



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU  
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

# Tämä on alkuperäisen artikkelin rinnakkaistallenne (kustantajan pdf).

**Viite:**

Luomanmäki, T. 2020. 10-vuotiaat digitaaliset kaksoset. Teoksessa: P. Junell, J. Hirvonen, A. Sivula, H. Rasku & S. Saarikoski (toim.) SeAMK Tekniikan tutkimus, kehittäminen ja opetus rakentamassa alueellista innovaatioekosysteemiä. Seinäjoki: Seinäjoen ammattikorkeakoulu. Seinäjoen ammattikorkeakoulun julkaisusarja B. Raportteja ja selvityksiä 155, 239 - 250. <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2020091769971>



# 10-VUOTIAAT DIGITAALISET KAKSOSET

Toni Luomanmäki, insinööri (ylempi AMK), AmO,  
projektipäällikkö  
SeAMK Tekniikka

## 1 JOHDANTOA

Digitaaliset kaksoiset ovat nuoresta iästään huolimattaan olleet viime vuosina valmistavan teollisuuden, tutkimuksen ja mediankin piirissä korostuneesti esillä. Vielä nykyäänkin digitaalisten kaksosten määritelmä hakee jossain määrin paikkaansa, ja sitä käytetään hyvin monenlaisissa yhteyksissä kuvaamaan erilaisia digitaalisia ratkaisuja. Koko maailman digitalisoituessa voimakkaasti viimeisten vuosien aikana on samaa tapahtunut myös teollisuudessa. Kasvanut massaräätälöinnin ja edelleen joustavuuden ja tehokkuuden tarve on toiminut ajurina tuotannollisten toimien kehittämisessä digitalisaation tuomia mahdollisuuksia soveltamalla. Industry 4.0 -kehys on tuonut oman visionsa modernista ja älykkäästä tuotannosta, jota kohti edelläkävijäyritykset ovat suunnanneet omaa tuotannon kehittämistoimintaansa.

Nykyaikana valmistavan teollisuuden tuotantoihin ja tuotteiden elinkaarien vaiheisiin liittyy poikkeuksetta digitaalisia ratkaisuja ja toimintoja aina suunnittelusta tuotteen jätteeksi päätymiseen asti. Digitaalisten kaksosten katsotaan myös liittyvän tuotteiden elinkaarenhallintaan ja erilaisten tuotantojärjestelmien toiminnan analysointiin ja optimointiin liiketoimintanäkökulma huomioiden. Tässä artikkelissa pohditaan digitaalisen kaksosen määritelmää sen historian ja tutkimustiedon, sekä case-esimerkin näkökulmasta ja pyritään tuomaan esille digitaalisen kaksosen ydintarkoitus.

## 2 DIGITAALISTEN KAKSOSTEN LYHYT HISTORIA

Digitaalinen kaksonen -termillä on lyhyt historia, ja sen määritelmä jalostuu vielä nykyaikanakin. Määritelmän keskeneräisyydestä johtuen, sitä käytetään hyvin monessa yhteydessä kuvaamaan erilaisia digitaalisia ratkaisuja. Epävirallisesti digitaalinen kaksonen -konseptin on esitellyt Barricellin, Casiraghin ja Foglin (2019) mukaan Michael Grieves vuonna 2002 hänen PLM-aiheisessa esityksessään otsikolla ”Conceptual Ideal for PLM”. Digital twin -termi esiintyi virallisesti ensimmäisen kerran vuonna 2010 NASAn teknologisessa tiekarttadokumentaatiossa (Shafto 2010). Dokumentissa kuvataan digitaalista kaksosta monitahoiseksi simulaatioksi, jossa yhdistyvät parhaat saatavilla olevat fysiikkamallit, sensoridatat ja laivuehistoria ja joka peilaa sen oikeaa, lentävää kaksosta. Shafto (2010) kuvaa digitaalisen kaksosen sovellusesimerkkejä seuraavasti:

1. Digitaalisen kaksosen avulla voisi lentää tulevia lentoja ennen niiden varsinaista toteutumista.
2. Digitaalisen kaksosen avulla voisi tarkkailla oikeaa lentoa ja lentovälineen tilaa.
3. Digitaalisen kaksosen avulla voidaan analysoida mahdollisia vika- ja virhetilanteita, joita lento voi kohdata kohteessa, ja pyrkiä välttämään ja ennakoimaan niitä.
4. Digitaalisen kaksosen avulla voidaan tutkia tehtävänäikaisten lentoparametrien muutosten vaikutusta lentovälineen suorituskykyyn ennen päätöksentekoa.

