ainakin suunnitelmien matalasta tarkkuustasosta ja asennettavuusongelmista. Rakentamisen lisäksi esivalmistaminen ja suunnittelu esivalmistusta varten parantaisi koko rakentamisen prosessia. Perinteisessä rakentamisessa tietoa vaihdetaan pdf-tulosteiden avulla. Näiden tulosteiden avulla urakoitsija laskee, yleensä useaan kertaan, materiaalimenekkiä tarjouksia ja tilauksia varten. Tämän jälkeen asentaja tekee oman asennussuunnittelun ja määrittää uudestaan mitä osia asennukseen tarvitaan. Lopulta valmis asennus ei yleensä vastaa toteutussuunnitelmaa, eikä as-built tietoa tallennetta millään tavalla asennuksen tai materiaalimenekin osalta. Suunnittelu esivalmistusta varten mahdollistaisi paremman tiedonkulun ja hallinnan läpi prosessin. Yksi tarkasti laadittu suunnitelma sisältää kaiken tarvittavan materiaalin asuntokohtaisesti.

Ensimmäisenä iteraationa esivalmistusta ja esivalmistussuunnittelua kohti tehtiin työmaates-tejä perinteisten toteutussuunnitelmien perusteella. Näiden testien tarkoituksena oli määrittää suunnitelmien soveltuvuus esivalmistukseen sekä havaita pienellä panostuksella esivalmistamiseen liittyviä haasteita. Esimerkki perinteisestä toteutussuunnitelmasta ilmanvaihtoasennuksissa on esitetty Kuvassa 4.



Kuva 4. Esimerkki perinteisestä ilmanvaihdon toteutussuunnitelmasta.

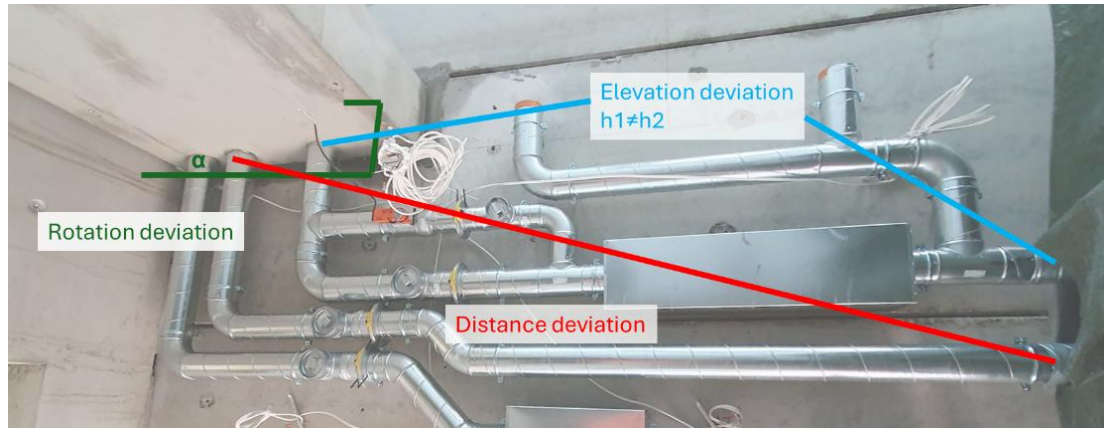
Ensimmäisessä testissä työmaalla esivalmistusta kokeiltiin asentajan kanssa yhteen asuntoon. Esivalmistussuunnitelma laadittiin LVI-suunnittelijan laatiman toteutussuunnitelman pohjalta. Suunnitelmaan määritettiin tehdasvalmisteiset osat sekä määrittämään katkottavat kanavat. Esivalmistussuunnitelma esitetty Kuvassa 5. Suunnittelun jälkeen kanavistosta kasattiin esivalmistettuja kokonaisuuksia, joita nostettiin kattoon. Asennuksessa havaittiin, että suunnitelma ei pidä kaikilta osin paikkaansa. Esivalmistetta jouduttiin muokkaamaan sen mahtumiseksi paikalleen. Muokattavat kohdat liittyivät suunnan muutoksiin liesikuvulle menevässä kanavassa sekä hormiliitoksiin.



Kuva 5. Perinteinen ilmanvaihdon toteutussuunnitelma muutettu esivalmistussuunnitelmaksi työmaalla. Punaiset ovat määrittämään katkaistavia kanavia. Siniset ovat tehdasvalmisteisia osia. Keltaiset osoittavat poikkeamia, joissa esivalmistetta piti muokata.

Asennustestissä havaittiin suunnittelu päätarkkuuden lisäksi muitakin vaihtelun lähteitä. Eri-tyisesti tunnistettiin kolme vaihtelumekanismia, jotka liittyivät betonielementtien valmistus-

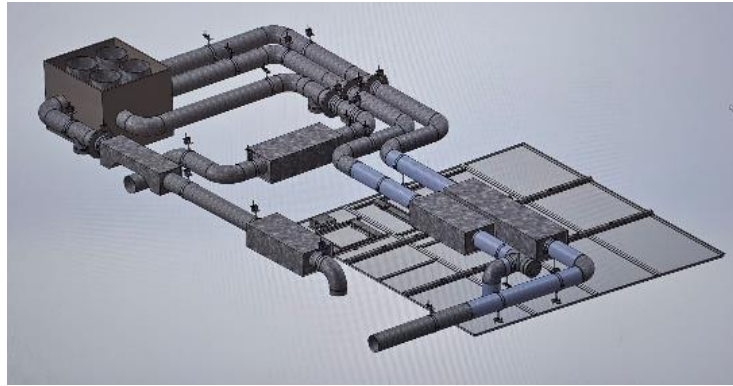
ja asennustarkkuuteen sekä kylpyhuone-elementin valmistus- ja asennustarkkuuteen. Nämä vaihtelumekanismit olivat korkopoikkeama, etäisyyspoikkeama, ja kiertopoikkeama. Korkopoikkeama on korkeusero hormilähdön ja kylpyhuone-elementin lähdön välillä. Etäisyyspoikkeama on suunnitelmista poikkeava etäisyys näiden kahden lähdön välillä. Kiertopoikkeama on Elpo-hormin asennustarkkuudesta johtuva hormin kiertyminen pysty akselinsa ympäri. Poikkeamatyypit on havainnollistettu Kuvassa 6.



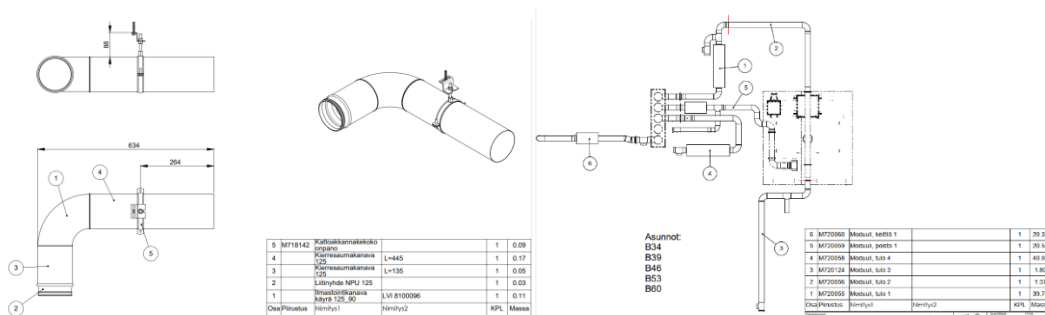
Kuva 6. Esivalmistustesteissä havaitut vaihtelun aiheuttajat. Elpo-hormin kiertopoikkeama, korkopoikkeama, ja etäisyyspoikkeama.

Ensimmäisten testi vahvisti ennakko-odotukset suunnittelun tarkkuustason puutteista sekä paljasti lisää esivalmistukseen vaikuttavia vaihtelun lähteitä. Näistä tekijöistä huolimatta ilmanvaihdon esivalmistaminen nähtiin mahdolliseksi. Seuraavassa vaiheessa suunnittelu vietiin tarkemmalle tasolle.

Suunnittelua aloitettaessa vertailtiin mallinnusohjelmia. Vertailun tuloksena havaittiin, että perinteiset rakentamisen suunnitteluohjelmistot eivät sovellu hyvin esivalmistussuunnitteluun. Ohjelmistoksi valittiin konesuunnitteluun soveltuva SolidWorks. Mallintamisen aloittamiseksi mekaniikkasuunnittelijan piti ensin luoda itse mallintamalla osakirjasto. Talotekniikkakomponenteista ei ole olemassa kattavaa ja tarkkaa osakirjastoa, joka mahdollistaisi tarkan suunnittelun. Vaikka osakirjastoja on joillain valmistajilla, niiden mittatarkkuudessa suhteessa todellisiin osiin on vaihtelua. Kirjastojen luomisen jälkeen suunniteltiin asuntokohtaiset asennukset LVI-suunnittelijan suunnitelman perusteella. Yhtä suunnitelmaa voidaan käyttää kaikissa samanlaisissa asunnoissa, eikä kaikkia asuntoja siis tarvitse erikseen mallintaa. Kuvissa 7-9 on esitetty otteita suunnittelusta ja sen tuloksista.

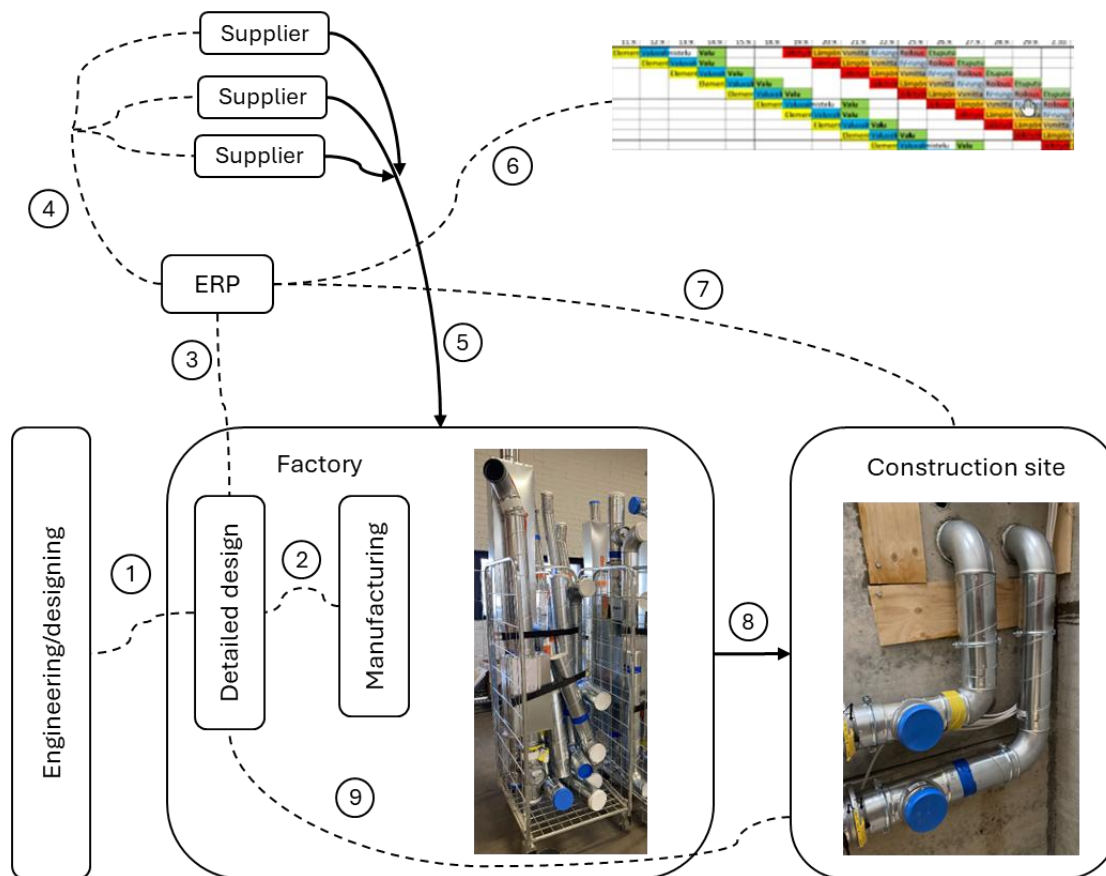


Kuva 7. Solidworks ohjelmistolla laadittu esivalmistussuunnitelma.



Kuvat 8 ja 9. Solidworks ohjelmasta luodut tulosteet valmistusta ja asennusta varten. Kuvassa vasemmalla osakokonaisuus ja tarkka massaluettelo. Kuvassa oikealla asennuskokonaisuus jonka osa vasemman puoleinen kuva on.

Suunnittelun jälkeen esivalmisteet rakennettiin tehtaalla yhden asentajan toimesta. Tämän jälkeen valmiit esivalmisteet kuljetettiin tahtiaikataulun perusteella työmaalle. Esivalmisteet oli pakattu asuntokohtaisiin kokonaisuuksiin rullakoihin. Tarkka suunnittelu ja sen tuloksena saadut materiaalierittelyt mahdollistavat tarkan valmistamisen ja asentamisen lisäksi koko prosessin teollistamisen. Ehdotus suunnittelun digitalisoimiseksi ja talotekniikkarakentamisen teollistamiseksi on esitetty Kuvassa 10. Kuvan mallissa urakoitsija tekee valmistuskuvat insinöörin tekemän suunnitelman perusteella. Tätä tarkkaa suunnittelutietoa voidaan sitten käyttää läpi rakentamisen prosessin ilman että tietoa välillä hävitetään ja luodaan uudestaan.



Kuva 10. Ehdotettu prosessi suunnittelun digitalisoimiseksi. 1. LVI-suunnittelijan järjestelmäsuunnitelma toimitetaan urakoitsijalle pdf-tiedostona tai tietomallina (esimerkki Kuva x). 2. Detaljoijan tekemä valmistuskuva toimitetaan isometrisenä kuvana massaluettelon kanssa (M-BOM) valmistukseen. 3. M-BOM detaljisuunnittelusta rakenteisena tietona toiminnanohjausjärjestelmään. Esim työpakettikohtaiset massaluettelot ostonimikkeinä. 4. Toimittajilta tehdään tilaukset työpakettikohtaisten massalistojen ja tahtiaikataulun mukaisesti. 5. Materiaalivirta toimittajilta tehtaalle. 6. Aikataulutieto toiminnanohjausjärjestelmään hankintoja ja logistiikkaa varten. 7. Työmaalta raportoitu edistyminen suhteessa aikatauluun. 8. Esivalmisteet tehtaalta työmaalle. 9. Asennusohjeet työmaalle. Takaisinkytkentä suunnitteluun asennusongelmien ratkaisemiseksi systemaattisesti käyttäen juurisyyanalyysiä.

3.3 Betonielementtien toleranssien kustannukset

Tässä osiossa käsitellään Alexander Spirinin (2024) diplomityötä betonielementtien toleranssien kustannuksista asuinkerrostalohankkeessa:

A Spirin (2024). *The cost and management of tolerance problems in precast concrete structures*. Aalto-yliopisto. <https://aaltodoc.aalto.fi/items/52800b31-adaf-45ef-897e-97a8424e38fb>

Tavoitteena oli todellisen kohteen lähtötietoihin pohjautuen laskea mikä on nykyisen betonielementtirakentamisen toleranssien seurausten suuruusluokka kustannusten osalta. Tarkasteltavana kohteena oli pääkaupunkiseudulle rakennettu betonielementtikerrostalo, jonka asuinpinta-ala oli 3009 m², asuntoja oli 45 kpl ja arvioitu kokonaismyyntihinta 13 399 679 €.

Kohteesta oli käytössä tietomalli, jonka pohjalta laskettiin ensin määrät erilaisille esivalmistetuille sisä- ja ulkoseinäelementeille sekä ontelolaatoille.

