
Betonielementtien toimitusketjun digitalisoinnin haasteet ja mahdollisuudet: Ehdotettu kansallinen malli

Otto Alhava, otto.alhava@fira.fi

Fira Rakennus Oy, Helsinki, Finland

Teemu Alaluusua, teemu.alaluusua@aalto.fi

Aalto University, Helsinki, Finland

Antti Pekkala, antti.pekkala@fira.fi

Fira Rakennus Oy, Helsinki, Finland

Antti Peltokorpi, antti.peltokorpi@aalto.fi

Aalto University, Helsinki, Finland

Antti Aaltonen, antti.aaltonen@rt.fi

Confederation of Finnish Construction Industries RT (CFCI)

Tomi Pitkäranta, tomi.pitkaranta@sitedrive.com

Sitedrive Oy, Helsinki, Finland

Tiivistelmä

Tahtituotannon käyttöönotto ja yksiosaisen virtauksen soveltaminen rakennushankkeiden sisävalmistusvaiheessa on nostanut esille betonielementtirakentamisen runkovaiheen ongelmat. Virtauslogiikan käyttöönotosta huolimatta runkovaiheesta on syntynyt asuinkerrostalorakentamisessa pullonkaula läpimenoajan lyhentämiselle. Tutkimus paljasti, että runkovaiheen suunnittelu- ja toteutus kärsii prosessi ja tuotetiedon virtaamattomuudesta. Tutkimuksessa todettiin myös, että digitalisoinnin heikkoa tasoa lisäävä tekijä on elementtitoimitusketjun hallinnassa hyödynnetty keskitetty tietoarkkitehtuuri, joka on otettu käyttöön rakennustuoteteollisuudessa varasto-ohjautuvassa tuotannossa (engl. Manufacturing to the Stock, MTS). Koska betonielementtitoimitusketjut perustuvat erilaiseen tuotantologiikkaan, tilauksesta suunniteltavaan tuotantoon (engl. Engineer to Order, ETO), joka eroaa merkittävästi prosessi- ja tuotetiedon osalta MTS-arkkitehtuurista, esitetään tutkimuksessa malli kansalliseksi tai EU-tasoiseksi ratkaisuksi betonielementtitoimitusketjun suunnittelu- ja tuotetietoarkkitehtuuriksi. Case-tutkimuksen perusteella tutkimuksessa muodostettiin kansallinen referenssimalli hajautetun tietoarkkitehtuurin toteuttamiseksi ja yritysten välisen tiedonsiirron digitalisoimiseksi. Tutkimus toteutettiin osana rakennusalan kansallisen edunvalvontajärjestön projektia, jossa tavoitteena on digitalisoida betonielementtitoimitusketju. Tutkimustulokset ovat merkittäviä tutkittavalla markkina-alueella, sillä ne edistävät digitalisaation toteuttamista osoittamalla ETO-toimitusketjujen data-arkkitehtuurin toteutustavan ja mahdollistavat elementtiteollisuuden digitalisaatiossa saman kehityksen, jonka varastotuotteiden valmistussektori on jo saavuttanut toimitusketjun digitalisoinnissa, tukkukaupan toiminnassa sekä koneluennan ja automaattisen tietojenkäsittelyn käyttöönotossa.

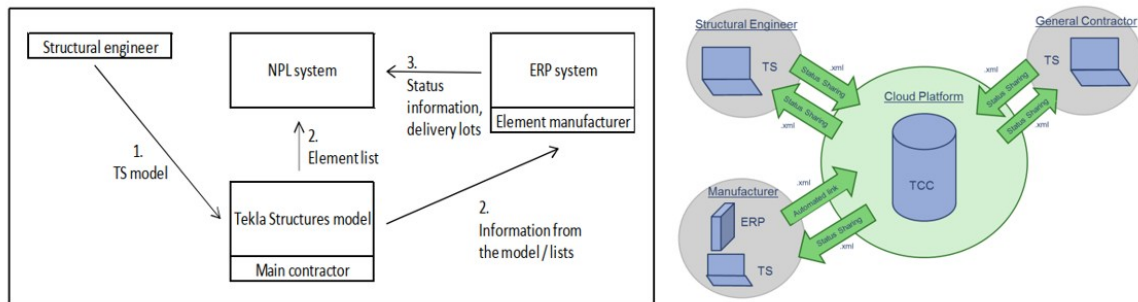
Avainsanat: hajautettu järjestelmä, betonielementti, digitalisaatio, toimitusketju, GS1, PEPPOL, ETO

1 Johdanto

Toimitusketjun hallinnassa nykyisin hyödynnettävien manuaalisten menetelmien ongelmat projektikohtaisten esivalmistettujen rakennustuotteiden tunnistamisessa, seurannassa ja paikantamisessa ovat kiehtoneet tutkijoita jo vuosien ajan (esim. Ergen ym., 2007). Työmaan ulkopuolella tapahtuvan esivalmistuksen ja rakennushankkeiden arvoketjun eri osapuolten välisten tiedonvaihdon integraatio ongelmien ratkaisemiseksi on ehdotettu useita teknologioita ja ratkaisuja, esimerkiksi RFID-tunnisteita (Ikonen ym., 2013), BIM-pohjaista arkkitehtuuria (Nissilä ym., 2014), keskitettyä tietokantaa (Ocheoha & Moselhi 2018), 4D BIM:ä (Bataglin ym., 2020) jne. Myös digitaalinen kaksonen ja rakennusvaiheen digitaalinen kaksonen (engl. Digital Twin Construction) sekä asianmukaiset työnkulut ja tietojärjestelmät on otettu käyttöön parantamaan tietoon perustuvan rakentamisen hallinnan puutetta (Sacks ym., 2020 ja Jiang ym., 2023). Kuitenkin tutkimusaukot, jotka on tunnistettu esimerkiksi Wangin ym. (2019) tutkimuksessa, ovat edelleen samat: automaattiset tiedonvaihdot ja prosessitiedon siirto puuttuvat, datan hyödyntäminen toimitusketjussa on vähäistä, toimitusten ja kuljetusten koordinoitumekanismi puuttuu, puhumattakaan palautteen välittämisestä työmaalta tehtaalle tai suunnitteluun.

Projektikohtaisesti esivalmistettavat tuotteet, kuten betonielementit, ovat tilauksesta suunniteltavaan tuotantoon (engl. Engineer to Order, ETO) perustavia tuotteita, joiden tuotantomäärät ovat pieniä ja tuotteiden väliset erot ovat huomattavia (Bellgran & Säfsen, 2010).

ETO-tuotantomenetelmän vuoksi betonielementtien valmistukseen liittyy paljon tuoteyksilökohtaista kustomointia, joka vaikuttaa toimitusketjuun, tämän vuoksi yksittäisten betonielementtien prosessitietoa tulisi seurata tuotannon, toimituksen ja asennuksen osalta aikana mahdollisten tuotannon viivästysten välttämiseksi (Ergen & Akinci, 2008). Kuten kuvasta 1 nähdään, ETO tuotantomenetelmällä valmistettavien rakennustuotteiden tiedonhallintaan ehdotettu ratkaisu on yleensä perustunut keskitettyyn järjestelmään.



Kuva 1. Logistiikan ohjausjärjestelmään (engl. Networking Platform for Logistics, NPL) perustuva ratkaisuehdotus vasemmalla (Jussila ym., 2012) verrattuna alustapohjaiseen keskitettyyn tietoarkkitehtuuriin. (Nissilä ym., 2014).