NASAn määritelmän ja sovellusesimerkkien valossa digitaalisten kaksosten tarkoitus nähdään nykyään hyvin samanlaisina kuin 10 vuotta sitten, joskin sovellusympäristö on nykyään painottunut

valmistavaan teollisuuteen, josta nousee omat erikoispiirteensä digitaalisiin kaksosiin. Digitaalisella kaksosella on tavoitteena saavuttaa mm. ennakoituvuutta, varmuutta, optimointia, turvallisuutta, suorituskykyä ja läpinäkyvyyttä. Euroopassa teollisuuden omaksumista konseptiin vauhditti erityisesti Industry 4.0 -visio, jonka juuret ovat Saksan hallituksen käynnistämässä High-tech strategy -ohjelmassa, ja sen tuloksena vuonna 2011 esitelty Industrie 4.0 -kehys (I-SCOOP, [viitattu 6.4.2020]).

2010-luvun puolella välissä myös yritykset olivat omaksuneet digital twin -termin, ja sitä käytettiin markkinointitarkoituksissa hyvin monitahoisesti. Osalla oli selkeä ajatus siitä, mikä digitaalisten kaksosten perusajatus oli, ja niiden innovatiivista näkökulmaa osattiin hyödyntää omissa tuotteissa. Toisaalta oli myös yrityksiä, joilla ei välttämättä ollut niin selkeää käsitystä digitaalisten kaksosten perusajatuksista, mutta yritysten oli kyettävä olemaan ajan hermolla ja käytettävä termiä hyvinkin löyhästi kuvaamaan yksinkertaisimpiakin digitaalisia tuotteita tai ratkaisuja. Nykyään tilanne alkaa olla kuitenkin jo se, että teollisuus ja tutkimus näkevät digitaaliset kaksoset melko samansuuntaisesti.

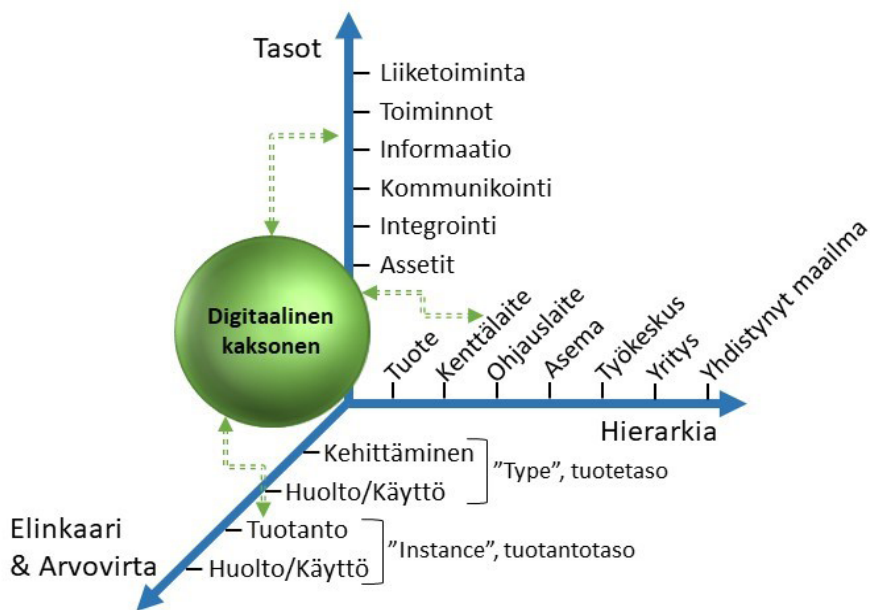
### **3 MITÄ DIGITAL TWIN OIKEASTAAN TARKOITTAÄ**

Kuten aiemmin todettiin, digitaalinen kaksonen -termiä on käytetty ja käytetään edelleen hyvin monissa yhteyksissä. Tässä kappaleessa pyritään löytämään rajausta siihen, mitä digitaalinen kaksonen todella tarkoittaa ja mitä se ei ole.