Suorien kustannusten laskennan pohjana oli oletus, että elementtien valmistustoleranssien vaatimukset täyttyvät siten, että poikkeama elementtien kaarevuudessa on keskimäärin puolet sallitusta arvosta. Tämän jälkeen oletettiin, että poikkeama poistetaan oikaisu- ja tasoitustöillä. Tämän tiedon perusteella voitiin laskea seinäelementtien oikaisuun vaadittava materiaali- ja työmäärä Ratu-menekkien mukaisesti sekä lopulta näiden kustannus hyödyntäen mm. rakennusalan työehtosopimuksia. Samoin laskettiin lattiavalussa tarvittava lisätyön kustannus johon tuen ontelolaattojen mittapoikkeamasta. Lisäksi arvioitiin sähkörsioiden paikkojen ja ikkuna-aukkojen korjauksiin sisältyvä materiaali- ja työmäärä. Korjausten esiintyvyyttä selvitettiin haastattelemalla työnjohtoa.

Tapauskohteen elementtien toleransseista aiheutuneet suorat kustannukset on esitetty Taulukossa 1. Toleranssien suorat kustannukset olivat noin 172 k€ eli 1,3 % koko hankkeen arvosta. Eniten kustannusta syntyy sisäseinien oikaisutöistä ja ylimääräisestä lattiatasoituksesta. Tyyppilliseen pääurakoitsijan liikevoittoon suhteutettuna kokonaiskustannus voi olla jopa noin 40% liikevoitosta. Lisäksi toleransseista aiheutuu myös epäsuoria kustannuksia mm. keittiöiden suunnittelun mittakäyntejä ja rungon toleranssit usein estävät esivalmistettujen kevyiden väliseinien hyödyntämisen.

Taulukko 1. Betonielementtien toleransseista aiheutuneet kustannukset case-kohteessa.

Suorat kustannukset	
Ulkoseinien oikaisutyöt	36685 €
Sisäseinien oikaisutyöt	79107 €
Ylimääräinen lattiatasoitus	47585 €
Sähkörsioiden paikkojen korjaus	7127 €
Ikkuna-aukkojen korjaus	1311 €
Suorat kustannukset yhteensä	171814 €

Kustannuslaskelma on suuntaa antava, mutta silti laskennallinen. Varsinkin seinien oikaisua ei yleensä tehdä laskelman mukaisella laajuudella vaan ainoastaan poistamaan selvät epätasaisuudet. Toisaalta epäsuorien kustannusten arviointia ei tässä varsinaisesti tehty ja niiden suuruus voi olla yllättävän suuri, jos mittaepätarkat elementit estävät esim. muiden rakennusosien esivalmistuksen ja -asennuksen.

Vaikka laskelma pitäisikin isoilta osin paikkaansa, ei toleranssien aiheuttamien kustannusten pienentäminen ole silti yksinkertaista. Toleranssivaatimusta tuskin voidaan asettaa niin

tiukaksi, että lisätöistä kokonaan voitaisiin luopua. Tiukemmat toleranssit valmistuksessa nostavat myös elementtien valmistuksen kustannuksia. Joka tapauksessa työ tuotti ensimmäisen laskelman nykyisten toleranssikäytäntöjen kustannusvaikutuksesta ja jatkotutkimus esim. kohteista kerätyllä yksityiskohtaisemmalla tiedolla voisi tarkentaa kokonaiskuvaa.

4 Kiertotalous: Enabling Circular Construction Through Supply Chains and Business Models

Robert van den Brink ^{1,2}

¹ VTT Technical Research Centre of Finland, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland; ² Aalto University, Depts. of Civil Engineering & Architecture, P.O. Box 11000, FI-00076 AALTO, Finland

4.1 Introduction

The Real Estate and Construction Industry (REC) is one of the sectors with the largest environmental footprints (UNEP, 2009 & 2017) and is hampered by low productivity growth (Bellocchi & Travaglini, 2023). Therefore, it would be beneficial to identify new solutions that both mitigate the negative environmental effects and increase the productivity of the sector. One concept that combines the promise of economic growth and mitigation of negative environmental impacts is the Circular Economy (CE). CE presents a techno-economic model for production that is cyclic, restorative, and regenerative by design (Kivikytö-Reponen, 2022). However, CE is currently not a business as usual approach in the REC (Çetin et al., 2021; Nußholz et al., 2023). Previous research has highlighted the lack of a functioning supply chain as one of the reasons for the lack of CE adoption in the REC (Azcárate-Aguerre, 2023). Therefore, this report utilizes case-studies to investigate current CE supply chain practices, and to link those findings to the overall CE concept and the circular business maturity of its stakeholders.

In the REC, recirculating building materials and components from donor buildings to recipient buildings is at core of applying CE. Recirculation can take place through several strategies that are described by the R9 framework (Potting et al., 2017). Although earlier research has identified numerous buildings in the REC where a CE strategy has been applied (Nußholz et al., 2023), only a handful of buildings have been identified where building materials and components have recirculated from a donor building to a functional recipient building (Järvelä & Lehto, 2024). Instead of functional recipients buildings, most recipient buildings currently are pilot projects (Järvelä & Lehto, 2024). Even though pilot projects provide new insights, they may not accurately reflect current industrial CE practices, which is the scope of this research.

Previous research has provided a glimpse into the changes to the building design process when applying CE (Gorgolewski, 2008; Kozminska, 2019) but the consequences for the supply chain as a whole have not been studied granularly and holistically (Azcárate-Aguerre, 2023; Huuhka et al., 2023). Nonetheless, earlier works do provide some initial puzzle pieces for Circular Construction Supply Chains (CCSC). Based on descriptions by Jayasinghe et al. (2018), Rakhshan et al. (2020), Huuhka et al. (2023), and Riuttala et al. (2024) a general visual description of a CCSC is compiled and depicted in Figure 1. On the top (in orange) is the construction supply

chain of the donor building. Currently at the end-of-life of the donor building, there is a connection between the construction supply chain and the demolition supply chain. However, in a CCSC the donor building construction supply chain will instead feed into a redistribution supply chain. The redistribution supply chain contains several steps from component identification to the dismantling of donor materials and components. After that, the dismantling supply chain connects with the redistribution supply chain, which includes steps like transportation from the donor site, temporary storage, as well as quality assessments. Depending on the chosen CE strategy, the redistribution supply chain will either connect directly to the recipient building's construction supply chain or to the remanufacturing supply chain. In the latter case, the remanufacturing supply chain covers the steps necessary to reprocess the donor materials and components to make them fit for application in the recipient building. The remanufacturing supply chain eventually connects with the recipient building's construction supply chain.

This report utilizes the template shown in Figure 11 as a means to visualize the CCSCs of the case-studies. This will allow for a comparison between the case studies and connect the findings to the CE concept and its strategies, as well as provide insights into stakeholder roles and their circular business maturity.

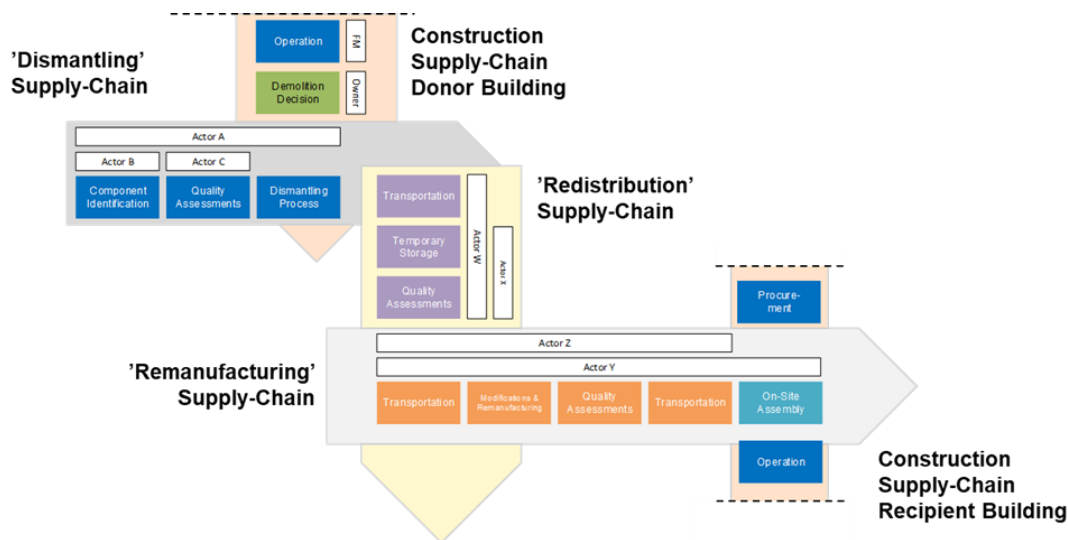


Figure 11: Visual description of a hypothetical CCSC.

4.2 Research methods

This research focuses on an in-depth analysis of two case-studies. The case-studies were selected from five case-studies that fit the scope of this research: The journey along the supply chain from donor building to recipient building, the included stakeholders, and demand drivers (see Figure 12). These two particular case-studies were chosen for their distinct approach, in order to investigate different means of organizing CCSCs. The in-depth analysis was carried out through a desk-research method, utilizing publicly available information.

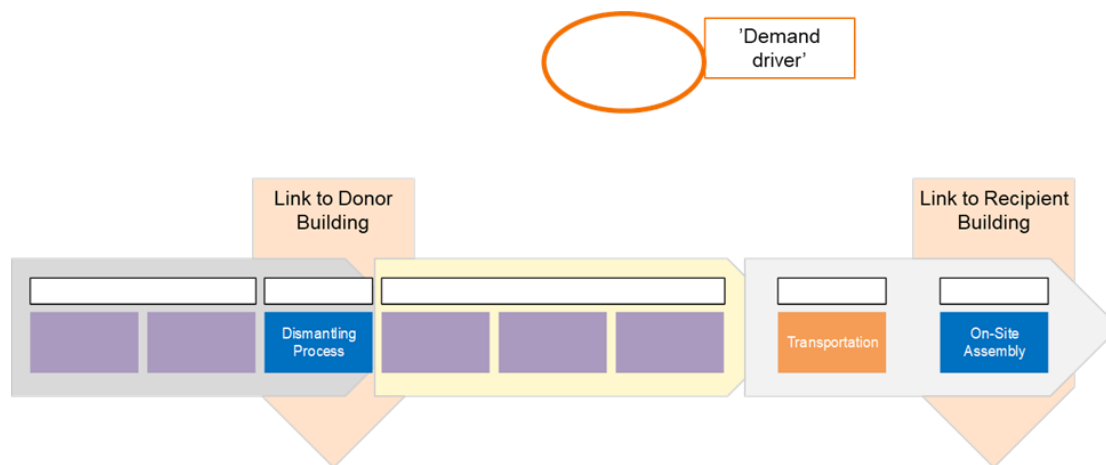


Figure 12: Visual description of the scope of this report.

4.3 Findings

The two case-studies under investigation in this report are Kristian August Gate 13 in Oslo, Norway and K.118 in Wintherthur, Switzerland. Table 2 shows the general characteristics of both case-studies.

Table 2: General characteristics of the case study projects

	K118	Kristian August Gate 13
Location	Wintherthur, Switzerland	Oslo, Norway
Project type	Redevelopment + Extension	Redevelopment + Extension
Year of construction	2017-2021	2018-2021
Size (m2)	1,100	4,297
Amount of secondary materials (%) ^[1]	70	80

Kristian August Gate 13

Kristian August Gate 13 is a redevelopment project in Oslo that was completed in 2021. The aim of the project was to maximize the reuse of components in the redevelopment of the property (Entra, 2021). This resulted in sourcing materials from 25 different buildings as well as the use of surplus ‘new-old-stock’ from several manufacturers (Entra, 2021). The main demand driver in the project was the client, who also took on the legal responsibility for the correct use of all of the secondary materials (Entra, 2021). The main design of the building was finished before the search secondary materials began (Järvelä & Lehto, 2024).

An analysis of a case report (Entra, 2021) reveals that 47 out of 64 recirculated elements applied the reuse strategy, making that the predominant circular strategy of this project. Furthermore, it takes an average of 7.8 handling steps for materials and components to move from donor to recipient building, with a mean of 9 steps. In general smaller and ‘new-old-stock’ components

have the shortest route from donor building or factory to the recipient building, with the shortest route consisting of 3 steps. Structural elements have the longest route from donor to recipient building with an average of 11.1 steps. Figure 13 shows a typical supply chain that can be found for this case study. On average around three different stakeholders are involved in each secondary material and component supply chain, with a maximum of 9 different stakeholders.

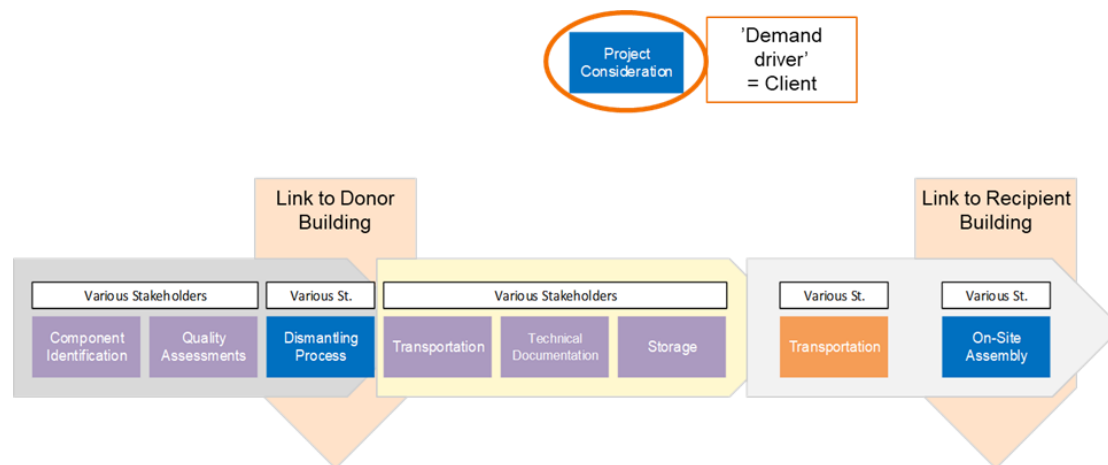


Figure 13: Typical CCSC for the Kristian August Gate 13 case study.

The fact that the main design of the building was ready before sourcing secondary materials and components occasionally led to complicated decision-making processes (Entra, 2021). Figure 14 shows the decision-making process to include secondary windows in the recipient building. In this case, procurement started with a search for windows after the design had been completed (1). After identifying suitable candidates at the material broker's storage facility (2), it appeared that the found windows were smaller and had a lower insulation value than what the design prescribed. This necessitated a new façade concept from the architect, as well as new thermal calculations by the building physics consultant, both of which needed preliminary client approval (3). After initial approval, the architect created revised facades and floorplans, the structural engineer revised the pillar structure and their calculations, after which the physical building consultant generated a new insulation specification (4). Then new cost calculations were made by the contractor and approved by the client. The new documents were also sent to the local authorities for approval (5). After approval was given by the local authorities, the changes were included in the final design of the building and the windows were purchased from the broker (6). The broker transported the windows to the site (7) and the contractor executed the on-site assembly (8). Ultimately, this procedure required 12 supply chain steps to execute.