Vaihtoehtoinen ratkaisu ETO-toimitusketjun tiedonhallintaan on hajautetut tietojärjestelmät. Hajautetuille järjestelmille on useita määritelmiä, mutta yleisesti ottaen hajautettu järjestelmä tarkoittaa itsenäisten laskentaelementtien kokoelmaa, joka käyttäjille näyttäytyy yhtenä yhtenäisenä järjestelmänä. Tämä määritelmä viittaa kahteen keskeiseen piirteeseen hajautetuissa järjestelmissä: a) hajautettu järjestelmä koostuu laskentaelementeistä, joita voidaan käyttää itsenäisesti toisistaan riippumatta, ja b) käyttäjät (olivatpa he henkilöitä tai sovelluksia) uskovat työskentelevänsä yhden yhtenäisen järjestelmän kanssa. Tämä tarkoittaa, että itsenäiset solmut voivat jollain tavalla kommunikoida keskenään (Van Steen ja Tanenbaum, 2016).

Hajautettuja järjestelmiä käytetään laajalti Internet-pohjaisilla aloilla, kuten vähittäiskaupassa, verkkokaupassa, terveydenhuollossa, kuljetuksessa ja logistiikassa, elintarvikepalveluissa, teknisillä aloilla ja humanitaarisessa logistiikassa. Sama pätee

toimitusketjun standardeihin, kuten GS1 ja PEPPOL. GS1:n tavoitteena on luoda yhteinen perusta liiketoiminnalle yksilöimällä, tunnistamalla ja jakamalla automaattisesti tietoa tuotteista, sijainneista, omaisuudesta ja muusta vastaavasta tarpeellisesta informaatiosta yksiselitteisesti ja tarkasti. Global Trade Item Number (GTIN) on maailmanlaajuinen toimitusketjuratkaisu, joka yksilöi minkä tahansa kaupan kohteen, joka voidaan hinnoitella, tilata tai laskuttaa missä tahansa toimitusketjun kohdassa, josta on tarpeen hakea ennalta määritettyjä tietoja (GS1, 2023). Sen sijaan PEPPOL (Pan-European Public Procurement Online) on standardoitu kehys ja verkko, joka on suunniteltu mahdollistamaan sähköiset hankintasanomien välitys tehokkaasti ja turvallisesti kaikkialla Euroopassa ja kansainvälisesti. Se on joukko standardeja ja verkko, mikä mahdollistaa sähköisten hankinta- ja laskutusprosessien toteuttamisen Euroopassa ja sen ulkopuolella (Valtiokonttori, 2024).

Suomessa tehdään Valtiokonttorin johdolla kansallista digitalisointihanketta yritysten välistä tiedonsiirtoa varten. Hankkeen tavoitteena on laajentaa PEPPOL-standardiin perustuvan tilaus-toimitusketjun sanomavälityksen käyttöönottoa. Koska Valtiokonttori on OpenPeppol-yhdistyksen virallinen jäsen, se perusti Peppol-viranomaistoimintansa syksyllä 2022 (Valtiokonttori, 2024). Koska PEPPOL-standardi on yhteensopiva GS1-standardiperheen kanssa, tietosisältöjen harmonisoinnin tarkastelu on välttämätöntä kansallisen digitalisaation edistämiseksi. Samanaikaisesti Suomen kansallisissa tuotetietorekistereissä (LVI-info, RT-tuotetieto ja Sähkönumerot.fi) GS1/GTIN-tuotetunnisteiden osuus on jo yli 90 % MTS-tuotteissa.

Aalto-yliopisto on tutkinut rakennusalan toimitusketjujen digitalisointia vuodesta 2022 osana Building 2030 -konsortion toimintaa. Vuonna 2023 Rakennusteollisuus RT käynnisti hankkeen betonielementtien ja talotekniikan toimitusketjujen digitalisoimiseksi, ja tämä tutkimus on myös osa sitä. Hankkeen tavoitteena on edistää rakennusalan systeemistä muutosta kohti digitalisaatiota, jossa eri osapuolet voivat itsenäisesti toteuttaa järjestelmiään ja valintojaan. Toimitusketjun järjestelmien on oltava autonomisia, mutta niiden on toimittava yhtenäisenä järjestelmänä koko toimitusketjun näkökulmasta. Tämä edellyttää 1) rajapintojen määrittelyä avoimina standardeina tai olemassa olevien sovellettavien avoimien rajapintamäärittelyjen käyttöä. Tämä on välttämätöntä yhteentoimivuuden, siirrettävyyden ja laajennettavuuden kannalta (Van Steen ja Tanenbaum, 2016, s. 976-977). Näiden kolmen vaatimuksen täyttäminen on välttämätöntä, jotta toimittajista ja järjestelmistä riippumaton toteutus on mahdollista koko rakennus- ja rakennustuoteteollisuudessa. Rajapintojen määrittely edellyttää tietosisällön standardointia eli metatietojen määrittelyä kaikelle siirrettävälle tiedolle. Hajautetun järjestelmän toteuttaminen edellyttää tietoarkkitehtuurin määrittelyä. Toimitusketjujen yhteisesti määriteltujen metatietojen lisäksi on määriteltävä omistajuus eli se, minkä osapuolen on missäkin roolissa ylläpidettävä mitä tietoja ja annettava ne avoimen rajapinnan kautta muiden toimitusketjun osapuolten käyttöön. Tämän tutkimuksen tavoitteena on tunnistaa hajautetun järjestelmän komponentit ja validoida se järjestelmänä.

2 Menetelmät

Tutkimuksessa käytettiin tutkimusmenetelmänä suunnittelututkimusta, koska tavoitteena oli tunnistaa ja rajata ongelma ja kehittää uutta tietoa sen ratkaisemiseksi innovatiivisen artefaktin avulla (vom Brocke ym. 2020).

3 Ongelman määrittely ja artefaktin kehittäminen

3.1 Nykytila

Betonielementtien toimitusketju on digitalisoitu vain osittain. Rakennesuunnitteluvaiheessa tietomallin käyttöä ohjataan kansallisesti Yleisten tietomallivaatimusten 2012-sarjan 5 (COBIM S5, 2012) mukaisesti. Rakennesuunnittelustandardit määräävät käyttämään yksilöllisiä elementtitunnisteita, mutta eivät määrittele niiden tarkkaa muotoa. Standardi ohjeistaa myös aukkojen varausten tekemistä, törmäystarkastuksia ja erilaisten rakenteiden mallinnuksen

tarkkuutta. Suunnittelun ja tuotetiedon hallinnan kannalta standardin tulisi myös määritellä tietosisältöä.

Common BIM:n hankkeen rinnalla kansallisessa BEC-elementtisuunnittelun tietosisältöhankeessa laadittiin vuosina 2011-2012 betonielementtien 3D-mallinnusta, tietomallinnusta ja tiedonsiirtoa koskeva määritelmä, joka on noussut tosiasialliseksi standardiksi. Hankkeessa olivat mukana betonielementtiteollisuus, rakennesuunnittelijat ja Trimble Solutions Oy, ja ohjeistusta on kehitetty aktiivisesti. BEC hankkeessa laadittu elementtisuunnittelun mallinnusohje on edelleen rakennusalalla laajasti käytössä suunnittelijoiden, pääurakoitsijoiden ja elementtivalmistajien keskuudessa. Tämän tutkimuksen kannalta kriittisimmät de facto -standardit ovat IFC-mallin määrälaskenta (BEC IFC 2016), elementtisuunnittelun mallinnusohje (BEC 2012), elementin ominaisuussarja (engl. Element Property SET) (BEC PS, 2012) ja mukautetut ominaisuudet (engl. Custom Properties) (BEC CP, 2023). Näissä standardeissa määritellään rakennevaiheen tietomallinnuksessa käytettävät elementtityyppikohtaiset tiedot, joilla varmistetaan, että elementtien suunnittelu, valmistus ja määrälaskenta voidaan toteuttaa tietomallia käyttäen, jossa siirtoformaattina on IFC.