#### **3.1 Mikä tekee digitaalisen kaksosen**

Deuterin ja Pethigin (2019) mukaan tulevaisuudessa koneet ja tehtaot voidaan liittää ylätasoon järjestelmiin liittä ja valvo -peri-

aatteella ilman nykyään vaadittavaa työstä integraatiota. Heidän mukaansa pelkkä teknologinen verkottuminen ei kuitenkaan riitä tuottavuuden kasvattamiseksi, vaan tarvitaan myös arvoketjujen horisontaalista verkottumista. Teollisuus 4.0 -vision mukaista verkottumista, standardisointia ja toiminnan rakennetta kuvataan Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI4.0) -mallissa. Kuviossa 1 kuvataan digitaalisen kaksosen asemoitumista RAMI 4.0 -mallissa. (Reference Architectural Model 2018.)



Kuvio 1. Digitaalisen kaksosen aseointi RAMI 4.0 -kehyksessä (perustuu Reference Architectural Model, 2018; Deuter & Pethig 2019).

Kuten kuviosta 1 voidaan todeta, digitaalinen kaksosen liittyy usein valmistavan teollisuuden yrityksessä hyvin moniin toimintoihin ja liiketoiminnan tasoihin. Keskeistä digitaalisen kaksosen määrittelyssä on se, että digitaalisella kaksosella on aina yhteys johonkin fyysiseen, reaali maailman komponenttiin, jonka toimintaa digitaalinen kaksosen peilaa. Autiosalon ym. (2020) mukaan digitaalisen kaksosen päätarkoitus on toimia yksittäisenä informaation lähteenä sen reaali maailman vastineelle.

Heidän mukaansa digitaalinen kaksonen linkittää eri järjestelmät tuotetasolle, ja sitä hyödynnetään jäsentämään, seuraamaan ja hyödyntämään dataa. Keskeinen kysymys digitaalisen kaksonen määrittelyssä on myös, mahdollistaako digitaalinen kaksonen reaali maailman vastineensa ohjauksen. Autiosalon ym. (2020) mukaan fyysinen tuote on digitaalisen kaksonen määrittelyssä niin keskeinen asia, että sillä erottaudutaan normaalista simulatiosta. He kuvaavat yhteyttä digitaalisen kaksonen ja reaali maailman vastineen kanssa termillä ”coupling”, joka mahdollistaa kaksisuuntaisen yhteyden ja edelleen reaali maailman vastineen ohjauksen.

Digitaalisilla kaksoilla on ainakin kaksi mahdollista elinkaarta. Ensimmäisessä digitaalinen kaksonen syntyy reaali maailman vastineen suunnitteluvaiheessa ja tuotteen valmistuttua kaksoet jatkavat vuorovaikutuksessa fyysisen tuotteen elinkaaren ajan. (Barricelli ym. 2019.) Tämä vaihtoehto kuvaa hyvin tuotteen elinkaarenhallintaan (PLM) rakennettua digitaalista kaksoista, joka koostuu mm. tuotteen 3D-suunnittelusta, lujuustarkastelusta, tuotteen ohjauksen suunnittelusta ja simuloinnista, tuotteen valmistuksen suunnittelusta ja simuloinnista ja tuotannon suunnittelusta ja simuloinnista. Tuotteen valmistuksen aikana ja sen jälkeen eri vaiheet tuottavat digitaaliseen kaksoseen dataa, jonka perusteella koko prosessia voidaan optimoida ja monitoroida. Toisessa vaihtoehdossa Barricelli ym. (2019) mukaan digitaalisen kaksonen elinkaari alkaa siten, että olemassa olevalle reaali maailman järjestelmälle rakennetaan digitaalinen kaksonen Teollisuus 4.0 -teknologioita soveltaen. Myös tässä tapauksessa kaksoet jatkavat datan vaihtoa koko elinkaarensa ajan.