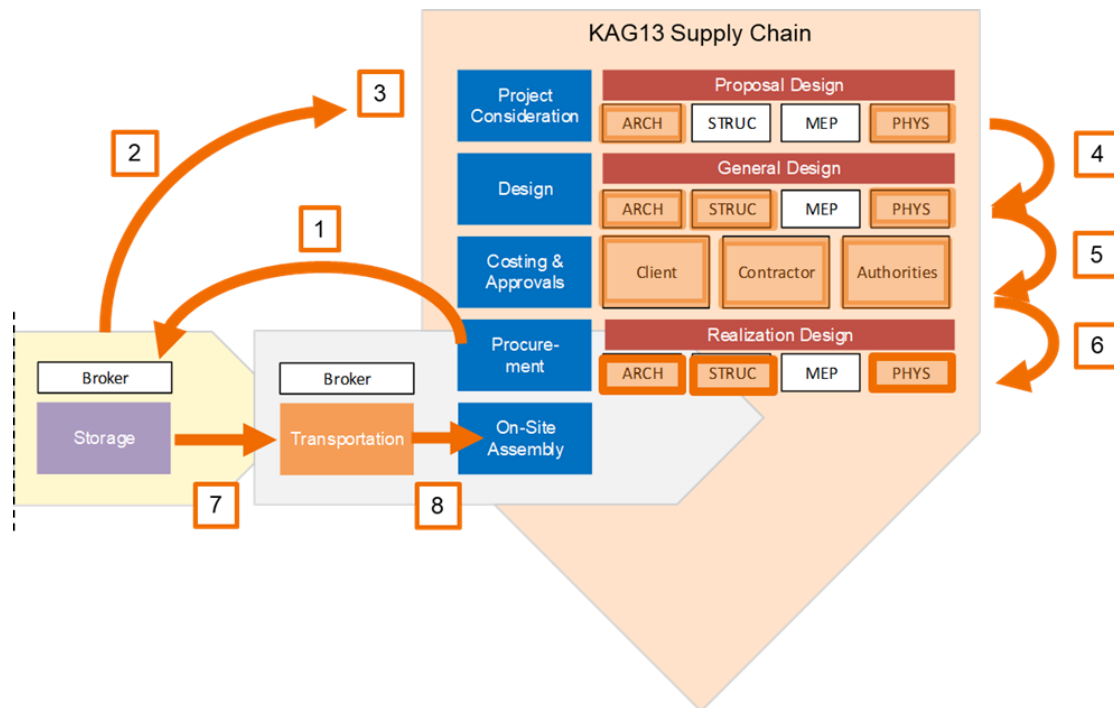


Figure 14: The process to procure secondary windows for Kristian August Gate 13. The numbers refer to the numbers in brackets in the text.

The case-report (Entra, 2021) states that the project stakeholders had little to no prior experience in circular building projects. What can be observed from the different supply chains is that sourcing secondary materials and components is done by a variety of actors. In certain cases the architect sourced materials and components, whereas in other cases the general contractor or one of the specialist- or subcontractors found secondary materials or components. Out of all the stakeholders, the material broker seems to be the only one that includes circular business solutions in their regular service portfolio.

K.118

K.118 is a redevelopment project in Wintherthur, Switzerland that was completed in 2021 (Stricker et al., 2022). The existing building has been expanded by a three-floor volume that was placed on top of the original building. The extension has been realized completely with secondary materials and components. The materials and components were sourced from different buildings in Switzerland (Stricker et al., 2022). Part of the construction office's material and component stock was also utilized for this project. The main demand driver in the project was the client. However, the client hired a construction office that is specialized in circular solutions for the realization of the building. In that regard, part of the demand for secondary components and materials also originated from the construction office (Stricker et al., 2022). The main design of the building was done in parallel with search for secondary components and materials.

The main enabler for concurrent design and material sourcing is that the construction office has all the needed competences in-house. As a stakeholder, the construction office combines traditional architectural tasks with development, construction, and material sourcing competences (Bolboli, 2024). Figure 15 shows a typical supply chain for this project, where the construction office executes all of the different tasks in the supply chain. As a result of concurrent design and sourcing, the design, costing- and approvals, and procurement steps in the recipient building supply chain are synchronous. I.e., the construction office has both vertically and horizontally integrated multiple steps of the supply chain.

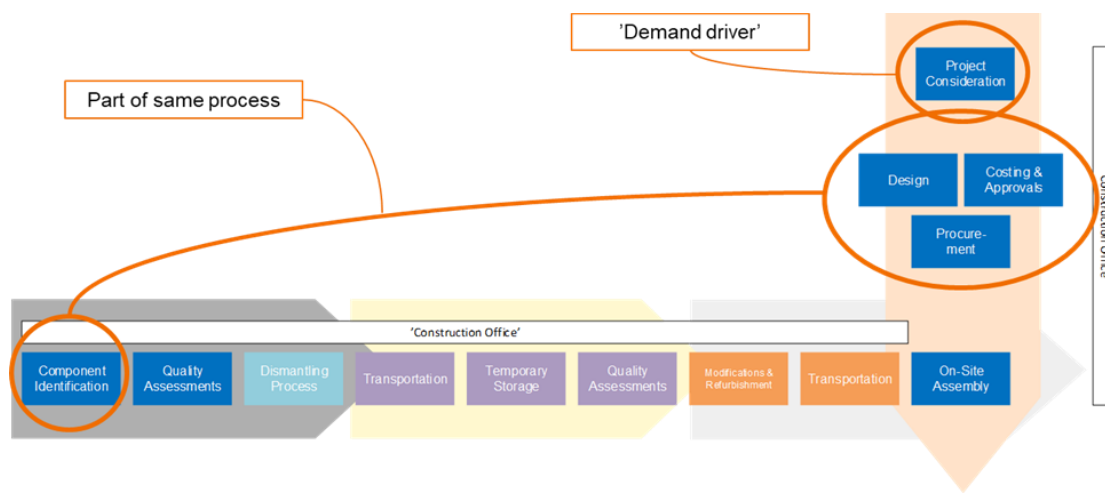


Figure 15: Typical CCSC for the K.118 case study

4.4 Discussion

The two examined cases show a different approach to CCSCs. Although the Swiss case shows a similar supply chain built-up as the Norwegian case, the fact that it is completely realized by one stakeholder instead of a combination of stakeholders clearly differentiates. Even if the single stakeholder model may enable concurrent design and material sourcing, the question remains how representative the case is for the REC as a whole. Current construction supply chains are typified by their fragmented nature (O'Brien et al., 2008), and other examples where competences are bundled by a singular stakeholder — Either within or outside of a circular context — can currently not be identified. Still, it provides a view on what might be necessary to enable concurrent design and material sourcing.

The Norwegian case shows the consequences of commencing the material search after the main design has already been completed. On one hand, the example with the outer windows highlights the potential for design and engineering difficulties that were identified earlier by Gorgolewski (2008) and Kozminska (2019) amongst others. On the other hand, both the lengths of the CCSCs as well as the amount of stakeholders involved do not differ substantially compared to linear construction supply chains. Therefore, if the design and engineering process does not

lead to complications, the circular supply chains themselves may not necessarily exhibit an increased level of complexity. Instead, the difficulty of CCSCs could be the combination of different stakeholders that have to engage in activities that are not part of those stakeholders' normal business operations.

An explaining factor for the added complexity could be that the products offered in CCSCs differ substantially from the products offered in linear construction supply chains. For both linear and circular supply chains, the demand driver of the supply chain originates from the recipient building's design. In linear construction supply chains, this demand usually translates into a demand for Engineer-to-Order (ETO) products, especially for more complicated components (Matt et al., 2014). Circular Construction Supply Chains, however, seem to introduce a new product type: Engineer-to-Stock (ETS). ETS products appear to have some differentiating aspects compared to existing supply chain types introduced in earlier research (e.g., by Harfeldt-Berg & Olhager (2024)). For example, contrary to ETO products, some stock of ETS products is held, either in a donor building or by a material broker. However, contrary to current Make-to-Stock products, the recipient building needs to be engineered according to the secondary components' specifications instead of the other way around. The introduction of a new supply chain and product type might explain the difficulties of current stakeholders and supply chains to adapt to circular supply chains, even when these are not necessarily more complex than current supply chains.

Business maturity in the Swiss case is high for the identified construction office in question, however given the absence of comparable firms, the maturity of the industry as a whole seems to be lower. In the Norwegian case, business maturity seems to be lower in general. In fact, only the material broker in the Norwegian case provided circular services as part of their offering portfolio. Examples of this type of stakeholder can currently be found in multiple European countries. Based on the case-study in this report, several points of attention can be found for circular material broker operations in the REC (see Figure 6). All of the three points of attention are to some degree related to uncertainty of demand and supply for secondary materials and components, which for a great deal can not be directly influenced by the broker itself. For the broker to be able to sell secondary materials and components, they need to be included in recipient building designs. At which point the broker will encounter the Engineer-to-Stock issues that were described above.

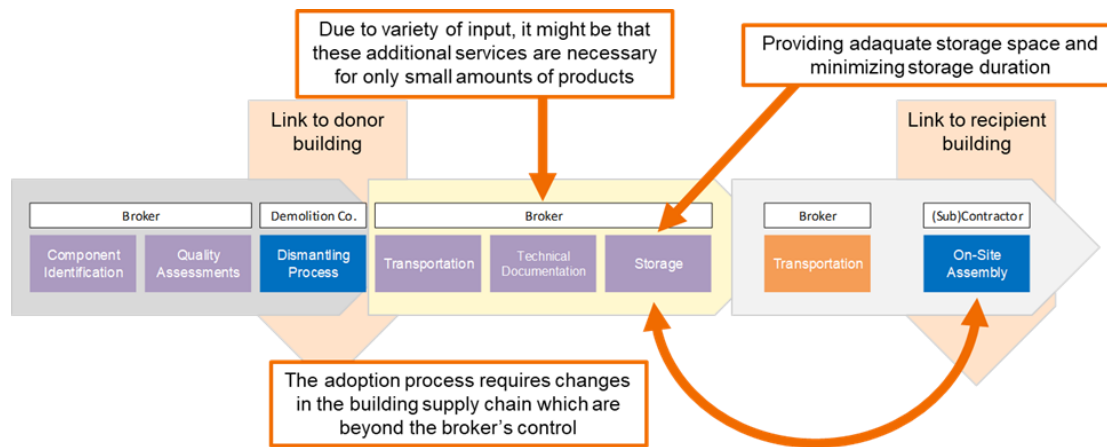


Figure 16: Points of attention for the circular material broker's operational model.

4.5 Concluding remarks

This report utilized desk-research of case-studies to investigate current CE supply chain practices, and to link those findings to the overall CE concept and the circular business maturity of its stakeholders. Based on the very limited sample that was used for this report, there are some initial indications that CCSCs are not necessarily more complex than linear construction supply chains. Instead, it might be that the complexity of CCSCs originates from the introduction of Engineer-to-Stock products that require current stakeholders to rethink their current operations and services. The researched case-studies provide two very different approaches in dealing with ETS products. One case-study includes a specialized actor that has vertically and horizontally integrated parts of the supply chain, the other case-study utilizes material brokers. The latter stakeholder may have to navigate considerable uncertainty in its business operations. Apart from those two actors, other case-study stakeholders only had none to little previous experience in circular practices, signaling low circular business maturity.

Further research should focus on strengthening the preliminary findings of this report by gathering more evidence. The link between supply chain theory and circular construction processes should also be investigated more thoroughly. Furthermore, there is a need for quantitative research to enable assessments of CCSCs, their effectiveness and impact.

[\[1\]](#) See Bolboli (2024)

5 Toimitusketjun digitalisointi ja tiedon virtaus

5.1 Tarve ja tavoitteet

Tämän tutkimusjakson tavoitteena oli lisätä ymmärrystä siitä, miten suunnittelu- ja tuotetiedon digitalisoinnin edellyttämä tietomallien tietosisältöjen vakiointi ja kohdistaminen tuotetietoon voidaan toteuttaa rakennusalan vakiotuotteiden (Make-to-Stock, MTS) ja projektituotteiden (Engineer-to-Order, ETO) osalta. Erityisesti MTS-tutkimuksessa selvitettiin, miten vakioitu suunnittelutieto saadaan muodostettua ja rikastettua hankintatiedoksi (kts. luku 5.3.2).

Tutkimuksen fokusalueena on ollut vuonna 2025 rakennusalan digitalisaatio 1.0:n dataperusta, joka muodostuu tiekartan (Arola & Alhava, 2024; Ruottinen & Alhava, 2025) mukaan rakennuksen suunnittelu- ja hankintatiedon yhdistämisestä digitaalisesti. Dataperustaa tutkittiin erityisesti talotekniikan MTS-tuotteiden osalta, koska Rava3PRO:ssa julkaistu tietomallien objektien vakioitu suunnittelunimikkeistö (RAVA3Pro, 2023) on mahdollistanut automatisaation tiedon rikastamisessa. Vakioitun suunnittelunimikkeistön käyttö BIM:issä on tuottamassa läpimurron BIM:n kytkemisessä ERP-järjestelmään. Koneellinen käsittely mahdollistetaan käyttäen suunnittelunimikkeistön avulla luotua E-BOM:ia (Alhava ym., 2024B).

Toimitusketjujen tutkimus kytkeytyi Görschin väitöstutkimukseen (2024), joka osoittaa, että työn virtaus rakennushankkeissa on pirstaleista ja häiriöherkkää, mikä tekee projektin arjesta tehottoman, koska työn sujuvuus katkeilee. Tämä aiheutuu merkittävin osin siitä, että suunnittelu- ja prosessitieto ei kulje oikea-aikaisesti eri osapuolille eikä ole koneymmärrettävässä muodossa, koska tiedonkäsittely on tiedostopohjaista (Alhava ym., 2025B). Tällä hetkellä tiedon virta usein katkeaa, koska tieto ei ole harmonisoitua, standardoitua eikä läpinäkyvästi jaettavissa yli rajapintojen, vaan erilaiset tiedonsiirron epäjatkuvuuskohdat pirstovat tuotannon tarvittavan suunnittelu-, tuote- ja prosessitiedon (Alhava ym., 2025C).

Suunnittelu- ja tuotetiedon harmonisointi sekä toimitusketjun digitalisointi edellyttää yhteisesti sovittujen standardien ja tietosisältöjen käyttöönottoa ja käyttöä, joiden avulla tieto välittyy sujuvasti toimijalta toiselle. Valmistavassa teollisuudessa tuotetiedon standardeja hyödynnetään tuotetiedon hallinnan lisäksi myös tiedonsiirron toteutuksessa organisaatioiden ja yritysten välillä, kuten GS1-tiedonsiirtostandardit (Kolinska ym., 2022). Tämän lisäksi tiedon vartahttamiseksi voidaan hyödyntää suunnitelmien tietosisältöjen vakiointia ja koodistoja, rakenteisia tuoteluetteloita BIM:stä, tuoteyksilöintiä sekä tuotetietojen koneluentaa ja tiedonsiirtoa sähköisesti, kuten digitaalisia hankintasanomia (esim. PEPPOL) (Alhava ym., 2025B). Tutkimuksessa tiedon harmonisointi on pyritty ottamaan huomioon selvittämällä, miten valmistavan teollisuuden suunnittelu- ja valmistusprosessin kokonaisarkkitehtuuri on toteutettu. Nykyinen rakennusalan kehitysvaihe vertautuu valmistavan teollisuuden 1960- ja 1970-luvun

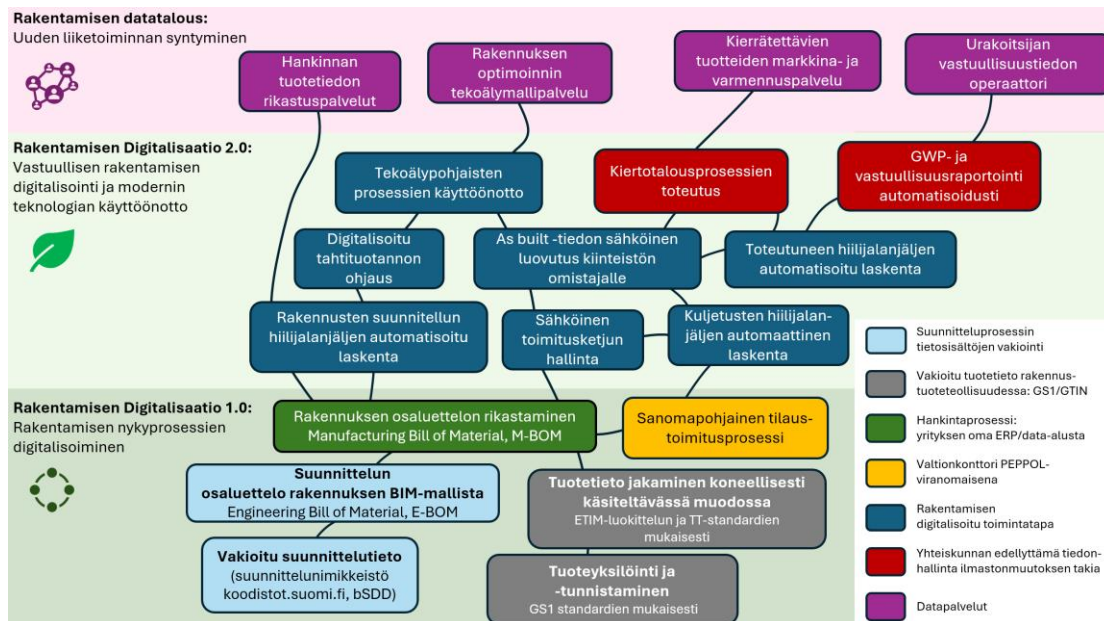
toimintamalleihin, joissa toiminta pohjautuu pääasiassa 2D- tai 3D-CAD järjestelmiin (Cohen ym., 2019). Olemme digitalisaation risteyskohdassa, jossa nämä suunnittelun 2D- ja 3D-CAD järjestelmät tulee yhdistää rakennusliikkeiden ERP-järjestelmiin. Voimme ottaa nopeasti kehitysloikkia soveltamalla valmistavan teollisuuden kehittämää tuotantoteoriaa (kuten Ugarte ym., 2009; Lee ym., 2011) ottaen käyttöön rakennusosalalle sopivimmat ja tehokkaimmat toiminnotmallit. Seuraavassa tutkimusvaiheessa tuleekin tarkastella valmistavan teollisuuden digitalisaation vaihteita ja muodostaa siitä referenssimalli rakennusosalalle.