Kansallisista standardointipyrkimyksistä ja tietomallintamisen laajasta käytöstä huolimatta 2D-piirustukset ovat edelleen ensisijainen tietolähde teollisuudessa ja rakennustyömailla. Toimitusketjussa organisaatioiden välinen tiedonvaihto perustuu pääasiassa sähköpostiin, puheluihin, WhatsAppin käyttöön ja yhteisiin hankeasiakirjavarastoihin (Peltokorpi et al., 2023). Tämän seurauksena tuotannon ja toimitusten tilan tilannetietoisuus on toimitusketjun hallinnan kriittisin asia. Ongelmaa pahentaa se, että betonielementtien toimitusketju ETO-toimitusketjuna kasautuu virheitä, jotka reaaliaikaisen seurannan puuttuessa johtuvat lähtötietojen ja suunnittelun puutteista, valmistusvirheistä, lastaus- ja kuljetusvirheistä, asennusvirheistä, koordinoinnin puutteesta, hitaasta tiedonvaihdosta ja puutteellisesta dokumentoinnista (Alaluusua, 2023). Yksi tähän tutkimukseen osallistuneista yrityksistä suoritti mittauksia kesäkuusta elokuuhun 2022 selvittääkseen virheiden määrää ja niiden aiheuttamia häiriöitä. Näiden mittausten tulokset on esitetty taulukossa 1. Taulukosta käy ilmi, että edellä mainituissa tutkimuksissa havaitut virheet kasautuvat työmaalla.

Taulukko 1. Virheiden määrä rakennusvaiheen mittauksissa neljällä eri rakennustyömaalla. Mittausjakso: 50 työpäivää yhteensä. Vähäinen häiriö: Työ muuttuu hieman haastavammaksi tai hidastuu hieman. Häiriön kesto on usein alle 30 minuuttia. Haitallinen: Työ hidastuu merkittävästi tai vaatii kalliita toimenpiteitä - kesto yli 30 minuuttia. Vakava: Työ pysähtyy kokonaan, vaatii kalliita toimenpiteitä tai aiheuttaa turvallisuusriskin - kesto yli 2 tuntia.

Vika kohteessa	Vakava	Haitallinen	Vähäinen	Yhteensä	Osuus
Asennus työmaalla	2	4	12	18	12%
Elementin kuljetus työmaalle	10	13	15	38	26%
Muut toimitukset	5	3	0	8	5%
Mittaukset	0	1	2	3	2%
Nosturit ja nostot	5	0	2	7	5%
Suunnittelu	4	9	8	21	14%
Työmaan logistiikka	0	5	5	10	7%
Elementtien valmistus	9	11	22	42	29%
Yhteensä	35	46	66	147	
Osuus	24%	32%	45%		

Yritys tilasi opinnäytetyön selvittääkseen mittauksissa esiin tulleiden virheiden juurisyyt. Työn keskeiset tulokset olivat: 1) toimitusketjun yleinen integraatiotaso on tällä hetkellä alhainen pääurakoitsijan ja tavarantoimittajien välillä, 2) toimitusketjun prosessien standardointi puuttuu, 3) tiedonvaihto ja työnkulku eri osapuolten välillä on riittämätöntä ja 4) pääasiallinen tiedonsiirtotapa toimitusketjun eri osapuolien välillä on sähköposti tai puhelinsoitto. (Makkonen, 2023).

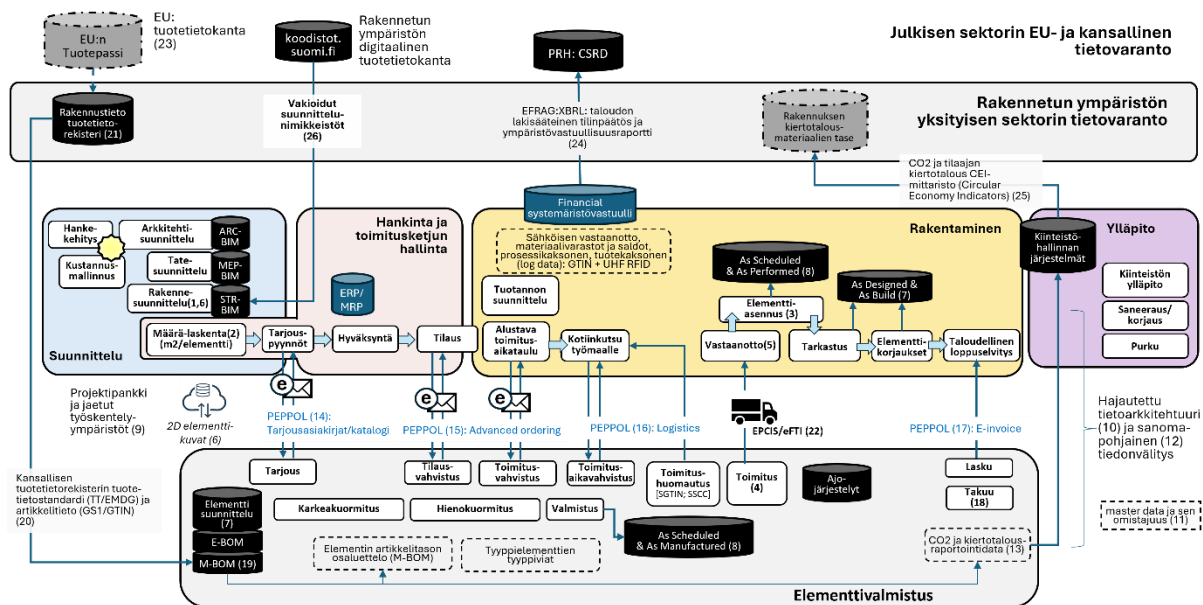
3.2 Artefaktin kehittäminen (tavoitila)

3.2.1 Yksilöllisen tunnistetiedon määrittäminen tuoteyksilölle (betonielementin yksilöinti)

Ensimmäinen ja tärkein tutkimuksessa tehty päätelmä on, että jokainen betonielementti on pohjimmiltaan yksilö koko toimitusketjun näkökulmasta, kuten alla olevassa kuvassa 2 esitetään. Vaikka rakennuksissa käytetään useita identtisiä betonielementtejä, jotka ovat periaatteessa vaihdettavissa, jokainen niistä on silti yksilöitävä: tietty elementti on valmistettava ja toimitettava asennettavaksi tiettyyn kohtaan rakennuksessa. Yksittäisten betonielementtien yksilöllinen tunnistaminen on tärkeää myös prosessitiedon hallinnan kannalta. Esimerkiksi tietty betonielementti voi olla varastoituna jälkikäsittelypaikassa tai odottamassa nostoa elementtelineessä työmaalla. Tämä tieto (tapahtumatieto) on olennainen toimitusketjun hallinnan kannalta.

Tunnistamisen tarve korostuu entisestään, kun tuotannossa on useita samankaltaisia, mutta ei täysin samanlaisia elementtejä (vaikka ne saattavat esimerkiksi sijaita täsmälleen samassa paikassa päällekkäisissä kerroksissa). Valmistuksen kannalta on olennaista tunnistaa, mitkä elementit ovat identtisiä ja mitä poikkeamia tiettyjen yksiköiden välillä on, jotta tuotannon karkea- sekä hienokuormitus voidaan suunnitella tehokkaasti ja jotta kriittiset tiedot voidaan välittää tehtaan sisäiselle logistiikalle ja tuotantopisteen työntekijöille. Tutkimuksessa todettiin, että suunnitteluohjelmisto mahdollistaa kahden tunnistekoodin käytön suunnitteluvaiheessa (1). Molemmat ovat kuitenkin valmistajakohtaisia eivätkä perustu julkisesti saatavilla oleviin standardeihin. Koska tutkimuksessa pyritään välttämään toimittajariippuvuutta (engl. vendor lock-in), ratkaisun on perustuttava avoimeen standardiin.

