

Digitaalisen kaksosen hyödyntäminen toimitusketjun hallinnassa

Utilizing digital twin in Supply Chain Management

Kandidaatintyö

Lilli Huovila

TIIVISTELMÄ

Tekijä: Lilli Huovila	
Työn nimi: Digitaalisen kaksosen hyödyntäminen toimitusketjun hallinnassa	
Vuosi: 2021	Paikka: Lappeenranta
Kandidaatintyö. LUT-yliopisto, Tuotantotalous. 35 sivua, 5 kuvaa ja 1 taulukko Tarkastaja: Annastiina Rintala	
Hakusanat: Digitaalinen kaksonen, toimitusketjun hallinta	
Keywords: Digital twin, Supply Chain Management	
<p>Tässä työssä tutkitaan ajantasaiseen tutkimustietoon perustuen, miten digitaalista kaksosta voidaan hyödyntää toimitusketjun hallinnassa. Työssä selvitetään myös, miten erilaiset yritykset käyttävät digitaalista kaksosta toimitusketjussa tällä hetkellä.</p> <p>Aluksi työssä määritellään, että toimitusketjun hallinta koostuu hallintaprosesseista ja niihin liittyvistä liiketoiminnoista. Tämän jälkeen käsitellään digitaalisen kaksosen historiaa, ominaisuuksia, hyötyjä ja haasteita sekä käyttökohteita. Viimeisenä työssä selvitetään, mille toimitusketjun osa-alueille digitaalinen kaksonen soveltuu ja millaisia sovelluksia sillä on jo toimitusketjuissa. Käsiteltäviä alueita ovat toimitusketjuprosessi, tuotanto, varastointi ja kuljetukset.</p> <p>Keskeisimpänä tuloksena voidaan todeta, että suurimpia digitaalisen kaksosen tuomia hyötyjä ovat erilaisten prosessien optimointi ja riskien hallinta. Lisäksi huomataan, että toimitusketjuissa käytetään digitaalista kaksosta vielä melko vähän, mutta niiden käyttö on tekniikan kehittyessä yleistymässä.</p>	

SISÄLLYSLUETTELO

1	Johdanto	3
1.1	Työn tausta ja tutkimuskysymykset.....	3
1.2	Toimitusketjun hallinta	4
2	Digitaalinen kaksonen.....	8
2.1	Digitaalisen kaksosen historia.....	9
2.2	Digitaalisen kaksosen ominaisuudet	9
2.2.1	Anturit	11
2.2.2	Ohjelmistot ja työkalut digitaalisen kaksosen rakentamiseen.....	11
2.3	Digitaalisen kaksosen haasteet.....	13
2.4	Digitaalisen kaksosen käyttökohteet ja hyödyt.....	14
3	Digitaalinen kaksonen toimitusketjun hallinnassa.....	18
3.1	Toimitusketjuprosessin digitaalinen kaksonen	18
3.1.1	Häiriöriskien hallinta.....	20
3.2	Raaka-aineiden hankinta ja tuotanto	22
3.3	Varastointi.....	25
3.4	Kuljetus	26
4	Johtopäätökset.....	29
	Lähteet	31

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta ja tutkimuskysymykset

Digitaalinen kaksonen on fyysiseen esineeseen tai prosessiin yhdistetty virtuaalinen järjestelmä, joka pystyy havaitsemaan, seuraamaan, simuloimaan, testaamaan ja laskemaan fyysisen vastineen käyttäytymistä reaaliajassa (Jiang, Guo & Wang 2021, 2). Digitaalisen kaksosen voidaan ajatella olevan yksi vuosikymmenen merkittävimmistä teknologisista trendeistä (Tao, Zhang, Liu & Nee 2019, 2407). Lisäksi Gartnerin tutkimuksen mukaan 13 % yrityksistä, jotka toteuttavat esineiden internet (engl. *Internet of Things*, IoT) -hankkeita, käyttävät jo digitaalista kaksosta. Tämän lisäksi 62 % ovat joko parhaillaan toteuttamassa digitaalisen kaksosen käyttöönottoa tai suunnittelevat sitä. (Gartner 2019)

Tämän työn tavoitteena on selvittää, miten digitaalista kaksosta voidaan hyödyntää toimitusketjun hallinnassa. Tavoitteen perusteella on luotu tutkimuskysymykset, joiden kautta tutkimusta tehdään:

- Miten digitaalista kaksosta voidaan hyödyntää toimitusketjun hallinnassa?
 - o Mille toimitusketjun hallinnan osa-alueille digitaalinen kaksonen soveltuu?
 - o Mitä digitaalisen kaksosen sovelluksia on jo käytössä toimitusketjun hallinnassa?

Tutkimuskysymyksiin etsitään vastauksia ajantasaisesta tutkimustiedosta. Olennaisena osana on tietää, mitä toimitusketjun hallintaan sisältyy. Tämän takia työssä käsitellään aluksi toimitusketjun hallinnan määritelmä ja selvitetään, mitä sen käsitteen sisään kuuluu. Tarkemmin käsitellään niitä toimitusketjun hallinnan prosesseja, joita käydään myöhemmin työssä läpi digitaalisen kaksosen osalta.

Pääpaino työssä on digitaalisen kaksosen käsittelyssä. Aluksi selvitetään, mitä digitaalinen kaksonen tarkoittaa, miten se toimii ja millaisia käyttökohteita sillä on. Digitaalisesta kaksosesta selvitetään myös sen hyötyjä ja haasteita sen käyttöönotossa ja käytössä. Tarkoituksena on esittää digitaalisen kaksosen käsite yleisellä tasolla selkeästi olemassa olevan teorian pohjalta.

Viimeisenä tarkasteltavana osa-alueena on digitaalisen kaksosen mahdolliset sovelluskohteet toimitusketjun hallinnan näkökulmasta. Tarkoituksena on selvittää, miten digitaalista kaksosta voidaan hyödyntää toimitusketjun hallinnassa. Selvityksen kohteena on myös, millaisia sovelluksia on jo käytössä ja mitkä ratkaisut ovat vielä vain teoriapohdintoja tai testausvaiheessa. Tässä työn osassa keskitytään ensimmäisessä osiossa määriteltyihin toimitusketjun osa-alueisiin ja erityisesti tarkastellaan toimitusketjun hallinnan kannalta tärkeitä liiketoimintoja. Tämän osion toteuttamiseen käytetään mahdollisimman tuoreita tiedejulkaisuja ja esimerkkejä yritysten käyttämistä digitaalisen kaksosen sovelluksista toimitusketjussa. Esimerkkejä etsitään monipuolisesti eri toimialoilta, että saadaan parempi käsitys, millaisille yrityksille digitaaliset kaksoset soveltuvat.

1.2 Toimitusketjun hallinta

Vaikka erilaiset hallintaprosessit ovat toimitusketjun hallinnan ydinalueita, tässä työssä keskitytään erityisesti tarkastelemaan itse toimitusketjuprosessia ja hallintaprosessien kannalta tärkeitä liiketoimintoja, kuten logistiikkaa. Näitä osa-alueita käsitellään myöhemmin tässä työssä digitaalisen kaksosen näkökulmasta.

Toimitusketjun hallinnalle (Supply Chain Management) löytyy useita hieman toisistaan poikkeavia määritelmiä. Yleisesti siihen kuitenkin liittyy useita yrityksiä, monia liiketoimintoja ja näiden liiketoimintojen koordinointi toimitusketjun eri toimintojen ja yritysten välillä (Mentzer et al. 2001, 17). Toimitusketjun hallinta voidaan määritellä yritysverkoston materiaalivirtojen ja siihen liittyvien tieto- ja rahavirtojen kokonaisvaltaiseksi suunnitteluksi, ohjaukseksi ja johtamiseksi. Toimitusketjun hallinnassa tärkeää on ketjun rakenteen muodostaminen ja sen jatkuva kehittäminen. Lisäksi toimitusketjun hallinnan ajattelussa keskeisessä roolissa ovat aika, luotettavuus sekä läpinäkyvyys ja tärkeitä tekijöitä ovat toimitusketjun eri osapuolten välinen yhteistyö ja arvon luominen asiakkaille. (Ritvanen, Inkiläinen, von Bell & Santala 2011, 23) Mentzer et al. (2001, 18) määrittelee, että perinteisten liiketoimintojen ja näiden toimintojen taktiikoiden strateginen koordinointi tietyssä yrityksessä ja toimitusketjun sisällä toimivien yritysten välillä yksittäisten yritysten ja koko toimitusketjun pitkän aikavälin suorituskyvyn parantamiseksi on toimitusketjun hallintaa. Lambertin (2014, 2)

mukaan toimitusketjun hallinta taas on suhteiden hallintaa organisaatioiden verkostossa, johon kuuluu osapuolia aina loppuasiakkaasta alkuperäisiin toimittajiin. Suhteiden hallinnassa käytetään monialaisia prosesseja arvon luomiseksi sekä asiakkaille, että muille sidosryhmille.