5.2 Digitalisaation tiekartta rakennusosalalla

Rakennusalan digitalisaation suuntaviivoja on koottu alan yhteiseen **kehitystiekarttaan** (kuva 17), joka pyrkii hahmottamaan alassa tapahtuvan systeemisen muutoksen digitalisaation edetessä (Arola & Alhava, 2024). Tiekartta esittää koko rakentamisen toimialaa koskevan viitekehityksen, joka jäsentää digitalisaation edellyttäviä toimenpiteitä, digitalisaation mahdollistamia kehitysaskelia ja niiden keskinäisiä riippuvuuksia. Tiekartta on julkaistu kaksitasoisena vuonna 2024 (Arola & Alhava, 2024), mutta digitalisaation edetessä ja rakennusalan AI Champion projektin tultua valituksi TEM:n Datatalouden kasvuohjelman pilottiin (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2025), päivitettiin tutkimuksessa tiekarttaan myös kuvassa 17 esitetty kolmas taso (Ruottinen & Alhava, 2025).

Digitalisaatio mahdollistaa datatalouden syntymisen, jossa datan rikastaminen arvoketjussa luo uutta lisäarvoa toimitusketjun osapuolille ja mahdollistaa uusien liiketoimintamallien syntymisen perinteisten rinnalle. Tällaisia dataperustaisia arvonluontimahdollisuuksia ovat mm. uusien datatuotteiden syntyminen, kuten esim. BIM:stä saatavan E-BOM:n rikastaminen M-BOM:ksi käytettäväksi ERP-järjestelmissä (Torro ja Sormunen, 2025) tai rakennuksen kierrätysmateriaalin tasearvon koneellinen muodostaminen.

Tiekartasta on alalla tehty eri versioita eri toimitusketjutyyppeihin liittyen, kuten betonielementtitoimitusketjun digitalisointityöryhmän, eli BETK:n, käyttämä ETO-tuotteiden kuvaus (Alhava ym., 2024A) tai Sitran järjestämässä työpajassa (Sitra, 2025) esitetty tiekartta, jossa kuvataan MTO-toimitusketjuja ikkunavalmistuksessa. Yhteistä tiekarttoille on sen rakenne, jossa digitalisaation 1.0-vaihe kuvaa, miten kyseisessä toimitusketjussa vakioidaan tietomallien tietosisältöä siten, että IFC-formaatissa olevasta tietomallista saadaan valmistusta tai valmiita tuotteita koskeva E-BOM suunnittelutieto rakenteisessa muodossa tietokantoihin tai data-alustalle rikastettavaksi M-BOM:ksi. Tiekartan 1.0-vaiheen vasen haara (kuvassa 17 vaalean sininen) kuvaa E-BOM-tietoa ja sen vakiointia. Vastaavasti oikea haara (kuvassa 17 harmaa) kuvaa M-BOM:n tuotetietoa, joka yhdessä E-BOM:n kanssa muodostavat kyseisen tuoteryhmän, järjestelmän tai rakennusosan dataperustan.



Kuva 17. Rakennusalan digitalisaation tiekartta, jossa on kuvattu dataperustan muodostaminen (digitalisaatio 1.0) sekä dataperustan avulla aikaansaatu vastuullisuustiedon konekäsitteilyn kyvykyys (digitalisaatio 2.0) (Arola & Alhava, 2024) ja näiden avulla muodostettu rakennusalan datatalous (digitalisaatio 3.0) (Ruottinen & Alhava, 2025).

Tiekartta jäsenyytensä seitsemään toisiinsa linkittyvään prosessialueeseen, jotka yhdessä muodostavat tiedon virtaamisen perustan rakennusalan toimitusketjuille. Prosessialueet on eroteltu kuvassa laatikoiden eri väreillä. Ensimmäinen näistä on **suunnittelun tietosisältöjen vakiointi** (kuvassa 17 vaalean sininen), jossa yhtenäiset sanastot, tietomallit ja luokitukset (kuten bSDD ja koodistot.suomi.fi) mahdollistavat suunnittelutiedon semanttisen yhteentoimivuuden. Toinen prosessialue on **vakioitu tuotetiedon hallinta** (harmaa), jossa korostuvat tuotetiedon rakenteistaminen ja sen jakaminen koneellisesti luettavassa muodossa (esimerkiksi ETIM-luokittelun ja kansallisen TT-standardin mukaisesti). Samalla GS1-standardien mukainen tuoteyksilöinti ja -tunnistaminen mahdollistavat fyysisten tuotteiden ja digitaalisen tiedon yhdistämisen.

Kolmantena prosessialueena on **hankinta** (vihreä), jossa suunnittelu- ja tuotetieto rikastetaan yrityksen tietojärjestelmissä tuotevalmistuksen ja -hankinnan tarpeita vastaavaksi kokonaisuudeksi. Rikastuksessa suunnittelutiedosta muodostetaan tuotetietotasoista tietoa. Toisin sanoen tuotetieto (M-BOM) muodostetaan suunnittelutiedosta (E-BOM) linkittämällä vakioituilla suunnittelunimikkeillä yksilöityihin, suunnitteluihin objekteihin tuotteiden ostonimiketiedot. Digitalisaation edellytyksenä on, että E-BOM-tieto on konekäsiteltävissä M-BOM-tiedoksi. Käytännössä tämä tarkoittaa BIM:n tietosisältöjen automaattisen rikastamisen ERP-järjestelmän tarvitsemaksi artikkelitasoiseksi tuotetiedoksi, jossa tuotteiden yksilöinti tehdään GS1/GTIN-standardin yksilöintitunnusten avulla (Alhava ym., 2025B) sekä tietoa rikastetaan asennuksen materiaalilla huomioiden mm. asennuksessa esiintyvä hukka.

Tätä seuraa **tilaus-toimitustiedonvaihto** (oranssi), jossa tiedonsiirto yritysten välillä toteutetaan sanomapohjaisesti esimerkiksi ERP-järjestelmästä toiseen hyödyntäen kansainvälisesti käytössä olevia standardoituja tiedonvaihtoratkaisuja. Euroopassa kehitetty PEPPOL-standardi on globaalisti korvaamassa aiemman EDI-standardin, jonka avulla laskutustieto muutettiin sanomapohjaiseksi ja järjestelmien väliseksi. Tilaus-toimitustiedonvaihdon sähköistämisen ja sen avulla aikaansaatu toiminnan tehostaminen edellyttää E-BOM & M-BOM -dataperustan käyttöönottoa ja sen automatisoimista. Tilaus-toimitusketjun sähköistämistä ohjaa ja kehittää EU:ssa kansallisten PEPPOL-viranomaisten verkosto. Suomen PEPPOL-viranomaisena toimiva Valtionkonttori (Valtionkonttori, 2025) julkaisee eri toimialoille soveltamisohjeita PEPPOL-standardin mukaisten sanomien ja tiedonsiirtorajapintojen käytöstä. PEPPOL:n käyttöönoton taloudellinen hyöty realisoituu parhaiten silloin, kun sitä tukee riittävän laajasti automatisoitu dataperusta. Tällöin myös hankintaprosessi voidaan automatisoida, eikä urakoitsijan tarvitse laskea määriä manuaalisesti 2D PDF-kuvista ja syöttää tietoja käsin hankintajärjestelmään, kuten nykyisessä tiedostopohjaisessa toimintamallissa. Dataperusta kytkee BIM:n tiedon ERP:hen ja edelleen toimittajan ERP:hen, joka mahdollistaa tiedon rikastamisen näiden välillä tietokannoissa tai esimerkiksi data-alustalla.

Viides prosessialue, **rakentamisen digitalisoitu toimintatapa** (tumman sininen), kuvaa vaihetta, jossa digitalisaatio tukee tuotannonohjausta ja päätöksentekoa reaaliaikaisen tiedon avulla. Tämä kerros edellyttää myös dataperustan muodostamista ja se hyödyntää erityisesti M-BOM:n tiedoista GTIN-standardin yksilöintikoodia tietoavaimena, jolla pystytään hakemaan rakentamisessa, logistiikassa, rakennuksen luovutusvaiheessa tai ylläpidossa tarvittavia tietoja eri datavarannoista ja lähteistä koneellisesti. Viides prosessialue kattaa koko arvoketjun hankinnasta rakennuksen ylläpitoon ja elinkaaren loppuun saakka. Lisäksi se kattaa eri osapuolten tekemän tiedon linkityksen ja rikastamisen. Toisin sanoen digitalisaation 2.0-vaiheeseen kuuluu esimerkiksi logistiikan tiedonkäsittelyn automatisointia ja ERP/MRP/WMS -tiedon käyttöä as-built tiedon muodostamiseksi. Logistiikkaan kuuluu materiaalivirran sähköinen hallinta, johon sisältyy esimerkiksi sähköinen vastaanotto, joka hyödyntää joko viivakoodeja tai RFID-teknologiaa koneluennan mahdolliseksi. GTIN-koodien käyttö mahdollistaa tuotetiedon käytön eri tarpeita palvellen, kuten luovutustiedon koneellisen muodostamisen ja CO₂-tiedon automatisoidun laskennan esimerkiksi suunnittelu- ja toteutusvaiheessa sekä sen raportoinnin luovutus- ja ylläpitovaiheessa. Digitalisaatio 2.0:n kuuluu myös tiedon sähköinen luovutus tilaajille.

Tiekartan Digitalisaatio 2.0:n ylimmällä tasolla on **yhteiskunnan edellyttämä tiedonhallinta ilmastomuutoksen takia** (punainen), jossa digitalisaatio tukee CO₂-tiedon saatavuutta suunnitteluvaiheessa, kiertotalousprosessien toteutusta, vastuullisuusraportoinnin automatisointia ja toteutuneiden hiilijalanjälkien laskentaa. Tämä taso mahdollistaa muutoksen nykytilanteeseen, jossa tarkka CO₂-tieto on saatavilla vasta niin myöhään prosessissa, että se ei ennätä vaikuttaa päätöksentekoon, vaan on vain toteavaa. Digitalisaatio 2.0:n yksi tavoite on muuttaa automatisaation avulla esimerkiksi CO₂-tiedon tuotto nopeaksi ja edulliseksi, jolloin

tietoa voidaan käyttää tuotevalintojen hiilijalanjäljen simuloinnissa. Tällöin automatisaatio muuttaa CO₂-tiedon saatavuutta ja mahdollistaa sen, että sitä käytetään päätöksenteon tukena.

Digitalisaatio 1.0 ja 2.0 muodostavat yhdessä tiedon virtauksen päästä-päähän suunnittelusta ylläpitoon. Digitalisoinnin merkittävä etu osapuolille sekä yhteiskunnallisesti on tuote- ja prosessitiedon muuttuminen rakenteiseksi. Tämän seurauksena rakennusalan tieto on EU:n **FAIR-R** periaatteen mukainen, eli se on löydettävää (**F**indable), saavutettavaa (**A**ccessible), yhteentoimivaa (**I**nteroperable) ja uudelleenkäytettävää (**R**eusable) sekä tekoäly-yhteensopivaa (**R**eadiness for AI) (Wilkinsons ym., 2025; Verhulst ym., 2025). Nämä periaatteet ohjaavat digitalisaatiota ja tiedon virtauttamista siten, että tieto on prosessissa seuraavien vaiheiden kannalta käyttökelpoista. Tästä syystä digitalisaation toteutus vaatii eri vaiheiden tietosisältöjen yhdistämistä toisiinsa tietoavaimilla, jotka yhdistävät toisiinsa eri organisaatioiden ja vaiheiden tietosisällöt. Tutkimuksessa tuotiin keväällä Rakennustiedon Pyöreän pöydän seminaarissa esille ensimmäinen tietoavaimilla yhdistetty tiedonrikastusketju, joka tarkasteli suunnittelu-, hankinta-, toimitus-, vastaanotto-, rakentamis-, ja ylläpitoprosesseja sekä kuvasi, miten tiedonrikastusketju voidaan toteuttaa MTS-tuotteissa suunnittelusta ylläpidon suorittamaan korjaukseen saakka käyttäen vakioituja tietoavaimia (Ruottinen ja Ristimäki, 2025).

Digitalisaation tiekartta täydentyi kolmannella kerroksella rakennusalan päästessä mukaan datatalouden kasvuohjelmaan, jossa arvioidaan ja työestetään AI Champion -konsortioon kuuluvien yritysten kanssa dataperustaista arvonluontia ja digitalisaation mahdollistamia uusia datatuotteita. Nämä **ensimmäiset tunnistetut datatuotteet** (lila) lisättiin malliin kolmanneksi kerrokseksi ja esiteltiin B2030-kesäseminaarissa (Ruottinen & Alhava, 2025). Rakennusalan digitalisaatio mahdollistaa jo nyt uusien datapalveluiden tuottamisen markkinaa, jotka voivat muuttaa vallitsevia liiketoimintamalleja ja järjestää uudestaan suunnittelun ja rakentamisen ekosysteemin toimintatapoja.

5.3 Toimitusketjujen digitalisaatio

Rakennustuotteiden valmistusta ja niiden kytkeytymistä rakennustuotantoon voidaan jäsentää eri tuotantostrategioiden mukaan. Valmistavan teollisuuden tyypillisiä strategisia tuotantomalleja ovat varasto-ohjautuva tuotanto (Make-to-Stock, MTS), tilauksesta kokoonpantava tuotanto (Assemble-to-Order, ATO), tilauksesta valmistettava tuotanto (Make-to-Order, MTO) sekä tilauksesta suunniteltava tuotanto (Engineer-to-Order, ETO). (Rudberg ym., 2004.) Nämä strategiat eroavat toisistaan ennen kaikkea asiakastilauksen kytkentäpisteen ja tuotannon ohjauslogiikan perusteella (Haug ym., 2009), joka vaikuttaa merkittävästi myös tiedonhallinnan ja toimitusketjun rakenteisiin (Aspeteg ym., 2025).