Digitalisoidun elementtitoimitusketjun tietovarannot, rajapinnat ja prosessin tärkeimmät toiminnot



Kuva 2. Betonielementtien toimitusketjun tietovarannot, kansallisessa mallissa ehdotetut standardit, tietovirrat sekä elementtien suunnittelun, hankinnan, valmistuksen, toimituksen ja asennuksen keskeiset prosessivaiheet.

Tuottavuuden parantamisen ja laadunvalvonnan näkökulmasta virheet on tunnistettava työmaalla jokaisen elementin osalta erikseen. Näin betonielementtitehtaalla voidaan tehdä tarvittavat tarkastukset ja säädöt nopeasti, jotta voidaan estää virheen leviäminen tuotannossa tai korjata vialliset elementit ennen toimitusta. Kun tuotteen yksilölliset tunnistetiedot on määritelty tälle tasolle kaikkien elementtien osalta, voidaan valita sopivat tunnistusmenetelmät GS1-standardiperheestä (kuten jäljempänä 4.1.1. taulukossa 2 esitetään). Jos määrälaskenta suoritetaan elementtitasolla ja elementtien suunnittelupiirustukset sisältyvät tarjouspyyntöön, ne on yksilöitävä informaatiomallissa (BIM) ja tuotantosuunnitelmissa vastaavilla tunnisteilla (2).

3.2.2 Tunnistusmenetelmien määrittäminen tuoteyksilölle (betonielementtien tunnistaminen).

Toimitusketjujen tehokkuus edellyttää tietojen automaattista käsittelyä, minkä vuoksi tunnistekoodien on oltava koneellisesti luettavissa. Tässä tutkimuksessa pyrittiin löytämään tähän tarkoitukseen sopiva tiedonkantaja ja tämän koneellisen tunnistamisen standardi GS1-standardiperheestä. Tutkimuksessa vertailtiin GS1-standardin tukemia viivakoodia, 2D-koodia ja RFID- teknologiaa. Koska betonielementit on tunnistettava myös asennuksen jälkeen (3) sisävalmistusvaiheen aikana, looginen valinta tiedonkantajan suhteen on RFID-tunniste nykyisten manuaalisesti kirjoitettujen tai viivakoodilla varustettujen koneellisesti luettavien tunnistekoodien sijaan.

RFID- teknologia sopii erinomaisesti elementtien koneelliseen tunnistamiseen vaikeissa työmaolosuhteissa, myös työturvallisuuden näkökulmasta. RFID-tunnisteiden käyttö tiedonkantajina eivät sulje pois ihmisten tekemien merkintöjen mahdollisuutta, jotka yleensä tehdään elementtitehtaalla värikynillä tai tusseilla suoraan elementtiin. RFID-teknologian käyttö ei myöskään rajoita muiden tunnistusmenetelmien käyttöä, joissa sama tietosisältö on esitetty esim. 2D viivakoodissa (GS1 DataMatrix). Tutkimuksen perusteella pääteltiin, että RFID-koodit ratkaisevat käytettävyyssongelmat, jotka tyypillisesti liittyvät erilaisten elementtien asentamiseen: RFID-tunnisteet voidaan lukea myös sen jälkeen, kun elementti on asennettu lopulliseen paikkaansa rakennuksessa. Nykyisin käytettävien elementtien liitosten raudoituksiin tai elementin pintaan kiinnitettävien lapputunnisteiden ongelmana on niiden poisto asennuksen yhteydessä, jolloin niiden sisältämä tieto katoaa. Sama pätee elementteihin kirjoitettuihin teksteihin, sillä ne on yleensä sijoitettava liitosten peittämille alueille, jotta ne ovat luettavissa toimituksen (4), purkamisen ja työmaavarastoinnin aikana (5). Sopivin tekniikka tähän tarkoitukseen on passiivinen UHF-RFID-teknologia, koska se ei vaadi paristovarmennusta, sen lukuetaisyys on useita metrejä ja sen datakapasiteetti on riittävä tähän tarkoitukseen.

3.2.3 Yksilöintikoodien avulla siirrettävien suunnittelu- ja tuotetietojen tietosisällön määrittely (Elementtityyppien metatiedot)

Globaalien standardien käyttäminen yksilöintimenetelmissä ja -ratkaisuissa mahdollistaa muiden teollisuudenalojen teknologioiden ja ohjelmistojen hyödyntämisen betonielementtien toimitusketjun digitalisoimisessa. Tutkimus osoitti, että toimitusketjun digitalisointiin kuuluu olennaisesti yksilöintitietojen välittäminen standardoitujen tietokenttien ja -muotojen avulla suunnittelu- (6), tuote- (7) ja prosessitietojen (8) välittämiseksi. Yksilöllinen tuotekoodi on vain avain asiaan liittyvien tuote-, suunnittelu- tai prosessitietojen (eli tapahtumatietojen) välittämiseen. Viivakoodit ja RFID-tunnisteet ovat menetelmiä, joilla yksilölliset tunnistuskoodit voidaan tunnistaa nopeasti ja koneellisesti.

Osana tutkimusta toteutetuissa betonielementtituotteiden prosessikuvaustyöpajoissa tunnistettiin useita käyttötapauksia ja vakiintuneita asiakirjoja, joiden kautta tietoja vaihdetaan sähköpostin, lisääntyvässä suosiossa olevan MS Teams -yhteistyöympäristön ja hankeasiakirjojen tallennuspaikkojen avulla (9). Näiden korvaaminen sähköisellä tiedonsiirrolla edellyttää keskeisten suunnittelu-, tuote- ja prosessitietojen tunnistamista ja standardointia.

Käytännössä näiden tietojen määrittely on edellytys sille, että ETO-tuotteiden (Engineer-to-Order) tuotantoon, logistiikkaan ja asennukseen valmistusteollisuudessa käytettäviä ohjelmistoratkaisuja voidaan soveltaa rakennusallalla ja elementtien toimitusketjussa. Rajoituksena on, että betonielementtiteollisuuden ja rakentamisen siirtyminen digitaaliseen tiedonsiirtoon edellyttää muutakin kuin pelkkää tuotteen yksilöintiä ja tunnistamista. GS1-koodin avulla tapahtuva tuoteyksilöinti mahdollistaa tiettyyn tuoteyksilöön (eli tiettyyn betonielementtiin) liittyvien tietojen hakemisen käyttämällä yksilöintikoodia avaimena samalla tavalla kuin se mahdollistaa tehokkaasti sellaisten tietojen tuottamisen, jotka voidaan yhdistää tiettyyn betonielementtiin yksilöintikoodin avulla.

RFID-tunnisteiden tai viivakoodien käyttö tiedonkantajana ratkaisee ongelman, joka liittyy siihen, että nämä tiedot voidaan määrittää koneellisesti ja tarvittaessa automatisoida tietojen haku tai tuottaminen. Asianmukainen ja liiketoiminnalle merkityksellinen tiedonsiirto betonielementtien toimitusketjussa edellyttää kuitenkin seuraavaa askelta: elementtityyppikohtaisten tuote- ja prosessitietojen metatietojen määrittelyä.