Tilaus-toimitusketjun työt voidaan tiivistää tavara-, tieto- ja rahavirtojen ohjaamiseen eli suunnitteluun, tilausten käsittelyyn, myyntiin, hankintaan, taloushallintoon, tilausten valvontaan sekä tapahtuma- ja muutostietojen välittämiseen. Ohjaamisen lisäksi toimitusketjun tehtäviin sisältyy näiden tavara-, tieto- ja rahavirtojen toteuttaminen eli tavarankäsittely, kuljettaminen, varastointi, tehdastyö, asiakirjojen tuottaminen, laskuttaminen, saatavien valvonta ja maksujen suorittaminen. (Sakki 2014, 16) Toimitusketjun hallinta sisältää kaikki materiaalivirrat raaka-aineiden hankinnasta lopputuotteiden toimittamiseen asiakkaalle. Materiaalivirtojen lisäksi se sisältää kuitenkin myös materiaalivirtoihin liittyvät tietovirrat, jotka hallitsevat ja rekisteröivät materiaalien liikkumista. (Mentzer et al. 2001, 16)

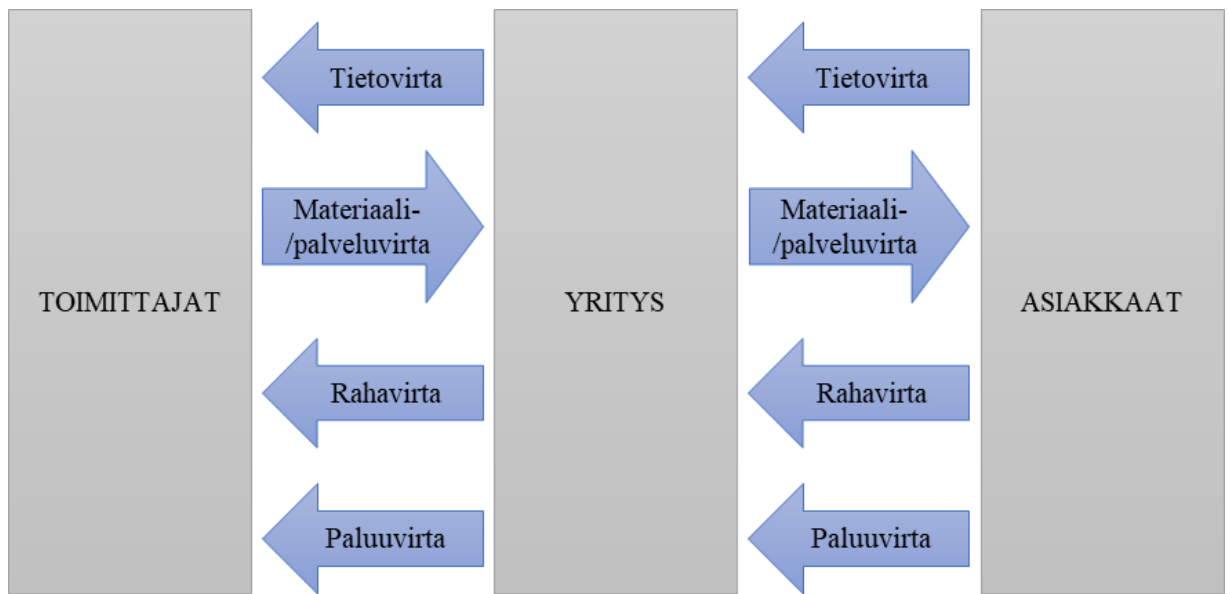
Taulukkoon 1 on tiivistetty toimitusketjun hallinnan eri osat, jotka on jaettu hallintaprosesseihin ja niihin liittyviin liiketoimintoihin. Hallintaprosesseja johtaa tiimi, joka koostuu eri liiketoimintojen johtajista ja niiden toiminnan kannalta on tärkeää, että tiettyihin hallintaprosesseihin liittyvät liiketoiminnot toimivat hyvin, koska esimerkiksi ilman toimivaa tuotantoa on vaikea täyttää tilauksia. Myös asiakassuhteiden hallinnassa on tärkeää, että toimitusketju toimii, koska yleensä asiakkaat toivovat nopeaa ja sujuvaa asiointia yrityksen kanssa, esimerkiksi myynnin osuus asiakassuhteiden hallinnassa on suuri. (Lambert 2014, 10) Tässä työssä käsitellään enemmän toimitusketjun hallintaa tukevia liiketoimintoja ja niistä erityisesti tuotantoa ja logistiikkaa.

Taulukko 1: Toimitusketjun hallinnan osat (Lambert 2014, 3, 10)

Toimitusketjun hallintaprosessit	Hallintaprosesseihin liittyvät liiketoiminnot
<ul style="list-style-type: none"> • Asiakassuhteiden hallinta • Toimittajasuhteiden hallinta • Kysynnän hallinta • Tilausten täyttäminen • Tuotantovirtojen hallinta • Tuotekehitys ja kaupallistaminen • Palautusten hallinta 	<ul style="list-style-type: none"> • Ostot • Logistiikka • Markkinointi ja myynti • Rahoitus • Tutkimus- ja kehittämistoiminta • Tuotanto

Logistiikka käsitteenä pitää sisällään hankintatoimeen, varastointiin, kuljetukseen ja jakeluun liittyvien materiaalien ja palveluiden suunnittelun, toteutuksen ja seurannan. Tähän käsitteeseen sisältyy yrityksen tulo-, sisä- ja lähtölogistiikka. Tulologistiikkaan kuuluu saapuvan tavaran vastaanotto, tarkastus, purkaminen ja varastointi. Sisälogistiikka on tuotteiden käsittelyä oman organisaation sisällä, kun kyseessä ei ole tulo- tai lähtölogistiikka. Sisälogistiikan toimintoja voivat olla esimerkiksi osien keräily kokoonpanoa varten tai tuotteiden sijoittaminen välivarastoon. Lähtölogistiikalla taas tarkoitetaan tuotteiden keräilyä varastosta, niiden pakkaamista sekä kuljetusta ja jakelua. (Ritvanen et al. 2011, 20-21)

Kuva 1 esittää logistiikkaprosessin yksinkertaistetusti. Se siis perustuu materiaalivirtoihin toimittajalta yrityksen kautta asiakkaalle ja tieto- ja rahavirtoihin asiakkailta yrityksille ja yrityksiltä toimittajille. Asiakkailta toimittajille päin kulkee myös paluuvirtoja, jotka syntyvät palautetuista tuotteista tai kierrätetyistä tuotteista ja niiden pakkauksista. Paluuvirtoihinkin voi kuulua rahavirtoja, esimerkiksi romumetallin kierrätyksestä saatava hyvitys. (Ritvanen et al. 2011, 20)



Kuva 1: Logistiikkaprosessi (Ritvanen et al. 2011, 22)

2 DIGITAALINEN KAKSONEN

Tässä luvussa on tarkoituksena syventyä digitaalisen kaksosen käsitteeseen ja selvittää, millaisia ominaisuuksia sillä on. Tämän jälkeen perehdytään digitaalisen kaksosen hyötyihin ja haasteisiin sekä selvitetään, millaisia sovelluskohteita sillä on.