Eri tuotantostrategioiden aikaansaamat toimitusketjutyyppit eroavat myös tuotetiedon hallinnan osalta toisistaan. MTS-tuotteet, joita rakennusalan kutsutaan yleisesti vakiotuotteiksi, ovat tyypillisesti tuotteita, joita käytetään useissa eri projekteissa ja niitä on saatavilla useilta vaihtoehtoisilta toimijoilta samojen jakelukanavien kautta. Tällaisten tuotteiden tuotetietoja

on tarkoituksenmukaista jakaa keskitetystä tuotetietorekisteristä, joita Suomessa ovat esimerkiksi LVI-info, Sähkönumerot.fi ja Rakennustiedon tuotetieto. MTS-tutkimuksessa päädyttiin siihen, että keskitetty ratkaisu on tarkoituksenmukainen myös siksi, että se säästää ekosysteemisissä tuotetietoa tuottavilta ja käyttäviltä organisaatioilta resursseja, koska ylläpidettäviä koneellista tiedonsiirtoa tukevia rajapintoja tarvitaan tuotetietorekisteriin vain yksittäisiä (Alhava ym., 2024). Myös verkostovaikutus tukee rekisterien käyttöä, koska samalla tuotetiedolla on suuri joukko käyttäjiä ja tuotetiedon elinkaari on pitkä, useita vuosia tuotteen koko elinkaaren ajan.

Käynnissä olevassa MTS-tutkimuksessa on havaittu, että ETO-, MTO- ja ATO-toimitusketjut eroavat MTS-toimitusketjuista tiedonhallinnan osalta, koska niissä on tyypillistä tuotteen räätälöinti projektikohtaisesti. Näitä rakennusalaan projektituotteiksi kutsuttuja tuotteita ja niiden tuotetietoja käyttää kustakin erästä vain pieni määrä käyttäjiä ja tuotetiedon elinkaari on lyhyt. Tästä syystä keskitetty tuotetietorekisteri ei ole tarkoituksenmukainen ratkaisu ETO-, MTO- ja ATO-toimitusketjujen tuotetiedon hallintaan, vaan tuotetieto on hallittava hajautevasti siten, että toimittaja tai valmistaja koostaa tarvittavat tuotetiedot ja siirtää ne tilaajalle eräajona tai tarjoaa tiedot noudettavaksi määräajan standardirajapinnan kautta. (Ruottinen ja Alhava, 2026.)

5.3.1 Tilauksesta suunniteltavien (ETO) rakennustuotteiden toimitusketjun digitalisointi

Tämä osio perustuu Teemu Alaluusuan käynnissä olevaan väitöskirjaan sisältyvään toimintatutkimukseen sekä konferenssijulkaisuun:

O Alhava, T Alaluusua, A Pekkala, A Peltokorpi, A Aaltonen, T Pitkäranta (2024). Challenges and Opportunities in Digitalising Concrete Element Supply Chain: proposed national Model. Proceedings of the 41st International Conference of CIB W78, Marrakech, Morocco, 2-3 October, ISSN: 2706-6568, <https://itc.scix.net/paper/w78-2024-119>

Toimintatutkimuksen referenssituotteina toimivat esivalmistetut runkotuotteet, kuten betonielementit ja teräsrunkotuotteet. Nämä edustavat valmistavan teollisuuden näkökulmasta tilauksesta suunniteltavien tuotteiden (Engineer-to-Order, ETO) tuotantostrategiaa, jossa tuotteet suunnitellaan, mitoitetaan ja valmistetaan vasta asiakkaan tilauksen jälkeen.

Tutkimuksessa tarkasteltiin, miten ETO-tuotantostrategian mukaisesti valmistettavien betonielementtien toimitusketjujen ja tuotetietojen digitaalinen hallinta voidaan toteuttaa niin, että prosessi- ja tuotetieto virtaavat saumattomasti suunnittelusta tuotantoon, toimituksiin ja asennukseen. Työ jatkoi Alaluusuan (2023) diplomityössä esitettyä tutkimusta, jossa tarkasteltiin digitaalisen tiedonhallinnan kehittämistä tahtituotantoa hyödyntävien rakennushankkeiden toimitusketjuissa. Tässä jatkotutkimuksessa laajennettiin aiempaa tarkastelua erityisesti ETO-tuotantostrategian mukaisesti valmistettavien betonielementtien toimitusketjujen ja tuotetietojen digitaalisen hallinnan näkökulmaan. Runkovaiheen nykytilan kuvaus ja keskeisten

pullonkaulojen tunnistaminen toimitusketjun alavirroissa oli jo osin toteutettu ja raportoitu Alaluusuan diplomityössä, jonka tuloksia hyödynnettiin tämän tutkimuksen lähtökohtana.

Konferenssijulkaisussa esitettyjen nykytilakartoitusten empiirinen tarkastelu osoitti, että toimitusketjun eri vaiheissa tuotettu tieto ei siirry digitaalisesti koneellisesti käsiteltävässä muodossa prosessien ja toimijoiden välillä. Tiedon siirrettävyyteen ja yhteentoimivuuteen liittyvät puutteet tunnistettiin keskeisiksi juurisyiksi virheiden kasautumiselle erityisesti työmaan asennusvaiheen aikana.

Informaation virtauksen edistämiseksi kehitetyn ratkaisun (artefaktin) avulla pyrittiin poistamaan toimitusketjun tiedonhallinnan keskeiset rakenteelliset ja prosessuaaliset esteet. Tutkimuksessa haettiin ratkaisuja havaittuihin informaation virtausta haittaaviin ongelmiin kansainvälisiin standardeihin perustuvien menetelmien implementoinnin ja tavoitetilän arkkitehtuurin kehittämisen kautta. Tavoitteena oli muodostaa kokonaisratkaisu, joka mahdollistaa tiedon yhteentoimivuuden, siirrettävyyden ja koneellisen käsittelyn kaikissa toimitusketjun vaiheissa.

Tutkimuksessa tunnistettiin, että informaation vakioinnin puute on yksi merkittävimmistä rakennusalan digitalisaatiota hidastavista tekijöistä. Ilman yhteisesti sovittuja tietorakenteita ja metatietomäärittäyksiä tiedon hallinta jää erillisiksi ja osittain päällekkäisiksi prosesseiksi, mikä estää tiedon automaattisen tulkinnan ja hyödyntämisen. Rakenteettoman tiedon, kuten PDF- ja kuvamuotoisten dokumenttien, sähköpostien ja puhelimitse välitetyn informaation käsittely edellyttää ihmisen tulkintaa, mikä tekee prosesseista hitaita, virhealttiita ja manuaalista työtä painottavia. Samaa tietoa tuotetaan ja tallennetaan useissa eri järjestelmissä, ja sen hallinta on usein tilannesidonnaista ja henkilöriippuvaista.

Toimintaympäristöä leimaa edelleen siiloutunut ajattelu, joka hajauttaa työnkulut ja heikentää tiedonkulkua toimitusketjun osapuolten välillä. Eri organisaatiot määrittelevät tiedonhallintaa ja sen rakenteita omista lähtökohdistaan ilman yhteistä viitekehystä, mikä vähentää tehokkuutta ja vaikeuttaa prosessien yhteensovittamista. Tämän seurauksena toimitusketjun eri osapuolet turvautuvat usein suljettuihin, point-to-point-periaatteella toteutettuihin suljetun toimintaympäristön tiedonsiirtoratkaisuihin, jotka ovat tehottomia ja ylläpidoltaan kalliita, sillä jokainen järjestelmäpari edellyttää erillisen integraation. Tällainen rakenne lisää riippuvuutta yksittäisistä toimittajista ja rajoittaa tiedon joustavaa ja laajamittaista hyödyntämistä toimitusketjun eri osapuolten välillä.

Tunnistettujen tiedon virtauksen puutteiden perusteella konferenssiartikkelissa määriteltiin periaatteet tavoiteltavalle kokonaisarkkitehtuurille, joka tukee projektikohtaisesti esivalmistettujen, ETO-tuotantostrategian mukaisesti valmistettavien elementtien tuoteyksilöintiä- ja tunnistamista, seuranta ja tiedonsiirtoa. Tutkimus toteutettiin suunnittelututkimuksena, jossa ongelma rajattiin, alan käytännöt ja standardit koottiin, ja kehitetty artefakti validoitiin Rakenusteollisuus RT:n toimialayrityksistä sekä tiedonsiirron ja digitaalisen toimitusketjun

hallinnan asiantuntijoista koostuneen työryhmän (BETK-toimitusketjutyöryhmä) toimesta. Kehitetty artefakti koostui kuudesta toisiaan täydentävästä osasta:

1. **Elementtien tuoteyksilöinti:** ETO-tuotantostrategian mukaisesti valmistettavien tuotteiden yksilöintiä ei ollut aiemmin ratkaistu tuoteyksilöitasolla hyödyntäen globaaleihin GS1-standardeihin perustuvaa mallia. Tämän seurauksena tuoteyksilöinti oli toteutettu valmistajakohtaisin, keskenään yhteensopimattomin ratkaisuin. Konferenssiartikkelissa esitetty ratkaisu määritteli tuoteyksilöinnin GS1-standardiperheen kolmitasoisen mallin mukaisesti, jossa MTO-GTIN, MTO-varianttinumero ja sarjanumero yhdessä muodostavat yksilöivän tunnisteen tuotteille.
2. **Tuotetunnistusmenetelmän valinta:** Määritellyn tuoteyksilöintimallin käytännön toteuttamiseksi arvioitiin useita vaihtoehtoisia tunnistusmenetelmiä. Arvioinnin perusteella GS1-standardiperheen mukaiset 2D-viivakoodit sekä passiivinen UHF-RFID-teknologia todettiin soveltuvimmiksi tiedonkantajiksi elementtien tuoteyksilötasoiseen tunnistamiseen määritellyille tietosisällöille.
3. **Metatietomalli:** Elementtityyppien metatiedot määriteltiin siten, että yksilöintikoodia voidaan hyödyntää sekä suunnittelu- ja tuotetiedon että prosessissa syntyvän tapahtumatiedon tallennukseen, hakuun ja yhdistämiseen. Metatietomalli mahdollistaa tiedon yhdenmukaisen rakenteen ja koneellisen käsiteltävyyden toimitusketjun eri osapuolten välillä.
4. **Tiedon virtausarkkitehtuuri:** Tutkimuksessa kuvattiin hajautettu ja tavoitteellinen tiedon virtauksen arkkitehtuuri, jossa tieto säilyy siellä, missä se on ajantasaisinta, mutta on jaettavissa avoimien rajapintojen kautta muiden osapuolten käyttöön. Arkkitehtuurin tavoitteena on varmistaa tiedon ajantasaisuus, jäljitettävyys ja yhteentoimivuus koko toimitusketjun läpi.
5. **Masterdatan hallinta:** Määriteltiin periaatteet masterdatan hallinnalle, mukaan lukien tietojen omistajuus, siirrettävät metatiedot sekä toimintatavat tiedon noutoon ja automaattiseen välittämiseen. Näiden avulla voidaan varmistaa tiedon eheys ja yhtenäisyys koko toimitusketjussa sekä mahdollistaa tiedon hyödyntäminen prosessien ohjauksessa ja raportoinnissa.
6. **Sanomapohjainen tiedonsiirto:** Tutkimuksessa kuvattiin sanomapohjainen tiedonsiirtomalli tilaus-, toimitus- ja logistiikkasanomien välittämiseksi PEPPOL-verkon sanomastandardien mukaisesti. Viestipohjainen ratkaisu mahdollistaa tiedon automaattisen ja standardoidun vaihdon eri toimijoiden välillä sekä muodostaa perustan ETO-toimitusketjujen digitalisoidulle ja yhteentoimivalle prosessitiedonvaihdolle.

Kokonaisuutena tutkimus osoitti, että ETO-tuotantostrategiaan perustuvien betonielementtien toimitusketjun osittainen digitalisointi on mahdollista toteuttaa menetelmätasolla avoimesti, yhteentoimivasti ja järjestelmäriippumattomasti. Tämä on saavutettavissa yhdistämällä GS1-standardiperheen toimitusketjunhallinnan standardeja sekä PEPPOL-verkossa välitettävät tilaus-, toimitus- ja logistiikkasanomat ETO-tuotantostrategian mukaiseen tietoarkkitehtuuriin.

Tutkimuksen tulokset osoittavat siirtymän kohti digitaalista toimintamallia, jossa tiedon tuottaminen, yksilöinti, jakaminen ja hyödyntäminen tapahtuvat systemaattisesti eri toimitusketjuverkoston-osapuolten välillä. Tämä siirtymä mahdollistaa vastaavanlaisen tuottavuuden ja laadun kehityksen toimitusketjun ja tuotetiedon hallinnan osalta kuin mitä on aiemmin

saavutettu varasto-ohjautuvien tuotteiden valmistuksessa, samalla vahvistaen toimitusverkoston tilannetietoisuutta, läpinäkyvyyttä ja yhteistoiminnallista tehokkuutta. Tehty tutkimus edustaa tähän mennessä toteutettua vaihetta toimiala-arkkitehtuurin kehittämisprosessissa, ja sitä tullaan jatkamaan toimitusketjun laajuisen tiedonhallinnan, standardien soveltamisen ja yhteentoimivuuden syventämiseksi.

5.3.2 Vakiotuotteiden (MTS) toimitusketjun digitalisointi

Tämä osio perustuu Bettina Ruottisen käynnissä olevaan väitöskirjaan sisältyvään tutkimukseen sekä seuraaviin konferenssijulkaisuihin:

Alhava, O., Ruottinen, B., Peltokorpi, A., Siren, M., Aaltonen, A., & Pitkäranta, T. (2024). Advancing Digitalisation in Construction Through Automated Metadata Management and Machine Data Processing. In Proceedings of the 41st International Conference of CIB W78, October 1st-3rd 2024, Marrakesh, Morocco.

Alhava, O., Oraskari, J., Arola, T., Järvinen, T., Järvenpää, M., & Ruottinen, B. (2025). BIM Data Content Guiding Takt Production Material Flow: IFC Meets MTS Supply Chain. In International Workshop on Linked Data in Architecture and Construction, July 09–11, 2025, Porto, Portugal.

Alhava, O., Arola, T., Torro, O., Järvenpää, M., Järvinen, T., & Ruottinen, B. (2025). AI-Agent Application for Semantic Data Enrichment in Ventilation Systems Using National Nomenclature for IFC and GS1-Based Product Information. In International Workshop on Linked Data in Architecture and Construction, July 09–11, 2025, Porto, Portugal.

Rakennusalan tiedonvirran pullonkaula syntyy jo suunnittelussa: ARK-, RAK- ja TATE-suunnittelijat tekevät oman alansa suunnittelun käyttäen kukin suunnittelualalleen erikoistuneita sovelluksia. Suunnittelu toteutetaan vesiputousmallilla (Kiviniemi, 2024) erillisissä BIM-ohjelmistoissa, jotka yhdistetään IFC-formaatissa olevaksi yhdistelmämalliksi, jotta rakennusta voidaan tarkastella kokonaisuutena. Yhdistelmämallin avulla tehdään myös törmäystarkastelut. Tämän jälkeen eri suunnittelu- ja urakointialojen tieto hajaantuu 2D-suunnitelmiin, jota käytetään hankinta- ja urakointivaiheissa tietolähteinä tietomallien sijasta. BIM:ia hyödynnetään tyypillisesti vain suunnitteluvaiheen koordinaatioon, jolloin mallit eivät toimi jatkuvana, koneymärrettävänä tietolähteenä hankintaan tai tuotantoon. Tämä näkyy erityisesti MTS-toimitusketjussa siinä, että projekteissa siirretään tietoa osapuolten välillä pääsääntöisesti edelleen 2D-piirustuksina ja tiedostoina, ei läpinäkyvinä ja yhteentoimivina tietovirtoina yritysten järjestelmien välillä. Tuki ja ohjeistus rakennusalan tuotantotietojen standardien käyttämiseksi puuttuu. Lisäksi E-BOM/M-BOM-käsitteet eivät ole vielä tuttuja. Siten myös suunnittelijoiden 3D-suunnitteluohjelmistoissa muodostettu tieto ei ole virtautettavissa eri käyttötapauksiin tai toimijoille prosessin alavirrassa.