3.2.4 ETO-toimitusketjussa toteutettu hajautettu tietoarkkitehtuuri

Toinen keskeinen havainto betonielementtien toimitusketjun tiedonhallintaan liittyvän väliseinäelementin prosessitarkastelun perusteella on se, että prosessin suorituskyvyn kannalta olennainen tieto jakautuu voimakkaasti eri osapuolten kesken. Tämä vahvistui myös käyttötapaustesteissä. Osapuolet tuottavat prosessitietoa betonielementtien edetessä toimitusketjussa, mutta manuaalisen toimintatavan vuoksi sitä ei ole saatavilla koneellisesti siirrettävässä muodossa. Prosessin eri vaiheita koskevat tiedot pysyvät eristyksissä kunkin yksikön tai organisaation osan sisällä. Tämän seurauksena toimitusketjusta on mahdotonta luoda kokonaistilannekuvaa, koska prosessitiedot ovat hajanaisia. Näin ollen tällä hetkellä on myös mahdotonta saada tietoa toimitusketjun osan suorituskyvystä. Prosessin eri vaiheissa tarvitaan tietoja esimerkiksi kuormien sisältämistä elementeistä, lastausjärjestyksestä ja tavoitelluista saapumisajoista. Nykyisissä prosesseissa näiden tietojen siirtämisestä eri muodoissa, kuten Excel/PDF-tiedostoina, jotka on merkitty 2D-piirustuksiin tai CSV-muodossa, sovitaan hankekohtaisesti.

Toimitusketjun tehokkuus edellyttää sitä, että osa tiedoista on muiden sidosryhmien saatavilla tai että ne toimitetaan automaattisesti muutosten ja poikkeamien varalta. Jos esimerkiksi elementin asennus epäonnistuu paikan päällä, elementin valmistuspiirustuksen on oltava nopeasti saatavilla paikan päällä, jotta tarvittavat korjaukset voidaan tehdä mahdollisimman pian. Tarvittavat ajantasaiset tiedot ovat saatavilla tehtaalla, joten elementtipiirustuksen tulisi olla valmistajan tuotantopiirustus, jota ylläpidetään ja jaetaan valmistajan järjestelmistä. Samoin tehtaalla tulisi luokitella viat valmistusprosessinsa perusteella. Muuten vikatioiden käsittelyn automatisointi on haastavaa. Tällöin tehdas määritteli vikatyypit kullekin elementtityypille, ja jatkojalostusprosessi käyttäisi näitä ennalta määriteltyjä vikatyyppejä. Tämän seurauksena jatkojalostusprosessi tuottaisi standardoitua ja vertailukelpoista tietoa toimitusketjun tehokkuuden arvioimiseksi. Tämä on mahdotonta, koska yksittäiset työntekijät määrittelevät tiedot itse ja käyttävät vikailmoituksiin ensisijaisesti WhatsAppia tai puutelistatyökalua. Toisin sanoen tilanteessa syntyvän tiedon käsiteltävyys edellyttää, että tehdas säilyttää elementtityypille tyyppilliset viat nimikkeinä, jolloin ne ovat välittömästi käytettävissä paikan päällä vianetsinnässä ja vikatioiden muodostamisessa. Näin varmistetaan, että vikatilanteet ratkaistaan nopeasti ja että vikatilanteiden ratkaisemiseksi tuotettu tieto on laadukasta koneellista jatkokäsittelyä varten. Tämä mahdollistaa virheiden eristämisen ja tietoon perustuvan tuottavuuden parantamisen elementtituotannossa.

Tuote- ja suunnittelutietojen hanke- ja tilannekohtaisuuden perusteella kolmas tutkimusarkkitehtuuriin liittyvä päätelmä on, että konkreettisten elementtien toimitusketjun tiedonhallinta edellyttää hajautettua tietoarkkitehtuuria (10). Hajauttaminen on välttämätöntä, jotta voidaan ratkaista tehoton toimitusketjun hallinta ja korvata manuaaliset sovellukset, kuten WhatsApp ja sähköposti, tiedonsiirtomenetelminä. Hankekohtaiset ratkaisut mahdollistavat rakennuksen rungon pystyttämisen ja siihen liittyvien kysymysten ratkaisemisen ad hoc -viestintämenetelmien avulla. Silti nämä tapauskohtaiset menettelyt estävät tehokkaasti alan kehitystä. Hankkeet tuottavat tietoa toiminnallisesta suorituskyvystä vain keräämällä sitä manuaalisesti, eikä yksikään osapuoli voi investoida tiedonkeruuseen yksin, koska tiedot pysyvät merkityksellisinä vain yksittäisen hankkeen osalta, mikä johtaa alioptimointiin jatkuvasti vaihtuvien osapuolten ja rakennustyyppien vuoksi. Sen vuoksi hajautetun arkkitehtuurin määrittely (10) on olennaisen tärkeää sen varmistamiseksi, että prosessitiedot palvelevat koko toimitusketjun toiminnan ja tuottavuuden kehittämistä.

3.2.5 Master Data -määrittely, joka mahdollistaa ETO-toimitusketjun hajautetun tietoarkkitehtuurin

Osana tutkimusta tehty case-analyysi osoittaa, että hajautettu arkkitehtuuri edellyttää päätietojen omistajuuden määrittelyä (11). ETO-toimitusketjun digitalisointi edellyttää muutakin kuin avointen rajapintojen ja metatietojen määrittelyä. Suunnittelu-, tarjouspyyntö-, hankinta- ja tuotantosuunnitteluprosessit sekä varsinaiset valmistus-, varastointi-, toimitus- ja asennusprosessit tuottavat niin merkittävän määrän sekä tuote- että prosessitietoa, että on olennaisen tärkeää määritellä, mikä taho on vastuussa kunkin tiedon tuottamisesta, tallentamisesta ja ylläpidosta. Koska osa näistä tiedoista on siirrettävä toiselle osapuolelle, kuten asiakkaalle, projektin päätyttyä, tietojen omistajan on myös tarjottava palvelu, jolla tiedot

siirretään projektin päätyttyä jäsennellyssä muodossa. Lisäksi hajautetun betonielementtien toimitusketjun toiminta edellyttää toimintojen määrittelyä tiedon hakemista varten ja metatietojen määrittelyä tiedon tallentamista varten. Tutkimuksesta tehtyjen johtopäätösten mukaan masterdatan hallinnan on sisällettävä a) tiedon omistajuus, b) metatietojen määrittelyt, c) rajapintamäärittelyt tiedon hakemista varten (client pull) ja d) sen määrittely, mitkä tiedot on siirrettävä automaattisesti toiselle osapuolelle (server push).

3.2.6 Hajautetun tietoarkkitehtuurin edellyttämä viestipohjainen tiedonsiirto

Neljäs artefaktissa kehitetty merkittävä ominaisuus on tiedonhallinta betonielementtien toimitusketjussa. Kuten viimeaikaisissa tutkimuksissa on todettu, keskitetyn ratkaisun sijaan se on toteutettava viestipohjaisena järjestelmänä (12). Tämä päätelmä seuraa käytännössä itse hajautettua tietoarkkitehtuuria. Verrattuna muihin rakennusteollisuuden tärkeimpiin tuotantomenetelmiin, MTS-tuotteiden käyttöön, jossa käytetään standardoitua tuotetunnistusta ja keskitettyä tuotetiedon hallintaa vain lukutyypisten avointen rajapintojen avulla, ETO-tuotteiden suunnittelu-, tuote- ja prosessitietoja ei voida hallita vastaavalla keskitetyllä arkkitehtuurilla. Eroa selittävät tiedon määrä, tiedon elinkaari ja käyttäjien määrä.