Yksi ensimmäisistä digitaalisen kaksosen määritelmistä oli National Aeronautics and Space Administration:in (NASA) määritelmä, jonka mukaan digitaalinen kaksonen on integroitu, monifysikaalinen, usean mittakaavan todennäköisyysperusteinen simulaatio rakennetusta ajoneuvosta tai järjestelmästä, joka käyttää parhaita saatavilla olevia fyysisiä malleja, anturipäivityksiä ja historiatietoja peilaamaan fyysisen kaksosen tiloja (Roy et al. 2020, 3692). Digitaaliset kaksoset voidaan määritellä fyysisiksi tai virtuaalisiksi koneiksi tai tietokonepohjaisiksi malleiksi, jotka simuloivat tai jäljittelevät fyysisen kokonaisuuden. Peilattava fyysinen kokonaisuus voi olla esine, prosessi, ihminen tai ihmiseen liittyvä piirre. Se ei kuitenkaan ole pelkkä yksinkertainen malli tai simulaatio vaan se on älykäs ja kehittyvä malli, joka on fyysisen kokonaisuuden virtuaalinen vastine. Digitaalinen kaksonen seuraa fyysisen kaksosensa elinkaarta hallitakseen ja optimoidakseen prosessejaan ja toimintojaan. Kaksosprosessi mahdollistetaan digitaalisen kaksosen, sen fyysisen kaksosen ja sen ulkoisen ympäristön jatkuvalla vuorovaikutuksella, viestinnällä ja synkronoinnilla. (Barricelli, Casiraghi & Fogli 2019, 167656)

Digitaalisen kaksosen käsitettä voidaan katsoa niin laajasta kuin kapeammastakin näkökulmasta. Kapeasti katsottuna digitaalinen kaksonen on joukko virtuaalista tietoa, joka kuvaa kokonaisuudessaan potentiaalisen tai oikean fyysisen kokonaisuuden mikroatomitasosta makrogeometriseen tasoon. Laajemmasta näkökulmasta tarkasteltuna digitaalinen kaksonen on integroitu järjestelmä, joka voi simuloida, valvoa, laskea, säätää ja hallita järjestelmän tilaa ja prosessia. (Zheng, Yang & Cheng 2019, 1142)

2.1 Digitaalisen kaksosen historia

Digitaalisen kaksosen historia on melko lyhyt. Syy tähän on sen kehityksen alkuvaiheen rajoittunut teknologia. Digitaalisen kaksosen teoreettinen kehitys koostuu kolmesta vaiheesta, jotka ovat idean muotoutuminen, sen itäminen ja lopulta kasvu. (Tao et al. 2019, 2407)

Michael Grieves esitteli digitaalisen kaksosen konseptin epävirallisesti vuonna 2002 tuotteen elinkaarihallintaa käsittelevän esityksensä ohessa. Myöhemmin hänen mallinsa digitaalisesta kaksosesta virallistettiin. Malli koostui kolmesta pääelementistä, jotka ovat: 1. todellinen tila, joka sisältää fyysisen kohteen, 2. virtuaalinen tila, joka sisältää virtuaalisen kohteen ja 3. linkki datavirroille todellisesta tilasta virtuaaliseen tilaan sekä virtuaalisesta tilasta todelliseen tilaan. (Barricelli et al. 2019, 167654)

Vuosina 2003–2011 muun muassa esineiden internet, anturitekniikat, big data -analytiikka ja simulointitekniikat kehittyivät nopeasti, jonka johdosta myös digitaalisen kaksosen kehitys lähti nousuun. Digitaalisen kaksosen kehittyminen vaati siis muiden tekniikan alueiden kehittymistä. Aluksi digitaaliseen kaksoseen suhtauduttiin epäilevästi, koska pitkän aikavälin visioita digitaalisen kaksosen vaikutuksista oli vain vähän. Vuonna 2012 NASA antoi tarkemman määritelmän konseptista ja osoitti sen hyödyt. Tämän jälkeen digitaalisen kaksosen tutkimukseen panostettiin entistä enemmän ja niille löydettiin lukuisia sovellusmahdollisuuksia myös ilmailuteollisuuden ulkopuolelta, joka edisti digitaalisen kaksosen kehitystä entisestään. (Tao et al. 2019, 2407)

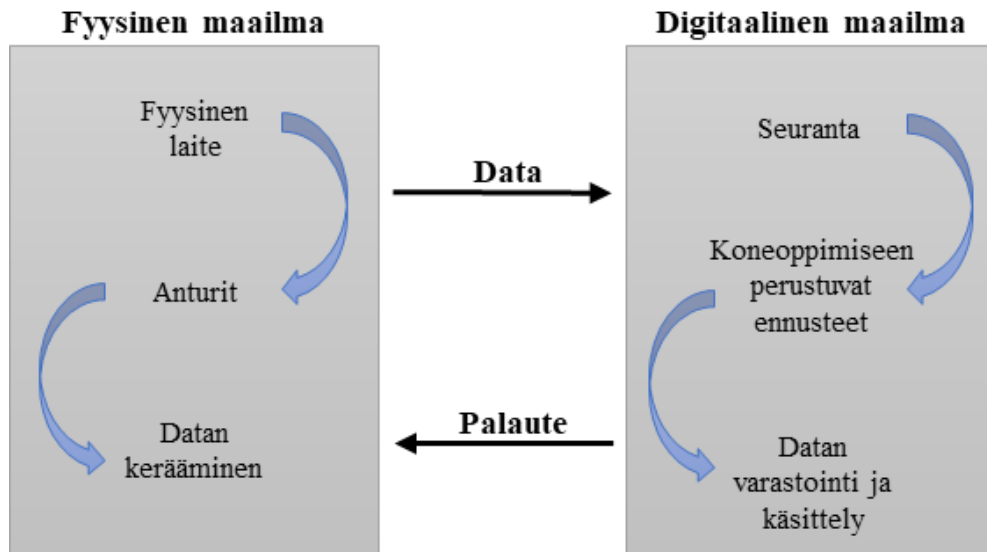
2.2 Digitaalisen kaksosen ominaisuudet

Toimiakseen digitaalinen kaksonen vaatii kolme komponenttia. Ensimmäinen komponentti on kohteen digitaalinen päämalli, joka sisältää suunnitelman tai piirustukset fyysisestä kappaleesta, sen ominaisuudet ja siihen kuuluvat prosessit. Toinen tarvittava komponentti on sensorit, jotka seuraavat ympäristön parametreja todellisessa toimitusketjussa. Viimeisenä komponenttina digitaalinen kaksonen tarvitsee yhteyden digitaalisesta päämallista fyysiseen kappaleeseen sensoreiden keräämän datan avulla. Tällä linkillä digitaalinen kaksonen eroaa tavallisesta laskennallisesta mallista. (Defraeye et al. 2021, 246-247)

Digitaaliseen kaksoseen liittyy myös kolme viestintäprosessia: viestintäprosessi fyysisen ja digitaalisen kaksosen välillä, viestintä digitaalisen kaksosen ja ympäröivässä ympäristössä olevien muiden digitaalisen kaksosen välillä sekä digitaalisen kaksosen ja asiantuntijoiden, jotka ovat vuorovaikutuksessa ja operoivat digitaalista kaksosta käytettävissä olevien rajapintojen kautta, välillä. Kaikki näissä viestintäprosesseissa vaihdetut tiedot tallennetaan tiedon varastointijärjestelmään. (Barricelli et al. 2019, 167659)

Nykyisin tietokoneiden laskentateho ja tallennusvaihtoehdot big datalle ovat lisääntyneet, analyysitekniikat kehittyneet ja erilaista tietoa voidaan paremmin yhdistellä. Tämän seurauksena digitaalisista kaksosista mallintaa rikkaampia, vähemmän eristäytyneitä sekä paljon kehittyneempiä ja realistisempia malleja kuin ennen. (Kuehn 2018, 267)

Kuvassa 2 on esitetty mahdollinen kehys digitaaliselle kaksoselle. Se kuvaa linkin fyysisen ja digitaalisen maailman välillä. Fyysiseen maailmaan voi kuulua esimerkiksi koneen fyysisiä osia, joista erilaisilla antureilla ja muilla tiedonkeruulaitteilla kerätään dataa. Kerätyt tiedot lähetetään virtuaaliseen tilaan, jossa niitä analysoidaan koneen prosessin ja tilan seuraamiseksi. Digitaalisessa maailmassa käytetään erilaisia koneoppimisalgoritmeja ja simulaatioita ennusteiden luomiseksi ja yksittäisten koneen osien seuraamiseksi. Tämän seurauksena tietoja saadaan siirrettyä fyysiselle maailmalle reaaliaikaista ohjausta varten. Virtuaalimaailma yhdistelee koneen osien historiatietoja niiden nykytilaan ja voi siten ennustaa esimerkiksi komponentin käyttöikä. Palaute digitaalisesta maailmasta fyysiseen maailmaan voi olla esimerkiksi ennusteita hyödyllisistä parametreista prosessin arvioimiseksi tai ehdotuksia käyttäjälle, kuinka varmistaa turvallinen toimintatapa. (Roy et al. 2020, 3692)



Kuva 2: Viitekehys digitaalisen kaksosen toiminnasta (Roy et al. 2020, 3693)