Toimitusketjujen digitalisointi alkaa BIM:n tietosisältöjen vakioinnista ja rakenteistamisesta. Talotekniikan MTS-tuotteiden osalta tämä tapahtui Rava3PRO-projektin julkaistua vakioidut talotekniikan suunnittelunimikkeet vuonna 2023 (Rava3Pro, 2023). Tämän ansiosta MTS-toimitusketjujen digitalisaatio keskittyi vuonna 2025 digitalisaation tiekartan 1.0 vaiheeseen talotekniikan toimitusketjussa, jossa käytännössä kytkettiin yhteen rakennusteollisuudessa vakioitu talotekniikan suunnittelutieto ja rakennustuoteteollisuudessa GS1-standardiperheen käytön avulla yksilöity tuotetieto. Nämä tiedot muodostivat dataperustan seuraavalle vaiheelle, eli toimitusketjujen tilaus-toimitussanomien käyttöönotolle käyttäen PEPPOL-standardia. Rakennusallalla PEPPOL:ia käyttävät urakoitsijat ja tukut ERP-järjestelmiensä välisen tiedonsiirron toteuttamiseen perinteisen sähköpostivälitteisen tiedonsiirron tai manuaalisesti käytettävien webshop-portaalien sijasta (Jussila & Alhava, 2025). Seuraavassa vaiheessa painopiste siirtyy vastuulliseen rakentamiseen ja automaattiseen raportointiin, joka lopulta mahdollistaa dataperusteisen arvonluonnin eri toimijoille sekä aikaansaa liiketoimintamallien muuttumisen. Dataperustainen arvonluonti on mahdollista siksi, että hyödynnettävä tieto perustuu toimitusketjussa kertaalleen tuotettuun ja läpinäkyvästi hyödynnettävään informaatioon.

MTS-toimitusketjun dataperusta

Digitalisaation ytimenä on tuotteiden yksilöinnin kanssa yhteensopiva suunnittelunimikkeistö ja sitä tukevat tekniset attribuutit, jotka täytyy vakioida käytettäväksi tietomallissa suunnittelunimikkeiden ohella (Järvenpää, 2022). Tähän dataperustaan kuuluu myös sijaintitieto, joka täytyy pystyä rikastamaan osaksi suunnittelutietoa (E-BOM), jotta sitä voidaan käyttää edelleen tiedonrikastamiseen hankintaa, logistiikkaa, tuotantoa ja rakennuksen ylläpitoa varten.

Vuonna 2025 tutkimus kohdistui siihen, miten BIM:stä saadaan vakioiduilla suunnittelunimikkeillä osaluettelo, joka rikastetaan ostonimiketiedoilla ERP:tä varten sekä miten tämä tieto välitetään toimittajan ERP:hen. Tämä dataperusta muodostaa lähtökohdat jatkotutkimukselle, jossa selvitetään, miten rakennusalan digitalisoitua tietoa voidaan hyödyntää edelleen hankinnassa, toimittajilla, työmaalla ja tilaajalla. Toimitusketjun digitalisoinnin näkökulmasta vuoden 2025 tutkimus loi perustan, johon voidaan jatkotutkimuksessa liittää työmaan tuotannon ohjaukseen käytettävät ohjelmistot ja muodostaa rakennuksen digitaalinen tuote- ja prosessikaksonen. Tutkimuksen tarkoituksena on myös myöhemmin hahmottaa rakennushankkeen elinkaaren aikana muodostuneen tiedon tarkoituksenmukaista siirtoa tilaajalle.

Tietoavainten käyttö dataperustan rikastamisessa

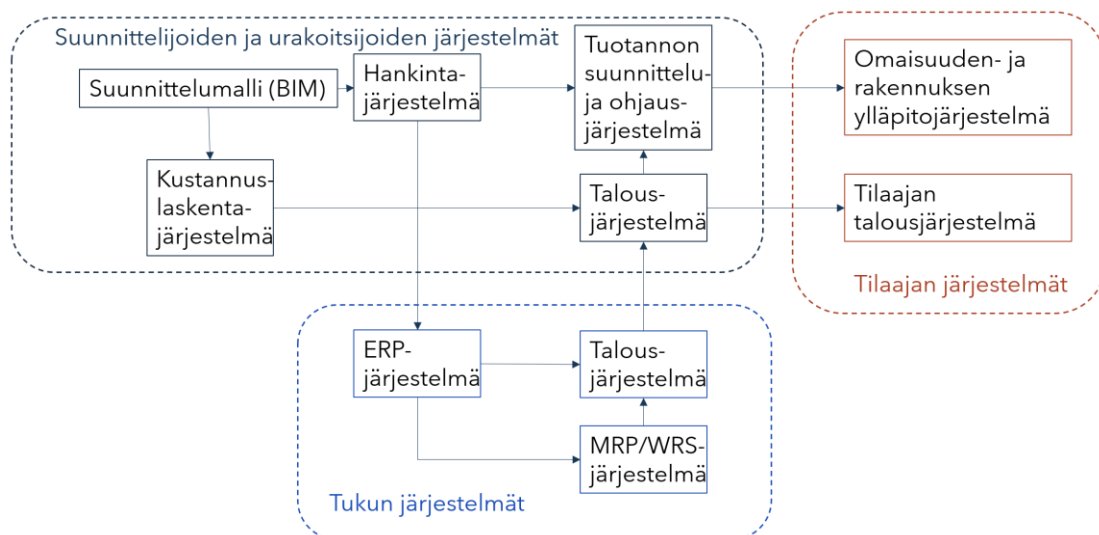
Aiemmassa CIB W78 -tutkimuksessa osoitettiin, että ratkaisevaa on korjata tietomallien tietosisällöt eli tiedon laatu ja rakenteisuus nimenomaan suunnitteluvaiheessa: metatiedon hallinta ja kansallinen nimikkeistö mahdollistivat talotekniikan BIM:n objektien tiedon siirron dataalustalle ja sen rikastamisen suunnittelun E-BOM:sta hankinnan M-BOM:ksi (Alhava ym., 2024B). Rikastettu tieto valituista tuotteista ja materiaaleista yksilöitiin GS1/GTIN-tuotetunnisteisiin ja välitettiin toimittajille PEPPOL-sanomilla. Samalla luotiin pohja automaattiselle

CO₂-laskennalle ja mahdollistettiin sähköisen luovutuksen tiedonmuodostaminen. Toisin sanoen, kun suunnitteludata on alusta asti koneluettavaa ja standardoitua, se voi virrata rakenteisessa muodossa ja tuottaa arvoa myös suunnittelun ulkopuolella. Tiedon virtaaminen edellyttää tietoavainten hyödyntämistä (kuva 19).



Kuva 19. MTS-toimitusketjussa toteutettu tiedon virtaus edellyttää tietoavainten hyödyntämistä eri vaiheiden tietojen linkittämiseksi toisiinsa (Ruottinen ja Ristimäki, 2025)

Tiedon virtaus toteutetaan tietoavaimilla, jolloin tietomallista voidaan siirtää tieto rakenteisessa muodossa hankintajärjestelmään (ERP), sieltä edelleen sähköisen rajapinnan kautta toimittajan tai tukun ERP-järjestelmään käyttäen PEPPOL-standardin mukaista sähköistä tilaus-toimitustiedon välitystä. Samalla tavoin rakenteinen tieto ja tietoavainten käyttö mahdollistaa urakoitsijan ERP:n tiedon siirtämisen tuotannon suunnittelu- ja ohjausjärjestelmään eli esimerkiksi työmaan aikatauluohjelmistoihin. Yhdessä tämä kokonaisuus muodostaa kuvassa 20 esitetyn järjestelmäarkkitehtuurin talotekniikan toimitusketjun yrityksistä muodostuvalle ekosysteemille.



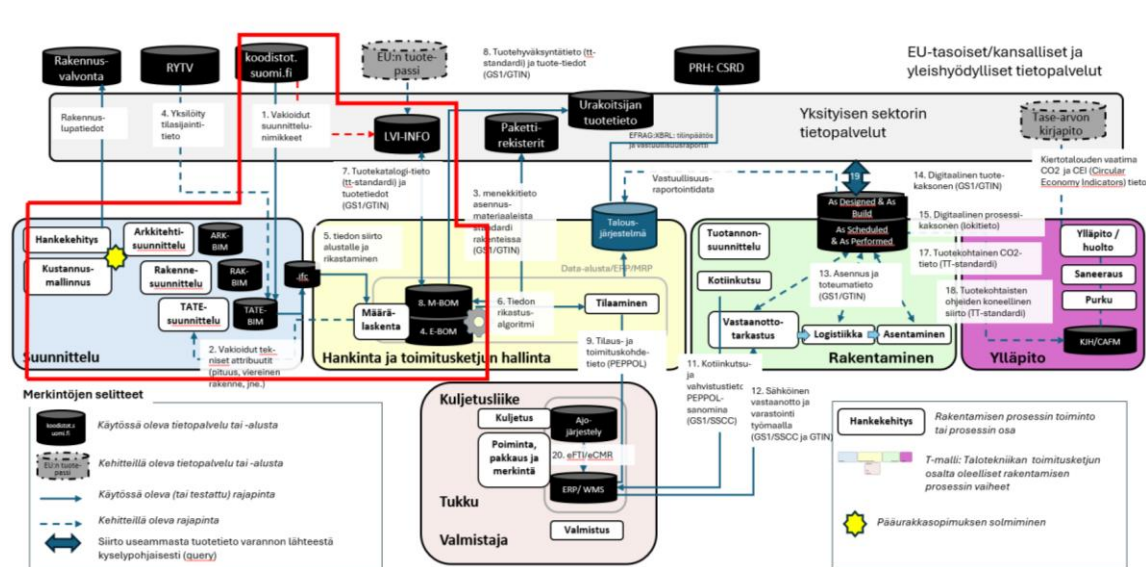
Kuva 20. MTS toimitusketjun järjestelmäarkkitehtuurin pääasiallinen tietovirtojen suunta (Ruottinen ja Alhava, 2025)

Dataperustan automatisoitu rikastaminen

LDAC-konferenssiartikkeleissa selvitettiin IFC-muotoisen yhdistelmämallin soveltuvuutta toimia koneellisen tiedon rikastuksen lähtökohtana ja linkitetyn datan (Linked Building Data, LBD) käyttöä tiedon rikastamisen välineenä. Artikkelissa osoitettiin, että IFC-mallista on mahdollista konvertoida tieto linkitetyksi rakennuksen tiedoksi (Linked Building Data, LBD) käyttäen esimerkiksi IFCToLBD-ohjelmistoa koneellisesti, jolloin tietomallissa muodostetut rakennuksen vakioidut suunnittelutiedot voidaan suodattaa ja kerätä suoraan LBD-tietokannasta käyttäen esimerkiksi SPARQL-kieltä, luokitella tuoteryhmiin ja rikastaa sijainneittain järjestettyihin osaluetteloihin ilman BIM-työkaluja. Näin suunnitteludata kytkeytyy koneellisesti hankinnan ja tuotannon prosesseihin, jolloin siitä tulee osa arvoketjun yhteistä, koneymmärrettävää ja rikastettavaa tietopohjaa. Tutkimuksessa on aiemmin tunnistettu rikastus E-BOM:sta M-BOM:iin kriittiseksi tietovirran epäjatkuvuuskohdaksi (Alhava ym., 2024B). LDAC-tulokset kuvaavat, miten standardoitu suunnittelunimikkeistö ja linkitetty data mahdollistavat tiedon automaattisen rikastamisen M-BOM:ksi. Suunnittelun objektit muutetaan rakenteiseksi, sijaintiperusteiseksi osaluetteloksi, kytketään valitun toimittajan tuoteartikkeleihin ja integroidaan tieto hankinnan sekä asennuksen tarpeisiin. Kun rikastus tehdään data-alustalla, sama tieto palvelee myös ajantasaisia kustannus-, aikataulu- ja hiilijalanjälkilaskelmia.

Suomalaiset tuotetietorekisterit hyödyntävät tietoavaimia

Tutkimuksessa todettiin myös, että Suomessa tuotetietorekistereihin osin jo toteutettu vakioitujen suunnittelunimien lisäys artikkelien tietoihin, yksinkertaistaa merkittävästi tiedon rikastamisen toteutusta. Kuvassa 21 punaisella katkoviivalla osoitettu vakioitujen suunnittelunimikkeiden vieminen tuotetietorekisterin artikkelien tietojen osaksi mahdollistaa sen, että jokainen rekisterissä oleva artikkeli ja sen tiedot sisältävät myös tiedon siitä, millä suunnittelunimellä kyseistä tuotetta kutsutaan suunnitteluvaiheessa. Tämä tietokenttä toimii tietoavaimena, jolla tuotetta kuvaava suunnittelutieto ja tuotetoimittajan ostonimike, eli artikkelitieto, voidaan kohdistaa rikastusvaiheessa oikein. Kohdistuksessa tarvitaan myös tietomallista saatavia teknisiä attribuuttitietoja, jotta artikkelin eri vaihtoehtoista pystytään valitsemaan juuri oikea artikkeli.



Kuva 21. MTS-tuotteiden kansallinen tietovirta-arkkitehtuuri ja siitä Suomessa tutkimuksen aikana toteutettu digitalisaatio 1.0 dataperusta (Alhava et al., 2024B). Avainkäsitteenä toimiva vakioitu suunnittelunimikkeitä on viety tuotetietorekisterin artikkelien tuotetiedon osaksi, joka on yksinkertaistanut osaluettelon koneellista rikastamista.

Tekoäly-yhteensopiva tieto

Dataperustan luominen ja tiedon rakenteistaminen mahdollistavat tiedon virtauttamisen lisäksi tekoälyn tehokkaan käyttöönoton (Torro ja Sormunen, 2025). Tekoälyagentit mahdollistavat ohjelmistorobotiikkaan nähden kustannustehokkaamman toteutustavan tiedon rikastamiselle ja linkitetyn datan käytölle. LDAC-konferenssiartikkelissa toteutetussa pilotoinnissa moniagenttialustaa käytettiin rikastamaan rakenteisen suunnittelutiedon E-BOM:sta tuotetiedon sisältäväksi M-BOMiksi. Keskeinen opetus oli, että tiedon virtaus ja mahdolliset agentit on perustettava rakennusalan kokonaisarkkitehtuuriin (kts luku 5.4) ja prosesseihin (integraatiot, oikeudet), jotta rikastus, sanomien muodostus ja tiedonsiirto (esim. PEPPOL) voidaan toteuttaa sujuvasti ja luotettavasti useiden toimijoiden kesken.