Digitaalisen kaksonen tarkka määrittely on mahdotonta, koska se on konseptina vielä kehitysvaiheessa ja vailla selkeitä standardeja. Joka tapauksessa tietynlaista konsensusta aiheesta on syntynyt niin tutkimuksessa kuin teollisuudessaakin, joskin eri toimialat ja sovellukset tuovat oman näkökulmansa asiaan.

Yhtenä näkökulmana Autiosalo ym. (2020) nostavat sen ajatuksen, että digitaalinen kaksonen ei ole teknologiaa, vaan enemmänkin idea tai filosofia, jota voidaan toteuttaa monilla erilaisilla teknologioilla. Heidän mukaansa digitaalinen kaksonen tulisi luokitella enemmänkin semanttiselle, kuin teknologiselle tasolle. Näistä syistä digitaalista kaksosta tulisi ajatella enemmän konseptina reaali maailman kaksosen kehitykselle, riippumatta siitä syntykö lisäarvoa seurannan, data-analytiikan, optimoinnin tai jonkun muun teknologisen toimenpiteen ansioista.

## 3.2 Mitä se ei ole

Vaikka digitaalisen kaksosen tarkka määrittely lienee mahdotonta, on siitä olemassa kuitenkin sellainen konsensus, että voidaan poissulkea tiettyjä, helposti digitaalisiksi kaksosiksi miellettyjä esimerkkejä. Taulukossa 1 esitetään valmistavan teollisuuden suunnittelun näkökulmasta erilaisia teknologisia sovelluksia, jotka eivät pääsääntöisesti ole artikkelin käsityksen mukaan digitaalisia kaksosia ja pohditaan myös sitä, mikä niistä tekisi niitä.

Taulukko 1. Teknologiasta digitaaliseksi kaksosiksi.

Teknologia	Miksi ei ole digitaalinen kaksosen	Miten tekisi siitä digitaalisen kaksosen
Tuotteen 3D-malli	Vaikka 3D-mallista olisikin rakennettu vastaava fyysinen tuote, kummankaan elinkaari ei vaikuta toisiinsa.	3D-malli osana tuotteen elinkaarenhallintajärjestelmää, johon dataa kertyy koko tuotteen elinkaaren ajan ja sitä hyödynnetään 3D-suunnittelussa.
Valmistuksen CAM-simulaatio	Työstökoneen ohjelman offline-suunnittelun ja simuloinnin perusteella työstetty kappale ei linkity takaisin suunnitteluvaiheeseen.	Työstetty kappale voidaan automaattisesti tarkkuusmitata, ja tuloksista on takaisinkytkentä niin suunnitteludataan kuin työstökoneeseen. Lisäksi työstökoneen tilaa ja dataa voidaan esittää visuaalisesti.
Tuotannon simulaatio	Perinteisellä tuotannon simuloinnilla pyritään arvioimaan järjestelmän käyttäytymistä tulevaisuudessa tai simuloidaan menneisyyttä historiadatan avulla. Järjestelmän reaaliaikaista nykytilaa ei ilmenetä simulaatiossa, tai suunnitteluvaiheessa olevan järjestelmän simulointia ei liitetä sen reaali maailman kaksoseseen sen valmistuttua.	Järjestelmän suunnitteluvaiheen simulaatioon voidaan liittää fyysinen ohjausjärjestelmä, jonka ohjausta voidaan kehittää ja testata simulointimallia vasten. Dataliikenne on kaksisuuntaista simulointimallin ja ohjausjärjestelmän välillä. Lisäksi valmiin reaali maailman järjestelmän suorituskykyä voidaan seurata IoT-ratkaisuilla ja tehdä takaisinkytkentä simulointimalliin, joka ilmentää oikean järjestelmän tilaa.
Järjestelmän suorituskyvyn mittausta- ja visualisointisovellus	Vaikka ohjelmisto seuraa ja visualisoi jonkun systeemin tilaa reaaliaikaisesti, siitä ei ole kuitenkaan takaisinkytkentää oikeaan järjestelmään. Digitaalisen kaksosen edellyttämä ohjausnäkökulma puuttuu.	Ohjelmistosta tulisi olla reaali maailman järjestelmään ohjaus esimerkiksi data-analytiikan perusteella.