2.2.1 Anturit

Digitaalisen kaksosen mallia luotaessa ja sitä käytettäessä tarvitaan fyysisestä kaksosesta ajantasaista tietoa. Eri lähteistä saadun datan yhdistely uuden tiedon tuottamiseksi, tekoälysovellukset ja esineiden IoT-antureita hyödyntävä big data -analytiikka mahdollistavat viestinnän ja älykkään vuorovaikutuksen fyysisen ja digitaalisen kaksosen välillä. (Barricelli et al. 2019, 167656-167657)

Erityisesti anturitiedoilla on suuri merkitys digitaalisen kaksosen toiminnan kannalta, esimerkiksi tietyn koneen digitaaliselle kaksoselle anturitiedot kerätään erilaisista antureista, joita käytetään koneistuksen seurannassa ja analysoinnissa. Näitä antureita voivat olla sähkövirta-anturi tehon mittaamiseen, kiihtyvyyssanturi värinän mittaamiseen ja dynamometri voiman mittaamiseen. (Cai, Starly, Cohen & Lee 2017, 1033) Näiden lisäksi erilaisia, niin langattomia kuin langallisiakin, antureita on monenlaisia. Yleisimpiä ovat kuitenkin esimerkiksi lämpötila-, paine-, pinta-, nopeus- ja virtausanturit. (Rayes & Salam 2019, 7)

2.2.2 Ohjelmistot ja työkalut digitaalisen kaksosen rakentamiseen

Kuvassa 3 on esitetty digitaalisen kaksosen erilaisia digitaalisen kaksosen käytön työkaluja. Työkalut on jaettu alusta-, simulointi-, optimointi- sekä diagnostiikka- ja ennustepalvelutyökaluihin. Alustatyökalut voivat yhdistää eri tekniikoita kuten big data tai tekoäly. Esimerkiksi ThingWorks- alusta voi liittää digitaalisen kaksosen mallin käytössä

oleviin tuotteisiin, näyttää anturitiedot ja analysoida tuloksia verkkosovellusten kautta. Vastaavasti Siemensin lanseeraama MindSphere-alusta voi välittää antureiden, ohjaimien ja erilaisten tietojärjestelmien keräämät tiedot pilvipalveluun reaaliajassa suojattujen kanavien kautta. Diagnostiikka- ja ennustetyökalut taas voivat mahdollistaa esimerkiksi laitteille älykkään ennakoivan huoltostrategian analysoimalla ja käsittelemällä digitaalisen kaksosen saamia tietoja. Esimerkiksi Matlabia voidaan datalähtöisiin menetelmiin, kuten koneoppiminen, yhdistettynä käyttää jäljellä olevan käyttöiän määrittämiseen, että laitteiden huollon ja vaihtamisen ajankohta voidaan optimoida. Optimointityökalujen toimintaperiaate perustuu satoihin tai tuhansiin mitä jos -skenaarioihin. Skenaarioiden simulointi mahdollistaa järjestelmän tai laitteen toiminnan optimoinnin tai hallinnan riskien minimoimiseksi, kustannusten ja energiankulutuksen vähentämiseksi sekä tehokkuuden lisäämiseksi. Esimerkiksi Siemensin Plant Simulator -ohjelmiston avulla voidaan optimoida tuotantolinjan aikataulutusta ja tehdasasettelua. Simulointityökaluilla voidaan suorittaa diagnostiikkaa, mutta niillä voidaan myös saada tietoja tulevaisuuden suunnittelun parantamiseksi. (Qi et al. 2021, 18)



Kuva 3: Työkaluja digitaalisen kaksosen sovelluksiin (Qi et al. 2021, 17)

2.3 Digitaalisen kaksosen haasteet

Digitaalisen kaksosen ensimmäisenä haasteena on rakentaa toimiva virtuaalimalli, joka koostuu useista alamoduuleista. Seuraavaksi virtuaalinen malli ja fyysinen kokonaisuus on kyettävä linkittämään toisiinsa. Tämän lisäksi linkin on toimittava reaaliajassa. (Roy et al. 2020, 3699)

Myös big data -analytiikan sisällyttäminen digitaalisen kaksosen malliin on haaste. Prosessi tuottaa valtavan määrän tietoa tuotteen eri vaiheissa, joten tietojen oikea ja looginen hallinta on välttämätöntä. Jotta informaatio saadaan kerättyä antureista fyysisiksi parametreiksi, haasteena on valita sopiva signaalinkäsittelytekniikka käytettäväksi. Oikeat tekniikat auttavat tunnistamaan prosessin seurannan tarpeet nopeasti, jotta tarvittavat prosessin hallintatoimet voidaan suorittaa reaaliajassa. Myös fyysisen, virtuaalisen ja sosiaalisen maailman (informaatio fyysisestä esineestä ja digitaalisen kaksosen simulaatioista sekä asiakkailta saatu tieto)

integroitua koskeva tietovirta on haaste, joka on otettava huomioon tiedonhallintajärjestelmässä. (Roy et al. 2020, 3699)

Lisäksi digitaalisen kaksosen tulisi olla ”älykäs”. Mallin haasteena on kuitenkin kerääntyneen datan avulla älykkyyden kasvattaminen, että sitä voidaan käyttää uudelleen ja auttaa parantamaan fyysistä kaksosta jatkuvasti. (Roy et al. 2020, 3699) Digitaaliseen kaksoseen pohjautuvan tuotesuunnittelun, valmistuksen ja palvelun syvälinen oppiminen on myös yksi haaste, johon tulisi pystyä vastaamaan mahdollisimman nopeasti. Myös syvälinen oppimisen käyttäminen jatkuvaan parantamiseen virtuaalidatan ja fyysisen datan yhdistämisen ja kohdistamisen avulla, on vielä suuri haaste. (Tao et al. 2018, 3575)

Muita haasteita, joita digitaalisen kaksosen toteuttamisessa voi esiintyä, ovat esimerkiksi riittävän pätevän henkilöstön puute, tietojen yhteensopivuus tai yksittäisen digitaalisen alustan ja standardiarkkitehtuurin puute. Digitaalisen kaksosen kustannukset voivat myös nousta erittäin korkeiksi ja sen taloudellisia vaikutuksia voi olla haastavaa laskea ja arvioida. (Simchenko, Tsohla & Chyvatkin 2019, 807)

2.4 Digitaalisen kaksosen käyttökohteet ja hyödyt

Digitaalisen kaksosen yhdistäminen fyysisiin kokonaisuuksiin ei ole yksivaiheinen, vaan se perustuu jatkuvaan iteratiiviseen päivittämiseen ja osittaiseen approksimointiin, jonka takia se soveltuu parhaiten jo valmiiksi olemassa olevaan tekniseen järjestelmään ja sovelluksen vaatimuksiin. Tämän takia käytännön sovelluksissa digitaalisella kaksosella on kolme näkökulmaa, joihin se keskittyy. Nämä näkökulmat ovat data, malli ja palvelu. Dataan sisältyvät esimerkiksi tuotesuunnittelu-, tuotanto-, käyttö- ja ylläpitotiedot sekä erilaisten liiketapahtumien tiedot. Malliin sisältyy laskenta-analyysimalleja ja toiminnanohjausmalleja. Palveluun taas voidaan lukea pääsy liiketoimintasovellusten toimintoihin, tietojen käyttöoikeudet ja toimintokutsut useiden kaksosten välillä sekä yhteys kaksosten ja niitä vastaavien fyysisten yksiköiden välillä. (Jiang et al. 2021, 2-3)

Siitä lähtien, kun digitaalisen kaksosen konsepti julkaistiin, sitä on käytetty useilla teollisuudenaloilla (Tao et al. 2018, 3566). Sitä on myös käytetty monissa tuotteen elinkaaren vaiheissa, kuten tuotesuunnittelussa, valmistuksessa sekä käyttö- ja ylläpitovaiheessa (Zheng et al. 2019, 1143). Digitaalisen kaksosen hyötyihin voidaan siis lukea myös sen sovellettavuus useille eri toimialoille ja kohteille. Se ei ole vain yhdelle tuotteelle tai toimialalle soveltuva, vaan sitä voidaan muokata siten, että digitaalinen kaksonen voidaan luoda mille vain kohteelle, josta saadaan riittävästi tietoja simulointia varten.