MTS-toimitusketjujen jatkotutkimus vuonna 2026

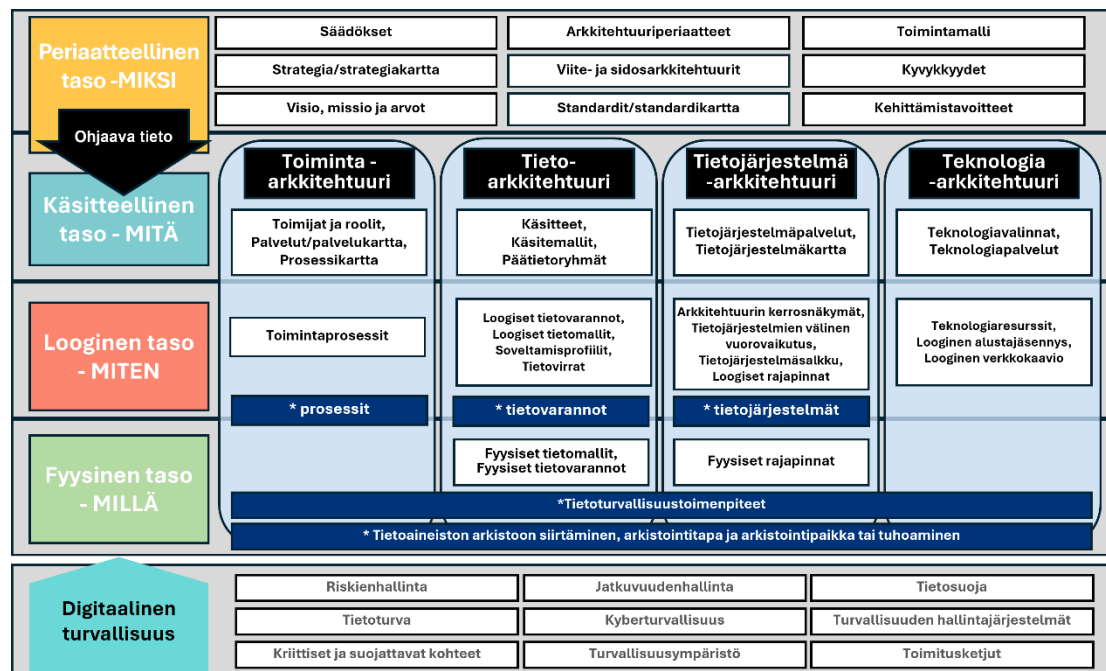
Vuonna 2025 MTS-toimitusketjun tutkimus keskittyi dataperustaan ja digitalisaatio 1.0:n toteutukseen. Tehty tutkimus ja julkaistut kansalliset tietovirta-arkkitehtuurit mahdollistavat tutkimuksen ulottamisen PEPPOL:n käyttöön tilaus-toimitusketjun hallinnassa sekä työmaa-toimintojen, eli tahtituotannon ja logistiikan, kattamisen kokonaisarkkitehtuuritarkastelun avulla. Tulevina vuosina MTS-tutkimus tulee kohdistumaan seuraaviin kokonaisuuksiin:

1. Muodostetun BIM-pohjaisen tiedonrikastuksen mallin testaaminen E-BOM:sta M-BOM:iin ja edelleen ERP-järjestelmiin projekteissa
2. Digitalisoinnin referenssimallin muodostaminen valmistavan teollisuuden suunnittelun, tuotannosuunnittelun ja valmistuksen
3. Dataperustan tiedon ja tietomallien tietosisältöjen laadunhallinta tiedon virtauttamiseksi oikeellisen alkaen tietomalleista

- Ontologioiden määrittämiseen ja niiden linkittämiseen kattaen Digitalisaatio 1.0:n ja 2.0:n esimerkkituotteilla ja tate-järjestelmissä
- Kokonaisarkkitehtuurin muodostaminen MTS-toimitusketjulle ja sen ekosysteemille
- Tietosisältöjen rikastaminen koneellisesti sekä tekoölyavusteisesti Digitalisaatio 2.0:n osakokonaisuuksien toteuttamiseksi talotekniikan järjestelmissä ja tuotteita käyttäen
- Rakennushankkeen aikana muodostetun tiedon tarkoituksenmukainen siirto tilaajalle
- Vastuulliseen rakentamiseen ja automaattiseen raportoinnin toteutus: dataperusteisen arvonluonnin mekanismit

5.4 Digitalisaation seuraavat askeleet: Kokonaisarkkitehtuuri ja yhteentoimivuuden teoreettinen viitekehys

Kokonaisarkkitehtuuri tarjoaa menetelmällisen viitekehysten (kuvassa 22), jonka avulla toimitusketjujen digitalisaatiota ja tiedonhallintaa voidaan tarkastella systemaattisesti niin ala- kuin yritystasolla (Drews and Schirmer, 2018). Arkkitehtuurin periaatteellinen, käsitteellinen, looginen ja fyysinen taso määrittävät yhdessä, **missä**, **mitä**, **miten** ja **millä** välineillä toimintaa ja tiedonvaihtoa kehitetään. Näin voidaan kuvata, miten strategiset tavoitteet, tietorakenteet, järjestelmät ja teknologiat kytkeytyvät yhteen toiminnallisesti ja teknisesti eheäksi kokonaisuudeksi. (JHS 179; DVV, 2025)



Kuva 22. Kokonaisarkkitehtuuri noudattaa TOGAF-viitekehystä ja kansallista JHS-179 suositusta kokonaisarkkitehtuurin muodostamisesta ja on julkaistu viitekehysnä (DVV, 2025)

Kokonaisarkkitehtuurin neljä tasoa voidaan rinnastaa yhteentoimivuuden Euroopan unionin **European Interoperability Framework (EIF)** lähestymistavan mukaisesti neljään ulottuvuuteen (Interoperable Europe, 2025; Schmitz and Wimmer, 2023). **Tekninen yhteentoimivuus** vastaa fyysistä tasoa, jossa määritellään tiedonsiirron rajapinnat ja infrastruktuurit mahdollistaen pohjan tiedonvaihdolle varmistamalla datan siirrettävyyden ja infrastruktuurin yhteensopivuuden. **Syntaktinen yhteentoimivuus** liittyy loogiseen tasoon, jossa

varmistetaan tiedon rakenteellinen yhdenmukaisuus esimerkiksi standardoitujen tiedostomuotojen (JSON, XML, STEP File Format, CSV yms.) avulla, jotka mahdollistavat tiedon koineellisen tulkinnan, mutta eivät vielä sen sisällöllistä ymmärrystä.

Semanttinen yhteentoimivuus laajentaa näkökulman tiedon rakenteesta sen merkitykseen. Tällä tasolla varmistetaan, että eri toimijat tulkitsevat tiedon sisällön samalla tavalla riippumatta siitä, missä järjestelmässä tieto on tuotettu tai hyödynnetty. Tämä edellyttää yhteisiä tietomalleja, sanastoja, ontologioita ja luokituksia, jotka muodostavat yhteisen kielen tiedonvaihdon ja varmistavat merkitysten yhdenmukaisuuden. **Pragmaattinen yhteentoimivuus** puolestaan heijastaa periaatteellista tasoa, joka määrittää toiminnan tavoitteet, vastuunjaon ja sääntelypuitteet.

EIF:n neljän tason yhdistelmä muodostaa perustan digitaalisesti yhteentoimivalle toimintaympäristölle, jossa tieto säilyttää merkityksensä ja on hyödynnettävissä koko toimitusketjun ja sen sidosverkostojen tasolla. Kokonaisarkkitehtuurin ja yhteentoimivuuden periaatteet luovat siten yhteisen rakenteen, jonka avulla eri tuotantostrategioita ja toimintamalleja voidaan kehittää toimialalla yhtenäisesti, läpinäkyvästi ja tietoon perustuen. Kokonaisarkkitehtuurien kehitys on käynnissä rakennusteollisuuden ja rakennustuoteteollisuuden välillä ja esimerkiksi MTS osalta kokonaisarkkitehtuurin osia on jo mallinnettu osana kansallista tietovirtakuvausta (Alhava et al., 2024), koska tietovirtakuvauksessa on tunnistettu toimijat, prosessikartan osat sekä kuvattu alustavasti tietovirrat ja rajapinnat.

5.5 Toimitusketjujen digitaalisen hallinnan maturiteettimalli

Tämä osio perustuu Rasmus Koivun diplomityöhön:

R Koivu (2025). Rakentamisen toimitusketjujen digitaalisen hallinnan maturiteettimalli. Aalto-yliopisto. <https://aaltodoc.aalto.fi/server/api/core/bitstreams/coe48bdd-1b21-4e8a-b96d-a30eb633e9co/content>

Rakennusala siirtyy kohti teollistuneempia ja digitaalisempia toimintamalleja vastatakseen tehokkuuden, läpinäkyvyyden ja aikatauluhallinnan haasteisiin. Rasmus Koivun diplomityössä (2025) kehitettiin rakennusalan käyttöön maturiteettimalli, joka arvioi ja ohjaa toimitusketjujen digitaalista kehitystä erityisesti pääurakoitsijan näkökulmasta. Tutkimus on jatkumoa Teemu Alaluusuan diplomityölle (2023), jossa kehitettiin GS1-standardeihin pohjautuva digitaalisen tiedonvaihdon maturiteettimalli. Mallin kehityksessä hyödynnettiin suunnittelututkimuksen metodologiaa, ja aineisto kerättiin kirjallisuuskatsauksen, haastattelujen, työpajojen ja havainnoinnin avulla Aalto-yliopiston Building 2030 -hankkeen puitteissa.

Tutkimuksessa kartoitettiin rakennusalan digitaalisten toimitusketjujen nykytila ja verrattiin sitä muiden toimialojen käytäntöihin. Tuloksena luotiin viiteen osa-alueeseen (tuotetiedon hallinta, tuoteseuranta, logistiikka, hankinta, tietomallit) ja neljään kypsyystasoon jakautuva maturiteettimalli. Malli mahdollistaa yrityksille oman tilanteen arvioinnin sekä kehitysaskeleiden

suunnittelun kohti teollisempaa toimitusketjua. Erityisesti tuotteiden GTIN- ja toimiserien SSCC-koodien sekä PEPPOL-sanomien käyttöönotto myyjien ja ostajien välisessä kommunikoinnissa nähtiin ratkaiseviksi elementeiksi toimitusketjun digitalisoinnissa.

Maturiteettimalli kuvaa yrityksen kyvykkyyttä seurata ja hallita toimitusketjun eri toimintoja digitaalisilla työkaluilla. Malli on jaettu viiteen osa-alueeseen, jotka kuvaavat toimitusketjun hallinnan eri kehitysvaiheita (Taulukko 3). Mallin alin taso, taso nolla, edustaa tilannetta, jossa yrityksellä ei ole käytössään digitaalisia työkaluja toimitusketjun hallintaan. Tarkemmat kuvaukset maturiteettitasoista ja niiden vaatimuksista löytyvät diplomityöstä.

Taulukko 3. Toimitusketjujen digitaalisen hallinnan maturiteettimalli.

	Taso 1	Taso 2	Taso 3	Taso 4
Tuotetiedon hallinta	GTIN Standardisointi	RT tuotetiedon hakupalvelu	RT projektikohtainen tuotetietokanta	ERP ja RT tuotetiedon rajapinta-sovellus
Tuoteseuranta	Digitaalinen tilausseuranta ERP:ssä	Projektikohtainen tuotteen seuranta	Yrityslaajuinen tuoteseuranta ja allokointi	-
Logistiset ratkaisut	SSCC kollikoodien tuottaminen	Tuotteen paikka- ja aik tiedot logistisille yksiköille	Yrityslaajuinen logistiikkatermi-naali tai yhteisvarastot	-
Hankintatiedon digitalisointi	PEPPOL sanomien käyttöönotto	PEPPOL järjestelmän täysi käyttöönotto	Hankinnan toimintojen automatisointi	-
Tietomallien hallinta	LVIS tuoteosatunnusten vakiointi	Tuotetiedon linkitys tietomalliin, GTIN / LVI-tuoteosa	EBOM → MBOM ERP koneluettava suunnittelutieto	Tuotetiedon rikastaminen tietomalliin

Tuotetiedon hallinta -osa-alueessa arvioidaan urakoitsijan valmiutta hyödyntää standardoitua ja digitaalista tuotetietoa toimitusketjun eri vaiheissa. Maturiteettimallin tasot etenevät yksittäisten tuotetunnisteiden, kuten GTIN-koodien, käyttöönotosta kohti integroitua tuotetiedon hallintaa, jossa tiedot liikkuvatautomaattisesti toiminnanohjausjärjestelmän ja projektikohtaisen tuotetietokannan välillä. Malli korostaa sitä, että tehokas ja läpinäkyvä toimitusketju perustuu laadukkaaseen ja keskitetysti hallittuun tuotetietoon. Kussakin maturiteettitasossa kuvataan, mitä konkreettisia toimenpiteitä urakoitsijalta vaaditaan – esimerkiksi RT-tuotetietopalvelun hyödyntämistä, tiedon rikastamista ja rajapintaratkaisujen käyttöönottoa – jotta tuotetieto saadaan kytkettyä saumattomaksi osaksi hankintaa, logistiikkaa, suunnittelua ja rakennuksen elinkaaren hallintaa.

Tuoteseuranta -osa-alueessa tarkastellaan urakoitsijan kykyä hallita materiaalivirtoja ja toimituksia projekteihin digitaalisesti eri maturiteettitasoilla. Malli etenee perinteisestä toiminnanohjausjärjestelmän käytöstä projektikohtaiseen seurantaan ja lopulta yrityslaajuiseen kapasiteettiallokointiin, jossa materiaalivirrat optimoidaan organisaation tasolla. Tavoitteena on

luoda reaaliaikainen näkyvyys tilauksista, toimituksista ja varastotilanteista eri projekteissa, mahdollistaen ennakoivan suunnittelun ja tehokkaan resurssien hallinnan. Kunkin tason kuvauksessa esitetään, mitä konkreettisia valmiuksia urakoitsijalta edellytetään, kuten ERP-järjestelmien käyttö, tietomallien hyödyntäminen ja toimitusverkoston ohjaaminen dataohjatusti.

Logistiset ratkaisut -osa-alueessa arvioidaan urakoitsijan kykyä hallita toimitusyksiköitä ja materiaalien liikkumista tehokkaasti ja digitaalisesti rakennusprojektien eri vaiheissa. Maturiteettimalli etenee yksittäisten toimitusyksiköiden tunnistamisesta (esim. SSCC-koodien tuottaminen) aina yrityslaajuiseen logistiikkaterminaaliin ja keskitettyihin varastointiratkaisuihin saakka. Tavoitteena on vähentää työmaavarastointia, parantaa toimitusvarmuutta ja mahdollistaa oikea-aikaista logistiikkaa, joka tukee erityisesti tahtituotannon kaltaisia rakentamismenetelmiä. Kussakin maturiteettitasossa kuvataan, millaisia teknisiä ratkaisuja, prosesseja ja yhteistyömalleja urakoitsijan on otettava käyttöön, jotta logistiikka voidaan integroida osaksi digitaalista toimitusketjua.

Hankintatiedon digitalisoinnilla on keskeinen rooli toimitusketjujen hallinnassa. Jotta tuotteet voidaan alun perin yksilöidä ja rekisteröidä oikein, on niiden kuljettava tilaajan ja toimitajan järjestelmien kautta läpinäkyvästi ja hallitusti. Hankintaprosessin digitalisoinnin tavoitteena on luoda yhtenäinen, standardoitu toimintaympäristö, jossa kilpailutus, tilaus ja seuranta tapahtuvat digitaalisesti yhdellä alustalla koko hankintavaiheen ajan. Hankinnan maturiteettitasot alkavat sähköisten PEPPOL-sanomien käyttöönotosta osana tilausten ja laskujen käsittelyä. Toinen maturiteettitaso rakentuu PEPPOL-järjestelmän täysimääräiseen hyödyntämiseen läpi koko hankintaketjun: Tilaaajalta lähtevät kaikki hankinnan ydinsanommat (tilaus, tilausvahvistus, toimitusilmoitus ja lasku) PEPPOL-formaatissa, ja ne ovat rakenteeltaan ja sisällöltään harmonisoituja. Kolmas maturiteettitaso kuvaa tilannetta, jossa PEPPOL-sanomat, tuotetunnisteet (GTIN, SSCC) ja ERP-järjestelmä on linkitetty saumattomaksi kokonaisuudeksi. Tässä vaiheessa hankintatiedot virtaavat automaattisesti tuotannonohjaukseen ja työmaan logistiikkaan, mahdollistaen reaaliaikaisen seurannan ja tehokkaan ohjauksen.