Kuten taulukosta 1 voidaan todeta, digitaalisen kaksosen muodostaa yleensä selkeä takaisinkytkentä joko digitaalisesta tai reaali maailman kaksosesta toiseen. Lisäksi olennaista on nykytilassa tapahtuva reaaliaikainen tiedonsiirto molempiin suuntiin, johon perustuvaa ohjausta tapahtuu vähintään toiseen suuntaan. Tästä seuraavaa suljettua kiertoa (closed loop) voidaan kutsua sen kaikkine liitäntöineen, rajapintoineen ja ilmiöineen digitaalseksi kaksoseksi.

## **4 TUOTANTOSOLUN SIMULAATIO VAI DIGITAALINEN KAKSONEN**

SeAMK Tekniikalla on pitkät perinteet tuotannon simulointien toteuttamisesta yrityksille ja simulointiteknologian hyödyntämisestä laaja-alaisesti myös TKI- ja opetustoiminnassa. Vaikka perinteistä tuotannon simulointia ei voidakaan artikkelin näemyksen mukaan kutsua puhtaaksi digitaalseksi kaksoseksi mm. reaali maailman linkityksen puuttuttua, on nykyaikaisissa simulointityökaluissa kuitenkin sellaisia ominaisuuksia, jotka mahdollistavat hyvin monipuolisesti erilaisten teollisuuden toimintojen mallintamisen ja simuloinnin. Tästä näkökulmasta tarkasteltuna nykyaikainen simulointiteknologia ja sillä toteutetut simulaatiot voivat sisältää esim. työntekijäresurssin, autonomisen mobiilirobotin tai fysiikkamallinnuksella tarkennetun materiaalivirran tarkastelut. Nämä ovat jo sen suuntaisia ominaisuuksia, että digitaalisen ja reaali maailman välinen raja hälvenee entisestään, jolloin nykyaikaisista tuotannon simuloinneista voisi olla mahdollista käyttää termiä digitaalinen kaksonen. Lisäksi nykyaikaisissa simulointityökaluissa virtuaalitodellisuuteen siirtyminen onnistuu helpoimmillaan muutamaa painiketta painamalla, mikä tuo simulaatiot edelleen lähemmäksi todellista ympäristöä.

Artikkelin kirjoitushetkellä SeAMK Tekniikassa oli käynnissä yksi simulointitoimeksianto, jossa oli tarkoituksena simuloida

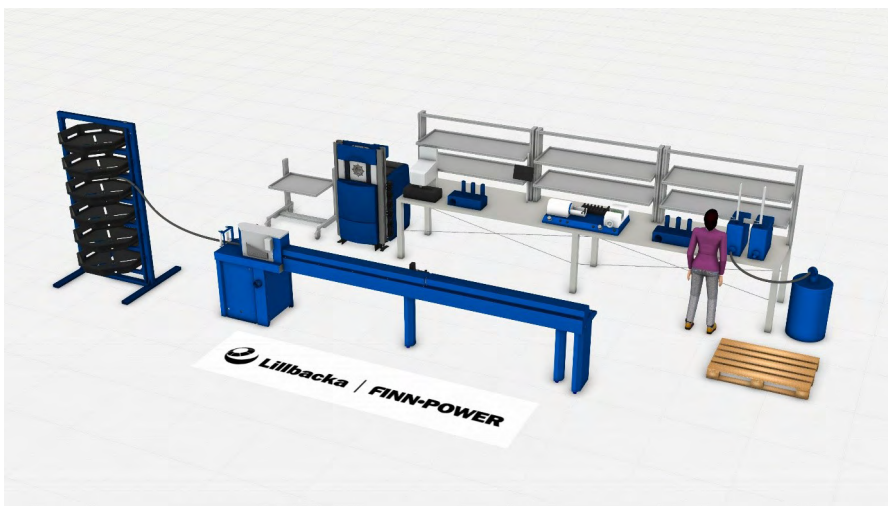
hydrauliletkuasennelmien kokoonpanolinjan toimintaa 3D-ym-  
päristössä. Simulointi toteutettiin moderneja letkuliitinpuristimia  
valmistavalle Lillbacka Powerco Oy:lle, jolla on yli 40 vuoden  
kokemus letkuliitinpuristimien valmistuksesta. Simuloinnin  
tavoitteena oli selvittää pääsääntöisesti ihmisen toteuttaman,  
eri resursseja hyödyntävän kokoonpanoprosessin virtausta eri  
tuotanto-ohjelmilla ja layouteilla. Lisäksi 3D-simulaation sivu-  
tuotteena syntyy usein lähes automaattisesti erilaista visualisoin-  
tiaineistoa, kuten renderöidyt kuvat tai simulointiajoista tuotetut  
videot. Koska yrityksellä ei usein ole omaa ohjelmistolisenssiä,  
simuloinneista tuotetut videot ja kuvat antavat keinoja yritykselle  
viestiä oman projektin tuloksia tai tavoitteita sidosryhmilleen  
myös simulointiprojektin jälkeen. Simulointiteknologia mahdol-  
listaakin tehokkaan viestimisen eri sidosryhmien välillä hyvin  
teknisistäkin asioista.