Kyky seurata, tallentaa ja hallita fyysisen systeemin olosuhteita ja muutoksia antaa mahdollisuuden lisätä tekoälyn ennustavia ja ohjeellisia tekniikoita virheiden ennustamiseksi, mahdollisten tulosten testaamiseksi ja itsensä parantavien -mekanismien aktivoimiseksi. Tämä tuo niin sanotun ennakoivan lähestymistavan huoltoon, jossa vikoja ennustetaan ja korjauksia tai muutoksia voidaan simuloida virheiden välttämiseksi ja parhaiden ratkaisujen löytämiseksi. (Barricelli et al. 2019, 167656) Digitaalisen kaksosen tärkeimpinä etuina voidaan siis pitää optimointia ja riskienhallintaa. Kun fyysiselle objektille, palvelulle tai prosessille on luotu digitaalinen kaksonen, tosielämän viat ja virheet voidaan ennustaa niiden esiintymishetkellä ja tarvittavat muutokset voidaan sisällyttää vikojen ja virheiden välttämiseksi. (Roy et al. 2020, 3699) Eli esimerkiksi jonkin prosessin osan häiriö voidaan havaita heti ja korjaustoimenpiteitä voidaan tehdä heti sen sijaan, että pieni häiriö havaitaan vasta, kun se on aiheuttanut suurempaa vauriota, jolloin myös korjaaminen on haastavampaa ja siten myös kalliimpaa.

Tuotesuunnittelun osalta erityisesti NASA on hyödyntänyt teknologiaa esimerkiksi ajoneuvojen suorituskyvyn ennustamiseen. Ja esimerkiksi Yhdysvaltain ilmavoimien tutkimuslaboratorio hyödyntää digitaalista kaksosta käyttö- ja ylläpitovaiheessa ennustamaan rakenteellista käyttöikä turvallisuu den ja luotettavuuden parantamiseksi. Myös esimerkiksi Tesla kehittää digitaalisen kaksosen jokaiselle tuottamalleen autolle, joka mahdollistaa synkronisen tiedonsiirron autojen ja tehtaan välillä. (Zheng et al. 2019, 1143) Tehtaalla tekoäly tulkitsee saapuvat anturitiedot ja määrittää niiden perusteella, toimiiko auto toivotulla tavalla vai tarvitseeko se huoltoa. Tekoälyn ja esineiden internetin yhdistämällä Tesla pystyy jatkuvasti oppimaan reaali maailmasta ja optimoimaan jokaisen autonsa toiminnan erikseen reaaliajassa. (Coors-Blankenship 2020)

Tuotteiden seurannan ja kehittämisen lisäksi digitaalisella kaksosella voidaan myös tukea taloudellista päätöksentekoa, koska siihen voidaan yhdistää fyysisen vastineen taloudellisetkin tiedot, kuten materiaalien ja työvoiman kustannukset. Reaaliaikaisen datan ja kehittyneiden analyysimenetelmien avulla yritykset voivat tehdä nopeampia ja parempia päätöksiä siitä, ovatko valmistuksen arvoketjuun tehdyt muutokset taloudellisesti järkeviä. (Arnautova 2021)

Digitaalinen kaksonen voidaan luoda myös jopa ihmiselle. Tässä henkilölle luodussa digitaalisessa kaksosessa on tietoja henkilön historiasta sekä nykyisestä tilasta. Se voi olla hyödyllinen erilaisten sairauksien esiintyvyyden ennustamisessa ja digitaalinen kaksonen antaa ihmiselle näiden ennusteiden perusteella suosituksia terveyden parantamiseksi. On esimerkiksi raportoitu, että digitaalisesta kaksosesta on hyötyä etenkin diabeetikoille, koska se seuraa heidän päivittäistä toimintaansa ja antaa suosituksia elämänlaadun parantamiseksi. Terveyden lisäksi ihmisen digitaalisesta kaksosesta voi olla hyötyä tuotantolaitoksissa, koska se vahvistaa yhteyttä työntekijöiden ja laitteiden välillä. (Roy et al. 2020, 3693)

Yksi esimerkki käytössä olevasta digitaalisen kaksosen sovelluksesta on yhdysvaltalainen paineilmatuotteiden valmistaja Kaeser, joka käytti digitaalista kaksosta siirtyäkseen pelkän tuotteen myynnistä palvelun myyntiin. Sen sijaan, että laitteet asennettaisiin asiakkaiden toimipisteisiin ja toiminta jätettäisiin asiakkaalle, Kaeser ylläpitää laitteita koko niiden elinkaaren ajan ja veloittaa asiakkailta kulutuksen mukaan kiinteän hinnan sijaan. Digitaalisten kaksosten verkosto mahdollistaa yrityksen laitteiden kunnon seurannan kellon ympäri ja asiakkaiden ilman kulutuksen mittaamisen. Reaaliaikaiset tiedot auttavat Kaeseria varmistamaan laitteiden käyttöajan ja veloittamaan tarkan rahamäärän jokaisessa laskutusjaksossa. Kaeser on saavuttanut digitaalisen kaksosen käytöllä taloudellista hyötyä, kun se on onnistunut vähentämään hyödykekustannuksia 30 %:lla. (Ohnemus 2018)

Myös esimerkiksi brasilialaisella traktorivalmistaja Staralla on digitaalinen kaksonen käytössä. Liittämällä traktoreihin IoT-antureita yritys voi parantaa laitteidensa suorituskykyä. Stara pystyy ennakoimaan traktoreiden toiminnan reaaliajassa ja estämään ennakoivasti laitteiden toimintahäiriöt esimerkiksi ennakoivan huollon avulla ja siten parantamaan myös niiden käyttöikä. Laitteiden toiminnan optimoinnin lisäksi Stara on hyödyntänyt digitaalista kaksosta myös uusien liiketoimintamallien luomiseen. Rikkaalla IoT-anturidatalla Stara lanseerasi uuden

tuottoisan palvelun, joka tarjoaa viljelijöille reaaliaikaisen kuvan yksityiskohtaisemmista viljelykasvien viljelyolosuhteista ja maataloustuotannon parantamisesta. Tämän ansiosta viljelijät ovat saavuttaneet ainakin kahdenlaista hyötyä. He ovat vähentäneet siementen käyttöä 21 % ja lannoitteiden käyttöä 19 %. (Ohnemus 2018)

3 DIGITAALINEN KAKSONEN TOIMITUSKETJUN HALLINNASSA

Zhengin et al. (2019, 1142) mukaan digitaalinen kaksonen pystyy toteuttamaan logistiikan, pääomavirran ja tietovirran järjestelmällisen, kattavan ja reaaliaikaisen hallinnan, koordinoimaan ja optimoimaan tehokkaasti järjestelmän kaikki liiketoiminnot. Luomalla digitaalisen kaksosen koko toimitusketjuprosesseista alkaen raaka-aineiden hankinnasta päättyen valmiiseen lopputuotteeseen yritykset voivat tarjota kumppaneilleen täydellisen näkyvyyden tuotteen koko elinkaareen ja samalla lisätä toimintansa tehokkuutta (Rosemann 2018). Tässä luvussa selvitetään, miten digitaalista kaksosta voidaan toimitusketjun hallinnassa hyödyntää ja mille pienemmille osa-alueille se soveltuu. Erityisesti keskitytään toimitusketjun hallintaprosessien kannalta tärkeisiin liiketoimintoihin, eikä niinkään itse hallintaprosesseihin.

3.1 Toimitusketjuprosessin digitaalinen kaksonen

Toimitusketjun hallinnan kannalta tärkeiden tietovirtojen osalta digitaalista kaksosta voidaan hyödyntää toimittamaan toimitusketjun eri sidosryhmille käytännöllisiä tietoja. Usein digitaalisella kaksosella saatavat tiedot ovat hyödyllisempiä kuin niin sanotusti ”yleisillä” mittareilla saadut arvot. Esimerkiksi tuotteen sisältä mitatun lämpötilan perusteella saadaan tarkempi arvio tuotteen säilyvyydestä kuin säilytystilan yleisen lämpötilan perusteella. (Defraeye et al. 2021, 253)

Verkostion mallin ja maantieteelliset tiedot, toimintaparametrit, häiriöt ja palautumisen sekä suorituskyvyn huomioonottava simulaatiomalli voi toimia toimitusketjulle rakennettavan menestyvän digitaalisen kaksosen perustana (Ivanov, Dolgui & Sokolov 2019, 325-326). Tämä digitaalinen kaksonen voidaan määritellä yksityiskohtaiseksi simulointimalliksi todellisesta toimitusketjusta, joka ennustaa toimitusketjun käyttäytymisen ja dynamiikan toimitusketjun keskipitkien tai lyhytaikaisten päätösten tekemiseksi (Marmolejo-Saucedo 2020, 2147). Sitä voidaan käyttää myös toimitusketjun monimutkaisten riskien analysointiin, valmiussuunnitelman kehittämiseen ja tehokkaampaan operatiiviseen hallintaan (Ivanov et al. 2019, 326).