MTS-tuotteiden tuotetiedot pysyvät yleensä samoina koko tuotteen elinkaaren ajan, yleensä vuosia. Samaa tuotetta ja siten sen tuotekohtaisia tuotetietoja käytetään sadoissa, ellei tuhansissa, projekteissa, jolloin tiedoilla on monia käyttäjiä, ja tiedot voidaan myös tallentaa yrityksen järjestelmiin. MTS-tuotteita ei myöskään tyypillisesti yksilöidä erikseen artikkelitasoa pidemmälle, mikä tarkoittaa, että MTS-tuotteita tilataan ja käytetään määrien perusteella, eikä yksittäisiä tuotteita tarvitse yksilöidä tai seurata valmistuksesta asennukseen. Esimerkiksi tulevan EU-lainsäädännön edellyttämän hiilijalanjäljen (13) laskemiseksi tai digitaalisen luovutuksen toteuttamiseksi riittää, että tiedetään, kuinka monta artikkelia on käytetty ja missä paikassa rakennuksessa. Ero elementtikohtaiseen tunnistamiseen on siis merkittävä. Betonielementtien toimitusketjussa yksittäiseen elementtiin liittyvän tiedon määrä on huomattava, ja sekä tuote- että prosessitietoa kertyy prosessin aikana merkittävästi kunkin komponentin osalta. Samanaikaisesti tiedon vastaanottajien määrä on vain pieni. Tämän vuoksi keskitettyä tiedonhallintaratkaisua ei voida soveltaa.

4 Artefaktin validointi - tavoitetila

Artefaktin validoinnin aikana betonielementeille määritettiin minimitietovaatimukset tuoteyksilöinnin osalta. Tuoteyksilöintiä verrattiin GS1 Norwayn julkaisemaan ohjeeseen (GS1, 2018). Nämä tiedot sovitettiin GS1-standardiperheen tukemaan RFID-teknologiaan, jotta varmistettiin, että tietovälineen datakapasiteetti oli riittävä.

Tietosisällön ja tietoarkkitehtuurin validoimiseksi luotiin ensin käsitteellinen malli, jota verrattiin CESC-hankkeessa tehtyihin prosessikuvauksiin ja julkaistuihin tutkimuksiin. Prosessikuvausten perusteella valittiin käyttötapaukset, joiden avulla mallinnettiin hajautettua tietoarkkitehtuuria ja sen toimintaa tapauksittain. Käyttötapauksen esimerkkisanomia verrattiin PEPPOL-standardin mukaisiin sanomiin (14) (15) (16) (17).

4.1 Validoinnin tulokset

4.1.1 Yksilöllisen tunnistetiedon määrittäminen tuoteyksilöä ja koneluentaa varten

Artefaktin validoinnin aikana rakennesuunnitteluohjelmiston GUID-tunnusta verrattiin GS1:n julkaisemaan ohjeistukseen, jonka perusteella päätettiin soveltaa GS1:n kolmitasoista tuoteyksilöintimenetelmää. Validoinnin mukaan tämä mahdollistaa 1) yksittäisten elementtien yksilöllisen tunnistamisen, 2) identtisten yksiköiden nimeämisen valmistusvaiheessa ja 3) lähes identtisten yksiköiden erottamisen. Tällä tavoin sarjanumero voi osoittaa lähes samanlaisten elementtien väliset erot.

Validoinnissa todettiin myös, että Suomessa käytetty elementtitunnus ja suunnitteluohjelmiston GUID-tunnus olisi lisättävä RFID-tunnistukseen, vaikka nämä yksilöivät koodit sisältävätkin päällekkäistä informaatiota. Taulukossa 2 on esimerkkejä betonielementtien tunnistekoodista. RFID-käyttötapauksen validointi rakennustyömaalla viivästyi alkuperäisestä aikataulusta, joten validoinnin tätä osaa ei voitu suorittaa.

Taulukko 2. GS1 application identifiers (AI) to identify engineer-to-order products. GTIN, MTO variation number and serial number form layer 3 GS1 identifier. Finnish element classification identifies all elements from a group of identical elements. GUID is the design object ID generated during the design phase by the concrete element design software

GS1-sovellustunnukset (AI)	Example
(01) GTIN-koodi	064000001000247
(242) MTO varianttinumero	123456
(21) Sarjanumero	12345678910
(91) Kansallinen elementtitunnus	V1001
(92) GUID	ba34cf17-0c4b-4c6f-929cae05aa74ad45

4.1.2 BEC2012:ssa määriteltyjen elementtityyppien metatietojen validointi

Validointi osoitti, että betonielementtien suunnittelu- ja valmistustietojen kansallinen ohjeistus, joka toteutettiin kansallisena BEC2012-hankkeena vuosina 2011–2012, sisältää jo riittävästi elementtityyppikohtaisia tietokenttiä, jotta betonielementtien toimitusketjun digitalisointi voidaan aloittaa. Käyttötapaustutkimuksen osalta havaittiin, että jotkin BEC:ssä tehdyt elementtityyppikohtaiset tietosisältömäärittelyt eivät ole vielä riittävän kattavia asianmukaiseen koneelliseen käsittelyyn. Vaikka tätä tosiasiallista standardia on sovellettu jo yli kymmenen vuotta, joihinkin tietokenttiin on määriteltävä formaatit, sallitut arvojoukot tai yksiselitteisesti määritellyt tietosisältövaihtoehdot. Tämä johtuu siitä, että toimitusketjun tietosisältöä ei ole vielä käsitelty koneellisesti, vaan siihen on aina osallistunut ihminen, joka korvaa automaation puutteen. Näitä metatietomäärittelyjä on siis täydennettävä osana kansallista hanketta. Kuvassa 3 on esimerkki puutteellisesta metatietomäärittelystä.

Tekla Structures	Solibri/Tocoman BIM/IFC	Description
Primary Material		
Volume of Concrete Parts /m ³		Volume of concrete parts in the assembly (in-situ or precast); parts made from non-concrete materials are not included.
Weight / t	Weight of the element.	The weight of the element is calculated using the formula 2500kg/m ³ * volume of concrete parts + weight of the insulation.
Insulation	Wall element, insulation material.	Insulation material.
Insulation Thickness / mm	Wall element, insulation thickness.	Inner Shell Thickness / mm
Wall element, inner shell thickness.		
Outer Shell Thickness / mm	Wall element, outer shell thickness.	

Kuva 3. Elementtietojen validoinnissa havaittiin puutteellisia metatietomäärittelyksiä, jotka on korjattava hanketta varten. Tyypillisiä puutteita ovat kuvaus, sallitut arvot, arvoalue tai sallitut vaihtoehdot.

4.1.3 Sanomapohjaisen tiedonsiirron ja tietoarkkitehtuurin validointi

Tutkimuksessa havaittiin, että osa suunnittelu- ja tuotetiedoista voidaan siirtä a projektin sovittujen vaiheiden mukaisesti. Kuitenkin, toimitusketjun ongelmatilanteissa tietojen on oltava siirrettyä vissa kaksisuuntaisesti kaikkien osapuolten va lilla ja jokaisen elementin osalta. Näin ollen tietoa tuotetaan ja tarvitaan reaktiivisesti prosessin aikana. Ratkaisevin ero on se, että betonielementtitiedon käyttäjien määrä on minimaalinen verrattuna MTS-tuotteisiin ja että yksittäisten elementtituotteiden ja prosessitietojen käyttöikä on hyvin lyhyt, vain muutama kuukausi suunnittelusta valmistuksen kautta asennukseen. Tämän ajanjakson jälkeen suurin osa tiedoista siirretään digitaalisesti asiakkaalle. Samaa aikaan valmistaja ja rakentaja säilyttävät osan tiedoista takuutarkoituksiin (18). Keskitetyn tiedonhallinta-arkkitehtuurin käyttäminen ei ole tiedonhallinnan ja tiedon elinkaaren luonteen vuoksi taloudellisesti eikä teknisesti mahdollista, ja tehokkain toteutus tiedonsiirtoa varten on sama kuin sähköistetyissä tilaus-toimitusketjuissa ja verkkolaskutuksessa (eli sanomaperusteinen toteutus).