Simuloinnin määrittelyvaiheessa todettiin, että tuotanto-ohjelma  
ja simuloinnin parametrit (vaiheajat, tuotantolaitteiden asetuk-  
set, tuotantotapa, eräkoot, tuoteresepti) tuli olla määriteltävissä  
Excel-tiedostoon. Data luettaisiin aina ennen simulaation  
ajamista simulointimalliin. Kokoonpanon työkierto avattiin 33  
eri vaiheeseen, joille pystyi määrittelemään vaiheajat. Lisäksi  
oli mahdollista määritellä tuoteresepti siten, että tuotteen ra-  
kentuminen pystyttiin määrittelemään 14 eri työvaiheen kautta  
haluttuun järjestykseen, koska osalla tuotteista saattoi olla  
erilainen kokoonpanoprosessi. Lisäksi Excel-tiedosta pystyttiin  
määrittelemään tuotantotapa (one-piece flow/batch flow).

Simulointimalli päätettiin toteuttaa Visual Components -oh-  
jelmistolla, koska visuaalisuus oli tärkeää ja ohjelmiston 3D-  
ominaisuudet ovat verrattain erinomaiset. Lisäksi ohjelmiston  
Python-API mahdollistaa täysin yksilöllisten ratkaisujen toteut-  
tamisen simulaatioon. Simulaation rakennettiin ylätason ohjaus,  
joka lukee datan malliin, käsittelee sen ja kohdistaa parametrit  
oikeille resursseille. Ylätason ohjaus huolehtii myös ihmisresurs-  
simallin ohjauksesta oikeille työpisteille oikeassa järjestyksessä.

Ihmisenresurssin ohjaus toteutettiin niin, että ihmismalli löytää aina kokoonpanopisteen riippumatta siitä, missä se on ja osaa kävellä sinne. Tämä mahdollistaa vaihtoehtoisten layouttien testaamisen ja optimoinnin joustavasti siten, että simulaatiomallissa työpisteiden ja resurssien paikkaa voi muuttaa vapaasti ja siitä huolimatta ihmisenresurssi kulkee mallissa tuotanto-ohjelman ja tuotereseptien mukaisesti.

Simulointimallin avulla selvitettiin mm. tuotannon läpimenoaikoja eri tuotanto-ohjelmilla ja -tavoilla. Visual Components -ohjelmistolla pystytään visualisoimaan myös erilaista dataa statistiikkatyökalujen avulla. Tuotantotavan vaikutuksia todennettiin lisäarvoa tuottamattoman ja tuottavan työn seurannalla. Lisäksi laskettiin mm. ihmisenresurssin kävelymatkaa one-piece flow ja batch production -tuotantotavoilla. Esimerkiksi batch production -tuotantotavalla ihmisenresurssin kävelymatka tuotantoprosessissa oli vain noin 30 % one-piece flow -tuotantotapaan verrattuna. Kuviossa 2 on kuvakaappaus simulointimallista.



Kuvio 2. Kuvakaappaus kokoonpanosolun simulaatiomallista.