Keskpitkän aikavälin päätökset liittyvät enimmäkseen siihen, kuinka toimitusketjun tulisi toimia, kuten suunnitteluun ja optimointiin. Digitaalinen kaksonen auttaa tarkastelemaan ja parantamaan toimitusketjua ja sen taustalla olevia prosesseja, resursseja ja logiikkaa. Simulointia voidaan tarvita muutaman kuukauden verran ennen kuin voidaan suorittaa näitä toimintoja. Lyhytaikaiset päätökset taas liittyvät lähinnä mahdollisten ongelmien tunnistamiseen ja ratkaisujen analysointiin. Tällaiseen päätöksentekoon ei tarvita yleensä kuin muutaman päivän tai viikon simulointia. (AnyLogistix n.d., 4)

Toimitusketjun digitaalinen kaksonen mahdollistaa erityyppisten tietojen tarkastelun toimitusketjun eri osapuolten välillä, kuten myös niiden yhdistämisen. Tämä taas mahdollistaa selkeämmän ja luotettavamman yhteyden toimitusketjun kaikkien osapuolten välillä. (Marmolejo-Saucedo 2020, 2153) Luotettavuutta voidaan lisätä myös asiakkaita kohtaan. Ruoan toimitusketjussa digitaalinen kaksonen tarjoaa toimitusketjun kaikille organisaatioille täydellisen kuvan tuotteen matkasta maatilalta tai valmistajalta. Se myös antaa tuotteen ostajille mahdollisuuden nähdä, miten tuote on saapunut ruokakauppaan. Esimerkiksi ruutukoodin (engl. *Quick Response code*, QR code) skannaamalla he voivat nähdä, onko jäätelö kuljetettu kylmäkuljetusautolla, missä kahvipavut on kerätty tai kuinka kauan leipä on ollut varastossa ennen kuin se lähetettiin tehtaalta eteenpäin. Tällainen avoimuus lisää ostajien luottamusta yritystä kohtaan, minkä seurauksena he ostavat yhä todennäköisemmin tämän yrityksen tuotteita. (Rosemann 2018).

Toimitusketjun digitaalisen kaksosen luomiseen ja käyttöön on jo olemassa simulaatiomallinnuspaketteja kuten ARENA ja AnyLogistix. Näiden lisäksi on myös matemaattista ohjelmointia käyttäviä alustoja, jotka on suunniteltu ratkaisujen optimointimallien nopeaan kehittämiseen ja käyttöönottoon. (Barykin, Bochkarev, Kalinina & Yadykin 2020, 1508) Lisäksi myös muita digitaalisen kaksosen luotuja työkaluja voidaan käyttää myös toimitusketjun yhteydessä.

Esimerkiksi Accenture on tehnyt töitä usean yrityksen kanssa digitaalisen kaksosen lisäämisessä toimitusketjuun, ja he ovat nähneet monia etuja, joita tämä on yrityksille tuonut. Toimitusketjun digitaalisilla kaksosilla on esimerkiksi saatu pienennettyä liike- ja kuljetuskustannuksia ja kasvatettua huomattavasti suorituskykyä. (Lagunas 2021)

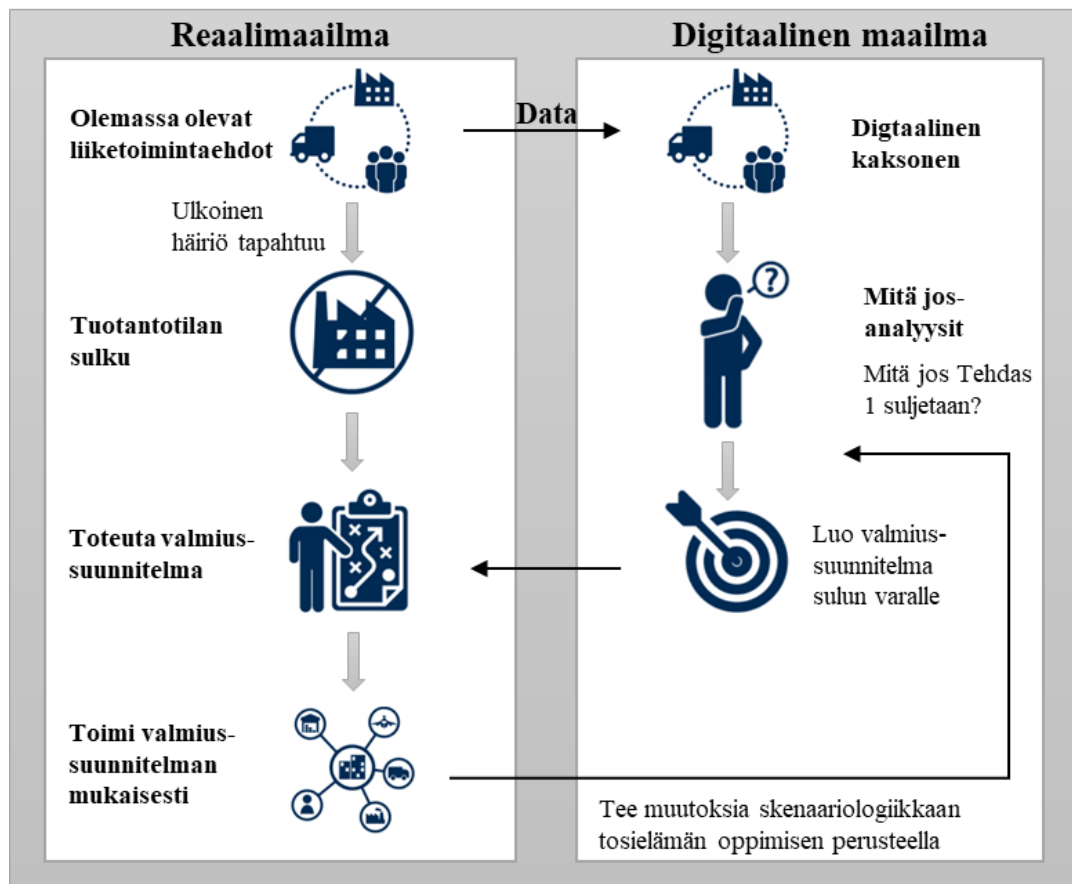
Toimitusketjun digitaalisen kaksosen yksi suurimmista haasteista on kuitenkin tietojen integrointi, koska yritysten jakamat tiedot toimitusketjun eri vaiheissa sisältävät manuaalisesti syötettyjen ja lähetettyjen tai vastaanotettujen tietojen, kuten sopimusien ja tilauksien, lisäksi myös esimerkiksi antureista suoraan saatavia tietoja, kuten sijainteja tai varastotasoja. Toimitusketjussa digitaalisen kaksosen haasteena on myös tietoturvan. Koska toimitusketjuissa tietoja tulee useilta osapuolilta, on riskinä esimerkiksi yritystietojen vuotaminen. (Chen & Huang 2021, 6) Myös muut digitaalisen kaksosen haasteet, kuten henkilöstön riittävän pätevyyden puute, näkyvät toimitusketjun digitaalisen kaksosen luomisessa.

3.1.1 Häiriöriskien hallinta

Toimitusketjun digitaalisen kaksosen teoriassa on selvitetty myös digitaalisen kaksosen mahdollisuuksia toimitusketjun häiriöriskien hallinnassa. Digitaalisen kaksosen avulla voitaisiin arvioida häiriön mahdolliset vaikutukset toimitusketjun suorituskykyyn ja optimoida palautumiseen vaadittavat menettelytavat jo ennen häiriön syntymistä. Ennakoivassa vaiheessa digitaalisessa kaksosessa käytettävää data-analytiikkaa voidaan käyttää myös realististen häiriöskenaarioiden luomiseen, jotka perustuvat menneiden häiriöiden riskitietoihin ja muihin toimitusketjun suunnitteluvaiheen tietoihin. Näitä tietoja voivat olla esimerkiksi toimittajien luotettavuustiedot. (Ivanov & Dolgui 2020, 6)

Häiriötä edeltävässä tilassa toimitusketjujen riskien visualisoinnin, toimittajien häiriöriskien arvioinnin ja mahdollisten toimituskatkosten ennustamisen lisäksi digitaalisilla kaksosilla voidaan myös laskea vaihtoehtoisten toimitusverkkojen topologiat ja varareitit sekä niiden arvioidut toimitusajat (Ivanov 2020, 12). Reaktiivisessa vaiheessa data-analytiikkaa käytetään häiriöiden tunnistamiseen reaaliajassa käyttämällä prosessin palautetietoja, joita kerätään esimerkiksi antureilla. Tämän data-analytiikan käytön tavoitteena on upottaa reaaliaikaiset häiriötiedot reaktiiviseen simulointimalliin palautuskäytäntöjen simulointia ja optimointia varten. (Ivanov & Dolgui 2020, 6) Digitaalisilla kaksosilla voidaan myös simuloida vaihtoehtoisia toimitusketjumalleja, joissa on häiriöttömiä verkkosolmuja, jotka riippuvat reaaliaikaisista varastotilanteen, kysynnän ja kapasiteetin tiedoista (Ivanov 2020, 12).