Tietomallien hallinnan kypsyystasoja tarkastellaan neljässä tasossa, joissa keskitytään erityisesti siihen, miten tuotetietoa voidaan hyödyntää ja rikastaa suunnittelutiedon avulla osaksi rakentamisen toimitusketjua ja rakennuksen elinkaaren hallintaa. Malli etenee perustason tunnistamis- ja vakiointiratkaisuista kohti järjestelmätasoisia, digitaalisesti ohjattuja prosesseja, joissa tieto virtaa saumattomasti eri osapuolten ja järjestelmien välillä. Koska suuri osa suunniteltavista varasto-ohjattavista tuotteista tietomalleissa koostuu LVIS-tuoteosista, kuten ilmanvaihtokanavista, vesikalusteista ja sähköjärjestelmän komponenteista, on näiden tuotteiden suunnittelu- ja nimikemäärittämisprosessien kehittäminen erityisen kriittinen osa kypsyystason nostamista. Ilman vakioituja ja yksiselitteisiä suunnittelunimikkeitä ja vastaavien kauppatuotteiden tunnisteita, kuten LVI-numeroita tai sähkönumeroita, ei ole mahdollista linkittää tietomallin objekteja tuotetietoon eikä hyödyntää niitä hankinnassa tai toimituslogistiikassa.

Tutkimus osoittaa, että vaikka teknologiset ratkaisut ovat olemassa, niiden laajamittainen käyttöönotto vaatii toimialan sisäistä yhteistyötä, standardointia ja järjestelmien yhteensopivuutta. Kehitettyä mallia voidaan käyttää tukena rakennusalan yritysten digitalisaatiossa ja toimitusketjujen kehittämisessä.

6 Lähdeluettelo

Arola T., Alhava O., täydennetty Ruottinen B., Alhava O.: Rakennusalan digitalisoituminen: toimitusketjun digitalisointi, RYHTI ja yhteentoimivuus -esitys, 12.6.2024 CC-BY 4.0, täydennetty Ruottinen B., Rakentamisen datataloudella. Rakentamisen kiertotalous: tiedon virtautus ja liiketoimintamallit, Building 2030 Kesäseminaari 29.8.2025

Alhava, O, Alaluusua, T., Pekkala, A., Peltokorpi, A., Aaltonen, A., , Pitkäranta, T. (2024). Challenges and Opportunities in Digitalising Concrete Element Supply Chain: proposed national Model. Proceedings of the 41st International Conference of CIB W78, Marrakech, Morocco, 2-3 October, ISSN: 2706-6568, <https://itc.scix.net/paper/w78-2024-119>

Alhava, O., Arola, T., Torro, O., Järvenpää, M., Järvinen, T., & Ruottinen, B. (2025, July). AI-Agent Application for Semantic Data Enrichment in Ventilation Systems Using National Nomenclature for IFC and GS1-Based Product Information.

Alhava, O., Oraskari, J., Arola, T., Järvinen, T., Järvenpää, M., & Ruottinen, B. (2025, July). BIM Data Content Guiding Takt Production Material Flow: IFC Meets MTS Supply Chain. In International Workshop on Linked Data in Architecture and Construction.

Alhava, O., Ruottinen, B., Haapasalo, H., Arola, T., Järvinen, T., ja Järvenpää, M. Miten suunnittelu, hankinta, toimitusketjun hallinta ja työmaatoiminta on digitalisesti rikki? (2025). <https://www.tietomallintaja.fi/2025/09/20/miten-suunnittelu-hankinta-toimitusketjun-hallinta-ja-tyomaatoiminta-on-digitalisesti-rikki/>, vierailtu 13.1.2026.

Alhava, O., Ruottinen, B., Peltokorpi, A., Siren, M., Aaltonen, A., & Pitkäranta, T. (2024). Advancing Digitalisation in Construction Through Automated Metadata Management and Machine Data Processing. In Proceedings of the 41st International Conference of CIB W (Vol. 78).

Aspeteg, J., Rehme, J., Gosling, J., & Holtström, J. (2025). Procurement for supply chain integration: responding to complexity in engineer-to-order defence projects. International Journal of Operations & Production Management, 45(13), 305-331.

Azcárate-Aguerre, J. F. (2023). Facades-as-a-Service: A cross-disciplinary model for the (re)development of circular building envelopes. [Dissertation (TUDelft), Delft University of Technology]. A+BE | Architecture and the Built Environment, 13(11), 1–270. <https://doi.org/10.7480/abe.2023.11.7061>

Belocchi, A., & Travaglini, G. (2023). A quantitative analysis of the European construction sector: productivity, investment, and competitiveness. <https://doi.org/10.4337/9781803924045.00009>. In: Rugiero, S., & Di Nunzio, D. (2023).

Digital Transitions and Innovation in Construction Value Chains. Cheltenham: Edward Elgar Publishing Ltd. <https://doi.org/10.4337/9781803924045>.

Bolboli, S. (2024). Rounding the Corner of Buildings by Implementing the Circular Economy; Developing a process model for construction using reused materials and enhancing it with advanced technologies. Aalto University School of Arts, Design, and Architecture.

Çetin, S., Gruis, V., & Straub, A. (2021). Towards circular social housing: An exploration of practices, barriers, and enablers. *Sustainability (Switzerland)*, 13(4), 1–24. <https://doi.org/10.3390/su13042100>.

Drews, P. and Schirmer, I. (2014) From Enterprise Architecture to Business Ecosystem Architecture: Stages and Challenges for Extending Architectures beyond Organizational Boundaries, IEEE 18th International Enterprise Distributed Object Computing Conference Workshops and Demonstrations, Ulm, Germany, 2014, pp. 13-22, doi: 10.1109/EDOCW.2014.12.

DVV (2025), Suomi.fi kehittäjille kokonaisarkkitehtuurikehys, Ohje, 31.1.2025, DVV/V/00103/2025, <https://cdn.verkkopalvelu.suomi.fi/files/Suomi.fi%20arkkitehtuurikehys%20v.%201.02-4068fcf80c89c984a159c5374a377e13.pdf>

European Commission, 2017. The European Interoperability Framework in detail. <https://interoperable-europe.ec.europa.eu/collection/iopeu-monitoring/european-interoperability-framework-detail>, viiailtu 13.1.2026.

Entra (2021). Reuse and transformation Findings report; KA13 - Kristian Augusts gate 13.

Gorgolewski, M. (2008). Designing with reused building components: some challenges. *Building Research & Information*, 36(2), 175-188. <https://doi.org/10.1080/09613210701559499>

Görsch, C. (2024). Learning to see flow: A worker-centric exploration towards task planning and control in construction. Helsinki: Aalto University. School of engineering. Department of civil engineering.

Harfeldt-Berg, M., & Olhager, J. (2024). The customer order decoupling point in empirical operations and supply chain management research: a systematic literature review and framework. *International Journal of Production Research*, 62(17), 6380-6399. <https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2314164>.

Haug, A., Ladeby, K. R., & Edwards, K. (2009). From Engineer-To-Order to Mass Customization. *Management Research News*, 32(7), 633-644. <https://doi.org/10.1108/01409170910965233>

Huuhka, S., Aarikka-Stenroos, L., Lahdensivu, J., Jonker-Hoffrén, P., Arnold, V., Stenberg, E., Blok, R., Gudmundsson,

Interoperable Europe (2025) [The European Interoperability Framework in detail, Interoperable Europe Portal](https://interoperable-europe.ec.europa.eu/collection/iopeu-monitoring/european-interoperability-framework-detail), <https://interoperable-europe.ec.europa.eu/collection/iopeu-monitoring/european-interoperability-framework-detail>, vierailtu 13.1.2025

Jussila, H. and Alhava, O. (2025). Tilaus-toimitusjärjestelmän sähköistäminen PEPPOL-käytönotolla, Pyöreä pöytä II 2025: Tekoäly vauhdittamaan toimitusketjun digitalisointia I Case: talotekniset tuotteet, Rakennustieto Oy, <https://www.rakennustieto.fi/tapahtumat/pyorea-poyta-ii-2025-tekoaly-vauhdittamaan-toimitusketjun-digitalisointia-i-case-talotekniset-tuotteet>, vierailtu 13.1.2026

Järvenpää, M. (2022). IFC4 ja Talotekniikka. <https://www.tietomallintaja.fi/2022/12/11/ifc4-ja-talotekniikka/>, vierailtu 13.1.2025.

K., Teuffel, P., & Mettke, A. (2023). Recreating the Construction Sector for Circularity. In *The Routledge Handbook of Catalysts for a Sustainable Circular Economy*, 42–66. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003267492-4>.

Jayasinghe, R.S., Rameezdeen, R. and Chileshe, N. (2019). Exploring sustainable post-end-of-life of building operations: A systematic literature review. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 26(4), 689–722. <https://doi.org/10.1108/ECAM-08-2017-0148>.

Järvelä, H., & Lehto, A. (2024). Design through Availability: Reform in the Architectural Design Process for Reuse. *Nordic Journal of Architectural Research*, 2024(1), 37–64. <http://arkitekturforskning.net/na/article/view/1314>.

Kiviniemi, M. (2024) Tuottavuusloikka teollistetun rakentamisen suunnittelussa case Lehto & Elvak, 30.5.2024

Kivikytö-Reponen, P. (Ed.), Orko, I., Muukkonen, R., Valtanen, K., Horn, S., Mölsä, K., Kaupila, T., Lavikko, S., Ilvesniemi, H., Pesonen, L., & Winqvist, E. (2022). *Data-Driven Circular Design: A Guide Book*. VTT Technical Research Centre of Finland. <https://doi.org/10.32040/2022.CircularDesignGuide>.

Kolinska, K., Domański, R., & Fojutowski, S. (2022). Supply chain digitization using GS1 standards: research results., *European Research Studies Journal*, Volume XXV, Issue 2B, 2022, pp. 326–335

Kozminska, U. (2019). Circular design: reused materials and the future reuse of building elements in architecture; Process, challenges and case studies. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 225, 012033.

Lee, C., Leem, C. S., & Hwang, I. (2011). PDM and ERP integration methodology using digital manufacturing to support global manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53(1), 399-409.

Matt, D.T., Dallasega, P., & Rauch, E. (2014). Synchronization of the Manufacturing Process and On-Site Installation in ETO Companies. *Procedia CIRP* 17 (2014), 457-462. doi: 10.1016/j.procir.2014.01.058.

Nußholz, J., Çetin, S., Eberhardt, L., De Wolf, C., & Bocken, N. (2023). From circular strategies to actions: 65 European circular building cases and their decarbonisation potential. *Resources, Conservation and Recycling Advances*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2023.200130>.

O'Brien, W.J., Formoso, C.T., Vrijhoef, R., & London, K. (Eds.) (2008). *Construction Supply Chain Management Handbook*. Boca Raton: Taylor & Francis Group. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420047462>

Potting, J., Hekkert, M., Worrel, E., & Hanemaaijer, A. (2017). *Circular economy: Measuring innovation in the product chain*. The Hague: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency.

Rakhshan, K., Morel, J. C., Alaka, H., & Charef, R. (2020). Components reuse in the building sector – A systematic review. *Waste Management and Research*, 38(4), 347–370. <https://doi.org/10.1177/0734242X20910463>.

RAVA3Pro (2023), Talotekniikan hankeosien tulokset, <https://kirahub.org/rava3pro-tate/>, vierailtu 13.1.2026

Riuttala, M., Harala, L., Aarikka-Stenroos, L., & Huuhka, S. (2024). How building component reuse creates economic value: Identifying value capture determinants from a case study. *Journal of Cleaner Production* 443(141112). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141112>.

Rudberg, M. and Wikner, J. (2004), "Mass customization in terms of the customer order decoupling point", *Production Planning & Control*, Vol. 15, No.4, pp. 445-58.

Ruottinen, B. ja Alhava, O. (2025), Vakiotuotteiden (MTS) toimitusketjun digitalisointi, Building 2030 -viikko, Rakentamisen kiertotalous 29.8., <https://building2030viikko.com/>, <https://www.youtube.com/live/9rGTEkoE2Oo?t=2334s>, vierailtu 13.1.2026.

Ruottinen B. and Alhava, O. (2026). Discussion on product's data requirements of taxonomy and environmental certificates. Presentation for global manufacturer, 9.1.2026

Ruottinen B. ja Ristimäki, M. (2025) Rakenteinen tieto edellytyksenä toimitusketjun digitalisoinnille, Pyöreä pöytä II 2025: Tekoäly vauhdittamaan toimitusketjun digitalisointia I Case:

talotekniset tuotteet, 20.5.2025, Rakennustiedon järjestämä keskustelusarja, <https://www.rakennustieto.fi/tapahtumat/pyorea-poyta-ii-2025-tekoaly-vauhdittamaan-toimitusketjun-digitalisointia-i-case-talotekniset-tuotteet>, vierailtu 13.1.2026

Saenz de Ugarte, B., Artiba, A., & Pellerin, R. (2009). Manufacturing execution system—a literature review. *Production planning and control*, 20(6), 525-539.

Schmitz, A., & Wimmer, M. A. (2023). Framework for interoperable service architecture development. *Government Information Quarterly*, 40(4), 101869.

Sitra (2025), Rakennusteollisuuden toimitusketju: ikkunatuoteteollisuus, 13.2.2025

Stricker, E., Brandi, G., Sonderegger, A., Design, I. O. C., & ZHAW School of Architecture, Design and Civil Engineering (Eds.). (2022). Re-use in construction: A compendium of circular architecture. Park Books.

Torro, O., ja Sormunen, P. (2025). Vakioitu tieto ja tekoäly talotekniikan datatalouden mahdollistajana: Talotekniikka 2030 TH12-hankkeen loppuraportti. <https://researchportal.tuni.fi/en/publications/vakioitu-tieto-ja-teko%C3%A4ly-talotekniikan-datatalouden-mahdollistaj/>, vierailtu 1.2.2026

Työ- ja elinkeinoministeriö (2025). Datatalouden kasvuohjelman pilotit ja showcase-esimerkit - AI Champion. <https://tem.fi/datatalouden-kasvuohjelman-pilotit>, vierailtu 13.1.2026

UNEP (2009). Buildings and Climate Change Summary for Decision-Makers Sustainable Buildings & Climate Initiative. Paris; UNEP DTIE Sustainable Consumption & Production Branch.

UNEP (2017). Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector. Global Status Report 2017.

Valtionkonttori (2025). Toimialakohtaiset Peppol-soveltamisohjeet. <https://www.valtiokonttori.fi/palvelut/valtion-konsernipalvelut/valtiokonttori-on-suomen-peppol-viranomaisen/#soveltamisohjeet>, vierailtu 13.1.2026.

Wilkinson, S. R., Alokala, M., Belhajjame, K., Crusoe, M. R., de Paula Kinoshita, B., Gadelha, L., ... & Goble, C. (2025). Applying the FAIR principles to computational workflows. *Scientific Data*, 12(1), 328.

Verhulst, Stefaan and Zahuranec, Andrew and Chafetz, Hannah, Moving Toward the FAIR-R principles: Advancing AI-Ready Data (March 04, 2025). Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=5164337> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5164337>

O Alhava, T Alaluusua, A Pekkala, A Peltokorpi, A Aaltonen, T Pitkäranta (2024). Challenges and Opportunities in Digitalising Concrete Element Supply Chain: proposed national Model. Proceedings of the 41st International Conference of CIB W78, Marrakech, Morocco, 2-3 October, ISSN: 2706-6568, <https://itc.scix.net/paper/w78-2024-119>

R Koivu (2025). Rakentamisen toimitusketjujen digitaalisen hallinnan maturiteettimalli. Diplomityö. Aalto-yliopisto. <https://aaltodoc.aalto.fi/server/api/core/bitstreams/coe48bdd-1b21-4e8a-b96d-a30eb633e9c0/content>

A Spirin (2024). The cost and management of tolerance problems in precast concrete structures. Diplomityö. Aalto-yliopisto. <https://aaltodoc.aalto.fi/items/52800b31-adaf-45ef-897e-97a8424e38fb>