4.1.4 Hajautetun tietoarkkitehtuurin edellyttämä sanomapohjainen tiedonsiirto

Sanomapohjainen viestintä edellyttää tietojen ja tietosisällön standardointia koko suunnittelu-, valmistus-, toimitus- ja kokoonpanoprosessin ajan sekä käyttötapausten määrittelyä niihin

liittyvien tapahtumien tunnistamiseksi. Tutkimuksessa yksilöitiin 24 käyttötapausta ja niihin liittyviä tapahtumia. Kun tutkittiin vain kantavien elementtien koko prosessia, tunnistettiin yli 50 tarvittavaa viestiä tai viestityyppiä.

Tämän vuoksi tutkimuksessa tutkittiin PEPPOL-sanomien käyttökelpoisuutta ja pääteltiin alustavasti, että näitä sanomia voitaisiin hyödyntää joissakin liiketoimissa. Todettiin kuitenkin myös, että betonielementtien toimitusketjuun kuuluu sellaisten tietojen välittäminen, joita PEPPOL-tilaus-toimitusketjun sanomastandardi ei suoraan tue. Kuvassa 4 on esimerkki elementin kotiinkutsua koskevasta validoidusta transaktiosta.

Peppol BIS version 3 - November 2023 Release				
Peppol BIS Ordering 3.3				
Peppol Order transaction 3.4 (T01)				
INFORMATION REQUIRED FOR A CALL-OFF MESSAGE				
Peppol message hierarchy level	Description	Comment	PEPPOL Syntax name	Peppol description
Header	Project number		cac:ProjectReference / cbc:ID	
Header	Ordering party		cac:BuyerCustomerParty	
Header	Selling party		cac:SellerSupplierParty	
Header	Delivery address ID		cac:Delivery / cac:DeliveryLocation / cbc:ID	
Header	Delivery address name		cac:Delivery / cac:DeliveryLocation / cbc:Name	
Header	Delivery address		cac:Delivery / cac:DeliveryLocation / cac:Address	
Header	(Delivery terms)		cac:DeliveryTerms	
Header	Shipping identification codes (e.g. SSCC)	pre-assembled load	cac:Shipment / cbc:ID	
Header	Ordering party order number		ubl:Order / cbc:ID	
Header	Order type: call-off		cbc:OrderTypeCode	
Header	Kommentti		cbc:Note	
Header	Delivery date		cac:Delivery / cac:PeriodStart / cbc:StartData	

Kuva 4. PEPPOL BIS Ordering 3.3:n ja Order Transaction 3.4:n sanomatyypeillä toteutettujen kotiinkutsu-käyttötilanteen sanomien validointi.

Betonielementtien toimitusketjussa olisi hyödynnettävä PEPPOL-standardia, mutta on myös valmistauduttava täydentämään siirrettyjä tietoja mukautetuilla viesteillä tai viestien sisällöllä. PEPPOL sisältää laajennuksia, joita voitaisiin hyödyntää. Kuten sähköön myynnin ja toimituksen digitalisoinnissa GS1:n osalta, betonielementtien toimitusketjussa on kuitenkin todennäköisesti määriteltävä erityisiä toimitusketjuun liittyviä täydennyksiä sanomien välittämistä varten. PEPPOL-standardin noudattaminen on edellytys sanomaoperaattoreiden käytölle, joten mahdollisten laajennusten on oltava yhteensopivia PEPPOL-standardin kanssa.

5 Pohdinta ja tutkimustyön jatkaminen

Osana tutkimusta validoitiin myös elementtitehtaiden materiaaliluettelon (BOM) käyttöönotto. Nämä vastaavat valmistusteollisuudessa käytettäviä osaluetteloita (engl. Manufacturing Bill of Materials, M-BOM) -luetteloita, koska ne ovat yksityiskohtaisia aina artikkelitasolle asti (19). Elementtivalmistajat pyrkivät käyttämään mahdollisimman paljon esivalmistettuja vakiokomponentteja elementeissä, jotka valmistetaan MTS-tuotantostrategialla. Toisin sanoen MTS-tuotantostrategia on integroitu ETO-tuotantostrategiaan. Elementtivalmistajien käyttämien tuotteiden tuotetiedot kootaan kansalliseen tuotetietorekisteriin, ja ne ovat koneellisesti luettavissa TT/EMDG Fest -standardia (20) käyttäen, samalla tavalla kuin talotekniset MTS-tuotteet (Alhava ym., 2024). Tämä mahdollistaa sen, että elementtiteollisuus voi tulevaisuudessa laskea CO₂-päästöt automaattisesti valmistajien toimittamien hiilijalanjälkitietojen perusteella. Siksi on loogista, että valmistajat ylläpitävät tulevaisuudessa tuottamiensa elementtien CO₂-tietoja ja antavat nämä tiedot asiakkaiden käyttöön. Kansallista tuotetietorekisteriä (21) elementtivalmistajien käyttämille tuotetiedoille ylläpitää Rakennustieto Oy (Rakennustieto, 2024). Tämä vahvistaa entisestään sen, että ETO-tuotantostrategialla toteutettujen toimitusketjujen tiedonhallinta edellyttää hajautettua arkkitehtuuria.

Tutkimuksen aikana todettiin myös, että hajautettu arkkitehtuuri edellyttää tapahtumatietojen aktiivista lähettämistä. Tutkimusta on jatkettava asianmukaisen tiedonsiirtostandardin validoimiseksi, joka ETO-toimitusketjuissa voisi mahdollisesti olla GS1-standardiperheeseen kuuluva EPCIS-standardi (22).

Jatkotutkimuksen yhteydessä on tarpeen tutkia sitä, miten tuleva EU:n tuotepassi vaikuttaa betonielementtien hiilidioksidipäästöjen laskentaan ja raportointiin (23). Yritysten on jo nyt raportoitava tilinpäätöstietonsa EU:n vaatimusten mukaisesti, ja pian myös kestävä kehitysraportti on pakollinen (24). Tutkimuksessa olisi selvitettävä, miten raportointitietojen

kerääminen voidaan toteuttaa tehokkaimmalla tavalla hajautetussa arkkitehtuurissa. Lisäksi tutkimusta olisi laajennettava kattamaan kiertotalouden tietovaatimukset ja tulevat CEI-raportit (Circular Economy Indicator) (25). On myös ehdotettu, että kansallinen digitaalinen yhteentoimivuusalusta (26) sisältäisi tulevaisuudessa betonielementtien nimikkeistön, joka mahdollistaisi suunnitteluvaiheen automatisoinnin samoilla periaatteilla kuin MTS-tuotteiden kohdalla (Alhava ym., 2024).