Simulointiprojektin aikana syntyi ajatus jatkokehitysmahdollisuudesta layout-optimoinnin suhteen. Olisi mielenkiintoista

soveltaa esimerkiksi geneettisiä algoritmeja tai neuroverkko- ja optimaalisen layoutin ratkaisemiseksi siten, että siirtyminen eri resurssien välillä olisi mahdollisimman lyhyt ja edelleen läpimeno mahdollisimman suuri. Osassa simulointiohjelmistoja on jo nykyaikana sisäänrakennettuna erilaisia optimointityökaluja, mutta myös avoimien rajapintojen ansiosta ohjelmistojen ulkopuolisia ratkaisuja voidaan implementoida osaksi simulointimallia. Tämän tyylistä lähestymistapaa tullaan kokeilemaan jossakin vaiheessa, joko tämän tai jonkun muun projektin yhteydessä.

## 5 LOPUKSI

Digitaaliset kaksoset ovat tulleet jäädäkseen siitäkin syystä, että ne ovat älykkään tuotannon mahdollistavia rakennuspalikoita, jotka mahdollistavat sellaisen joustavuuden ja tuottavuuden, mitä nykyajan massaräätälöintivaatimukset asettavat liiketoiminnalle. Oli kyse sitten digitaalisesta kaksosesta tai kyberfyysisestä järjestelmästä, on keskeistä tiedostaa, että kyse ei ole pelkästään teknologiasta, vaan enemmänkin ajattelutavasta, miten valmistavan teollisuuden toimintaa voidaan teknologian avulla kehittää koko tuotteen elinkaaren ajan.

Digitaaliset kaksoset skaalautuvat hyvin myös pk-sektorille, sillä toteutuksen ei tarvitse kattaa heti koko liiketoimintaa ja sen digitaalista kaksosta, vaan voidaan aloittaa hyvin pienin askelin tuotannon digitalisoinnissa. Lopulta kyse ei ole myöskään siitä, onko kyseessä digitaalinen kaksonen vai jokin muu termi, vaan siitä, että tiedostaa olemassa olevien teknologioiden mahdollisuudet ja osaa orientoitua niiden moderniin soveltamiseen omassa toiminnassaan.

Artikkeli on valmisteltu osana Mixed Reality and Collaborative Robotics -hanketta, ja haluamme kiittää hankkeen ja tämän artikkelin rahoittamisesta Pirkanmaan ja Etelä-Pohjanmaan Liittoja.

## LÄHTEET

Autiosalo, J., Vepsäläinen, J., Viitala, R. & Tammi, K. 2020. A feature-based framework for structuring industrial Digital Twins. [Verkkójulkaisu]. IEEE Access 8, 1193 - 1208. [Viitattu 7.4.2020]. Saatavana: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8887161>

Barricelli, B., Casiraghi, E. & Fogli, D. 2019. A survey on Digital Twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications. [Verkkójulkaisu]. IEEE Access 7, 167653 - 167671. [Viitattu 6.4.2020]. Saatavana: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8901113>

Deuter, A. & Pethig, F. 2019. The Digital Twin theory. [Verkkolehtiartikkeli]. Industrie 4.0 management, 27 - 30. [Viitattu 6.4.2020]. Saatavana: [https://www.researchgate.net/publication/330883447\\_The\\_Digital\\_Twin\\_Theory](https://www.researchgate.net/publication/330883447_The_Digital_Twin_Theory)

I-SCOOP. Ei Päiväystä. Industry 4.0: the fourth industrial revolution: guide to Industrie 4.0. [Verkkosivu]. [Viitattu 6.4.2020]. Saatavana: <https://www.i-scoop.eu/industry-4-0/>

Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI4.0). 2018. [Verkkójulkaisu]. Berlin: Plattform Industrie 4.0. Viitattu [7.4.2020]. Saatavana: <https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/rami40-an-introduction.html>

Shafto, M. 2010. DRAFT modeling, simulation, information technology & processing roadmap. [Verkkójulkaisu]. Washington: NASA. [Viitattu 6.4.2020]. Saatavana: [https://www.nasa.gov/pdf/501321main\\_TA11-MSITP-DRAFT-Nov2010-A1.pdf](https://www.nasa.gov/pdf/501321main_TA11-MSITP-DRAFT-Nov2010-A1.pdf)