Kuvassa 4 on esitetty yksinkertainen esimerkki hyödystä, mikä digitaalisella kaksosella voidaan saada häiriötilanteessa, kuten hirmumyrskyn tai maailmanlaajuisen pandemian aiheuttamassa tuotantotilan sulussa. Reaalimaailman liiketoiminnoista kerätään dataa digitaaliselle kaksoselle, joka sitten voi verrata toimitusketjun nykyistä tilaa digitaaliseen malliin ja sen mitä jos -analyysihin. Vertailun perusteella se antaa sopivan toimintaohjeen. Esimerkiksi, jos tuotantotila joudutaan sulkemaan viikoksi, saattaa malli osoittaa, että muissa verkoston tiloissa on varastossa saman tai vastaavan tuotekoodin tuotteita, joita yritys voi toimittaa asiakkaalle, sen sijaan, että se yrittäisi nopeuttaa tuotantoprosessia tai ryhtyisi muihin kalliimpiin toimenpiteisiin. Vastaavasti, jos tuotetta ei löydy valmiiksi verkostossa olevista tuotantolaitoksista, digitaalinen kaksonen voi arvioida mahdollisen tappion ja analysoida sellaisen kolmannen osapuolen lisäämisen vaikutuksia, joka pystyy nostamaan tuotantokapasiteettiaan lyhyellä varoitusajalla. Reaalimaailmassa yrityksen tarvitsee siis häiriötilanteessa laittaa digitaalisella kaksosella saatu toimintaohje toteen ja toimia sen mukaan kunnes saadaan uusia ohjeita ja häiriötilanteesta on selvitty. (Molino 2020)



Kuva 4: Digitaalinen kaksonen häiriötilanteessa (Molino 2020)

3.2 Raaka-aineiden hankinta ja tuotanto

Raaka-aineiden hankintaa helpottamaan digitaalisen kaksonen avulla ostajille laaditaan hankintasuunnitelma analysoimalla tarvittavien raaka-aineiden saatavuutta, tarjouksia, mahdollisia korvaavia tuotteita ja potentiaalisia toimittajia. Raaka-aineiden hankinnoissa otetaan huomioon valmistajan tietoja, kuten raaka-aineiden tyyppi, määrä ja suorituskyky sekä toimittajan tietoja kuten hinnat, etäisyys ja varastot. (Tao et al. 2018, 3564) Tässä käyttötarkoituksessa digitaalinen kaksonen voi siis auttaa hankintaosastoa säästämään aikaa mahdollisten toimittajien vertailussa, kun tietoja saadaan digitaalisen kaksonen avulla.

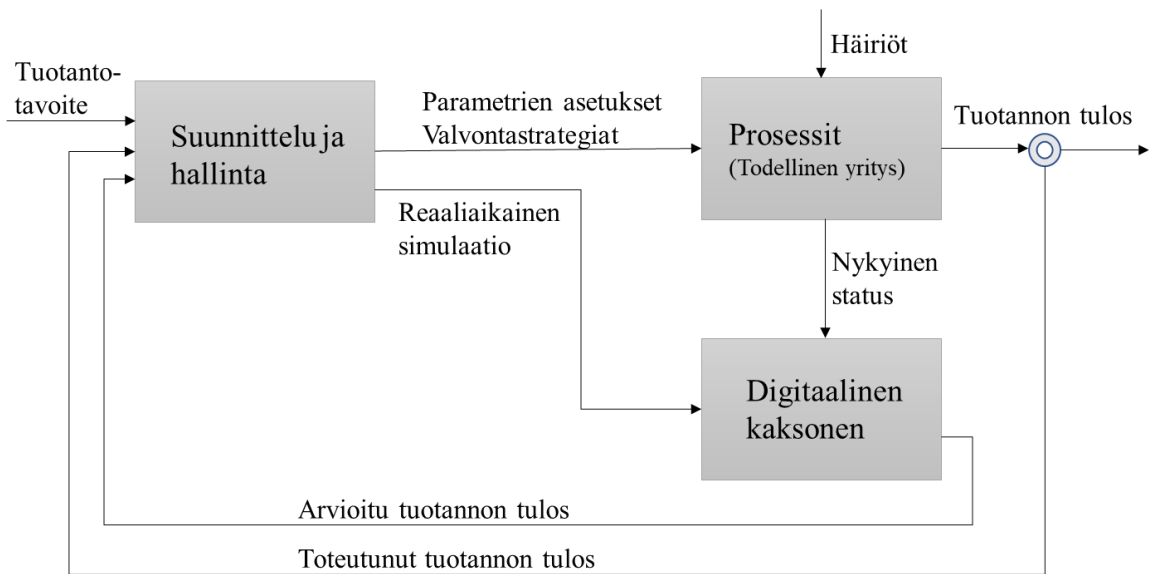
Tuotannossa digitaalinen kaksonen antaa mahdollisuuden simuloida ja optimoida tuotantojärjestelmää, mukaan lukien sen logistiset näkökohdat ja mahdollistaa tarkan visualisoinnin valmistusprosessista yksittäisestä osasta valmiiseen kokoonpanoon (Kritzinger, Karner, Traar, Henjes & Sihm 2018, 1018). Simulaation mahdollistamiseksi tuotantotekijöiden,

kuten koneiden, ihmisten ja materiaalien, ominaisuudet, suorituskyky, parametrit ja prosessiolosuhteet kerätään reaaliajassa ja tallennetaan digitaalisen kaksohen käytettäväksi (Tao et al. 2018, 3564).

Tuotannon pääaloista digitaalinen kaksohen auttaa tuotannon suunnittelua ja ohjausta, kunnossapitoa ja tilan pohjaratkaisun suunnittelua yhteisissä tavoitteessaan lisätä kilpailukykyä, tuottavuutta ja tehokkuutta. Suunnittelussa ja ohjauksessa se voi suunnitella tilauksia tilastollisiin oletuksiin perustuen. Lisäksi digitaalinen kaksohen antaa tehokasta päätöksenteon tukea yksityiskohtaisten diagnoosien avulla ja se suunnittelee ja toteuttaa tuotantoyksiköiden tilauksia automaattisesti. Digitaalinen kaksohen voi myös integroida, hallita ja analysoida koneita ja prosessidataa koneen elinkaaren eri vaiheissa, jotta tietoja voidaan käsitellä tehokkaammin ja saavuttaa parempi läpinäkyvyys koneen kunnosta. Tuotantotilan suunnittelun osalta digitaalinen kaksohen arvioi tuotantojärjestelmää jatkuvasti. (Kritzinger et al. 2018, 1018)

Tuotannossa digitaalista kaksosta voidaan käyttää komponentti-, omaisuus-, järjestelmä- tai prosessitasolla. Komponenttitasolla se keskittyy yhteen tärkeään tuotantoprosessin komponenttiin, omaisuustasolla digitaalinen kaksohen luodaan tuotantolinjan yhdelle laitteelle. Järjestelmätasolla taas digitaalisella kaksohella seurataan koko tuotantolinjaa ja prosessitasolla digitaalinen kaksohen tarkastelee koko valmistusprosessia aina tuotteen ja prosessin suunnittelusta ja kehityksestä valmistukseen asti. (Downey 2020)

Kuvassa 5 on esitetty yksinkertaistettu lähestymistapa digitaaliseen kaksohen tuotannon näkökulmasta. Digitaaliseen kaksohen sisältyy siis tuotantotavoitteen perusteella tehty reaaliaikainen simulaatio ja valmistusprosessista saatava nykyaikainen status. Näiden tietojen avulla digitaalisesta kaksohesta saadaan ennuste lopullisesta tuotannon tuloksesta. Tuotannosta saadaan koko ajan lisää tietoja toteutuneesta tuotannosta, jolla voidaan kehittää digitaalisen kaksohen toimintaa.