Tutkimusmetodologian näkökulmasta tässä artikkelissa käsiteltiin onnistuneesti laajaa ja monimutkaista aihetta, mutta tutkimuksen heikkoudeksi voidaan lukea sen osien kapea-alainen käsittely. Kehityshankkeen työpajoissa aiemmin tehtyjen väliseinä- ja julkisivuelementtien prosessikuvausten perusteella eri osapuolilla on lukuisia erilaisia käyttötapauksia, ja tutkimus kattoi vain pienen osan näistä (vaikka se kattoi kaikki olennaiset osat järjestelmän toteuttamiseksi ja toimitusketjun digitalisoimiseksi). Koska betonielementtityyppejä on yli 20, niiden suunnitteluun, valmistukseen ja asennukseen odotetaan liittyvän erilaisia tietosisältöjä ja poikkeamia tässä tutkimuksessa käsitellyistä näkökohdista.

6 Johtopäätökset

Tutkimuksessa toteutettiin hajautetun arkkitehtuurin validointi suunnittelu-, tuote- ja prosessitietojen hallintaa varten betonielementtien toimitusketjussa ETO-tuotteiden osalta. Validointi osoitti, että betonielementtien toimitusketjun tiedonsiirto voidaan toteuttaa käyttämällä järjestelmäriippumattomia ratkaisuja, jotka perustuvat samoihin periaatteisiin kuin muutkin teollisuudenalat ja joissa hyödynnetään GS1-standardiperhettä ja PEPPOL-standardia. Tutkimuksen oletettu vaikutus alaan on merkittävä, sillä se tuo käyttöön uuden tiedonhallintaparadigman, joka hyödyttää koko rakennusalan verkostoa ja siirtää ETO-toimitusketjun tiedonhallintaa koskevan tutkimuksen painopistettä ”mitä” -kehyksestä ”miten” -kehykseen.

Lähdeluettelo

- Alaluusua, T. (2023). Digitaalinen tiedonhallinta tahtituotantoa hyödyntävän rakennushankkeen toimitusketjuissa. *Master's thesis, Building Technology, Aalto University*.
- Alhava, O., Ruottinen B., Peltokorpi A., Siren, M., Aaltonen A. and Pitkäranta T. (2024). Advancing Digitalization in Construction Through Automated Metadata Management and Machine Data Processing. Proceedings of the 41th International Conference of CIB W78, Marrakesh, 1-3 October
- Bataglin, F. S., Viana, D. D., Formoso, C. T., & Bulhões, I. R. (2020). Model for planning and controlling the delivery and assembly of engineer-to-order prefabricated building systems: exploring synergies between Lean and BIM. *Canadian journal of civil engineering*, 47(2), 165-177.
- BEC (2012). Elementtisuunnittelun mallinnusohje. *BetonielementtiCAD-project 2011-2012, BEC working group, Rakennusteollisuus RT, Helsinki, Finland*. Available at: https://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/_23982/BEC2012%20Elementtisuunnittelun%20mallinnusohje_v110.pdf [visited 15.5.2024]
- BEC CP (2023) Custom properties, Version 1.1. *BetonielementtiCAD-project 2011-2012, BEC working group, Rakennusteollisuus RT, Helsinki, Finland*. Available at: https://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/24144/BEC_CustomProperties.pdf [visited 15.5.2024]
- BEC IFC (2016) Betonielementtien määrälaskenta ifc-mallista, version 1.0. *BetonielementtiCAD-project 2011-2012, BEC working group, Rakennusteollisuus RT, Helsinki, Finland*. <https://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/24146/Betonielementtien%20m%C3%A4r%C3%A4r%C3%A4laskenta%20ifc-mallista.pdf> [visited 15.5.2024]
- BEC PS (2012) Property Sets, Version 1. *BetonielementtiCAD-project 2011-2012, BEC working group, Rakennusteollisuus RT, Helsinki, Finland*. Available at: https://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/24145/BEC_PropertySets.pdf [visited 15.5.2024]
- Bellgran, M., & Säfsten, K. (2010). Production development over time. Springer London.
- COBIM S5 (2012). COMMON BIM REQUIREMENTS 2012 Series 5. Structural design. *Building Information Foundation RTS and Parties to the COBIM project 2012, VERSION 1.0 RT standards sheet, December 2012 RT 10-11070 (en)*
- Ergen, E., Akinci, B., & Sacks, R. (2007). Tracking and locating components in a precast storage yard utilizing radio frequency identification technology and GPS. *Automation in construction*, 16(3), 354-367.

- Ergen, E., & Akinci, B. (2008). Formalization of the flow of component-related information in precast concrete supply chains. *Journal of Construction Engineering and Management*, 134(2), 112-121.
- GS1 (2018). Guideline for Unique identification of products with SGTIN (serialized GTIN). Labelling with GS1 Datamatrix barcode and tagging with EPC / RFID Gen 2 UHF RFID tags. Release 1.1 - 27. June 2018. GS1 Norway, Available at: https://www.gs1.org/docs/technical_industries/Construction/GS1%20Guideline%20unique%20ID%20for%20products%20in%20Construction%20v1.1%20-%202018.pdf [visited 15.5.2024]
- GS1 (2023). GTIN Management Guideline for Construction Products. [Online] Available at: <https://www.gs1.org/standards/gtin-management-guideline-construction-products/current-standard#1-Introduction> [visited 15.5.2024]
- Ikonen, J., Knutas, A., Hämäläinen, H., Ihonen, M., Porras, J., & Kallonen, T. (2013). Use of embedded RFID tags in concrete element supply chains. *J. Inf. Technol. Constr.*, 18(7), 119-147.
- Jiang, Y., Su, S., & Zhong, R. Y. (2023). Digital Twin-Enabled Two-Stage Optimization Model for Logistics-Assembly Synchronization in Fit-Out Construction. In *2023 IEEE 19th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)* (pp. 1-6). IEEE.
- Jussila, A., Kiviniemi, M., & Talvitie, U. (2012). Piloting a new information-sharing method in a construction supply chain. In *9th European Conference on Product and Process Modelling, ECPPM 2012* (pp. 707-712).
- Makkonen, S. (2023). Improving process flow in the frame erection phase of a residential building. *Master's Thesis, Construction Management and Economics, University of Tampere, Finland*.
- Nissilä, J., Heikkilä, R., Romo, I., Malaska, M., & Aho, T. (2014). BIM-based schedule control for the precast concrete supply chain. In *ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (Vol. 31, p. 1)*. IAARC Publications.
- Ocheoha, I. A., & Moselhi, O. (2018). A BIM-based supply chain integration for prefabrication and modularisation. *Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings*.
- Peltokorpi, A., Uusitalo P., Siltanen S. & Alhava O. (2023). Toimitusketjujen hallinta. *Building 2030 osahankkeen loppuraportti, Aalto University*. Available at: <https://www.aalto.fi/fi/building-2030/building-2030-teemoihin-liittyvia-tutkimusraportteja> [visited 15.5.2024]
- Rakennustieto. (2024). Rakennustieto. Available: <https://www.rakennustieto.fi/en>. Accessed 14.8.2024.
- Sacks R, Brilakis I, Pikas E, Xie HS, Girolami M. (2020). Construction with digital twin information systems. *Data-Centric Engineering*;1:e14. doi:10.1017/dce.2020.16
- Valtiokonttori. (2024). The State Treasury is the Finnish Peppol authority. Available at: <https://www.valtiokonttori.fi/en/service/the-state-treasury-is-the-finnish-peppol-authority/#peppol-in-brief> [visited 15.5.2024]
- Van Steen, M., & Tanenbaum, A. S. (2016). A brief introduction to distributed systems. *Computing*, 98, 967-1009.
- Vom Brocke, J., Hevner, A., & Maedche, A. (2020). Introduction to design science research. *Design science research. Cases*, 1-13.
- Wang, Z., Hu, H., Gong, J., Ma, X., & Xiong, W. (2019). Precast supply chain management in off-site construction: A critical literature review. *Journal of Cleaner Production*, 232, 1204-1217.