Kuva 5: Yksinkertainen lähestymistapa tuotannon digitaaliseen kaksoseen (Kuehn 2018, 263)

Tuotantotilan digitaalinen kaksosen koostuu näljästä osasta, fyysisestä tuotantotilasta, virtuaalisesta tuotantotilasta, tuotantotilan palvelujärjestelmistä ja tuotantotilan digitaalisen kaksosen datasta. Fyysinen tuotantotila on kokonaisuus, joka huolehtii tuotantotehtävien ja ennalta määrättyjen tilausten vastaanottamisesta ja tilausten toteuttamisesta lopputuotteiden tuottamiseksi. Virtuaalinen tuotantotila taas on tarkka digitaalinen malli fyysisestä tuotantotilasta, joka voi simuloida ja ennustaa tuotantosuunnitelmia ja -prosesseja, antaa optimointistrategioita palvelujärjestelmälle sekä seurata ja säätää tuotantoprosessia reaaliajassa. Palvelujärjestelmät tarjoavat tukia ja palveluita tuotteiden valmistukseen. Uuden tuotantotehtävän tullessa digitaalisen kaksosen datan ohjaamana luodaan alustavat resurssien kohdentamissuunnitelmat niin laitteille, ihmisille kuin materiaaleillekin. Digitaalisen kaksosen data sisältää tiedot fyysisestä tuotantotilasta, kuten koneiston kapasiteetti, ja virtuaalisesta tuotantotilasta sekä eri palvelujärjestelmistä, jotka se ottaa huomioon suunnitelmaa luodessa. Tämän jälkeen resurssien kohdentamissuunnitelman mukaan palvelujärjestelmät luovat tuotantosuunnitelmat, mitkä välitetään virtuaaliselle tuotantotilalle. Tämä suorittaa simuloinnin virtuaalitulassa ja selvittää mahdolliset ongelmat ennen varsinaista tuotantoprosessia. Palvelujärjestelmä muokkaa suunnitelmaa tarpeen mukaan ja simulointia ja suunnitelman päivitystä jatketaan niin monta kertaa, kunnes tuotantosuunnitelma on tarkistettu virtuaalisella tuotantotilalla kokonaan. Lopuksi fyysinen tuotantotila vastaanottaa tilauksia virtuaalisen tilan tuotantosuunnitelmien perusteella ja järjestää valmistusprosessit tilausten

mukaisesti. Valmistuksen aikana fyysisestä tilasta lähetetään reaaliaikaista dataa virtuaaliselle tilalle, jolloin se päivittää itseään ja vertaa toteutunutta tuotantoprosessia suunnitelmaan. (Tao et al. 2018, 3570)

Esimerkiksi Volvo on luonut digitaalisen kaksosen tuotantoprosessilleen. Tämä investointi auttoi Volvoa parantamaan toimintansa tehokkuutta ja pienentämään kustannuksia. Myös moottorin kokoonpanon ja laadunvalvonnan tarkastuslistan läpikäynti on saatu nopeutettua yli päivästä alle tuntiin. Näiden hyötyjen lisäksi sen toivotaan tuovan laadunvalvonnassa tuhansien eurojen säästöjä työasemaa kohti vuosittain. (Immerman & Lang 2019, 4)

3.3 Varastointi

Varastohallintajärjestelmän (engl. *Warehouse Management System*) käyttöönoton pitkäaikaisia hyötyjä voi olla vaikea ennustaa erityisesti liiketoiminnan olosuhteiden odottamattomien muutosten takia. Digitaalisella kaksosella pystytään kuitenkin käsittelemään myös tätä ongelmaa. (Baruffaldi, Accorsi & Manzini 2019, 252, 255)

Digitaalisella kaksosella voidaan tukea varastotilojen suunnittelua, jolloin tilan käyttöä voidaan optimoida ja tuotteiden, henkilöiden ja materiaalinkäsittelylaitteiden, kuten trukkien, liikkumista voidaan simuloida. Tämän lisäksi varastotoimien aikana digitaalista kaksosta voidaan päivittää jatkuvasti erilaisilla automaatiotekniikoilla kerätyillä tiedoilla, jotka yleistyvät varastoissa koko ajan. Näitä tekniikoita ovat esimerkiksi drone-pohjaiset kalustonlaskentajärjestelmät, automatisoidut ajoneuvot ja automaattiset varastointi- ja hakulaitteet. (Dohrmann, Gesing & Ward 2019, 23)

Varastoinnissa digitaalista kaksosta voidaan käyttää annettujen logistiikka- ja toimintapäätösten keskipitkän aikavälin vaikutusten ennustamiseen. Lisäksi sillä voidaan virtualisoida varastokäyttäytymistä toiminnanohjauksessa mahdollisesti tapahtuvien muutosten yhteydessä. Se siis testaa hallintopolitiikkojen reagointikykyä varastojen vaihteluun ja kysynnän kausiluonteisuuteen. (Baruffaldi et al. 2019, 255, 268)

Yksi varastohallintajärjestelmien ongelma on ollut tietojen vain osittainen saatavuus. Varastojen ominaisuuksien, kuten painon tai tilavuuden, tai asiakkaiden tavoitteiden, kuten kysyntäennusteiden tai tuotteiden elinkaaren, näkyvyyden puute voi siis rajoittaa varastohallintajärjestelmien tuottamia etuja. Päätösten vaikutusten ennustamisen lisäksi varastohallintajärjestelmälle luotu digitaalinen kaksonen voi kuitenkin auttaa luomaan luotettavia lisäarvosuhteita asiakkaisiin, koska se lisää tietoisuutta ja läpinäkyvyyttä varastonohjaukseen teollisuuden neljännellä aikakaudella. (Baruffaldi et al. 2019, 269)

Sopimuslogistiikkapalveluyritys DHL Supply Chain on toteuttanut Tetra Pakin Singaporen varastolle älykkään ratkaisun, joka hyödyntää digitaalista kaksosta. Digitaalisen kaksosen luomiseksi esimerkiksi varaston trukkeihin liitettiin IoT -tekniikkaa ja kaikki varastotiedot koottiin ja arvioitiin virtuaaliesityksessä. Varaston digitaalinen kaksonen toimittaa koko ajan ajantasaisia tietoja Singaporen fyysisestä varastosta ja tekee muutoksia jatkuvasti reaaliajassa. Lisäksi DHL:n ohjaustorni valvoo saapuvaa ja lähtevää tavaravirtaa varmistaakseen, että tavarat varastoidaan oikein 30 minuutin kuluessa vastaanottamisesta ja toimitukseen pakatut tavarat lähetetään 95 minuutin kuluessa. (Galea-Pace 2019, Rusch 2019)

3.4 Kuljetus

Tuotteiden kuljetuksen tarkkuuden ja oikea-aikaisuuden varmistamiseksi logistiikkajärjestelyt optimoidaan muun muassa varasto-, tilaus- ja sijaintitietojen perusteella (Tao et al. 2018, 3564). Ennen varsinaista kuljetusta lähetettävät tuotteet täytyy kuitenkin pakata. Pakkausten suunnittelu aiheuttaa kuitenkin useita haasteita teollisuudelle. Esimerkiksi Math2Marketin kehittämät materiaalien digitaaliset kaksoset voivat auttaa yrityksiä ymmärtämään uusien materiaalien suorituskykyä pakkaussovelluksissa. Nämä digitaaliset kaksoset pystyvät mallintamaan materiaalien käyttäytymistä kuljetuksen aikana lämpötilojen, värinän ja iskujen aikana. Pakkausmateriaalin mallintamisen jälkeen on järkevää sisällyttää paketin sisältö digitaaliseen kaksoseen, joka onnistuu liittämällä mahdollisesti jo tuotteelle luodusta kaksosesta geometriset tiedot tai käyttämällä kolmiulotteista skannausta. Tällä tuote- ja pakkaustietojen yhdistämisellä yrityksen on mahdollista parantaa tehokkuutta esimerkiksi automatisoimalla pakkausten valinnan ja konttien pakkausstrategioita käyttöasteen ja tuotesuojan optimoimiseksi. (Dohrmann et al. 2019, 22)

On jo yleinen käytäntö, että herkkien ja arvokkaiden tuotteiden, kuten lääkkeiden ja herkkien elektronisten komponenttien, lähetyksissä on sensoreita, jotka valvovat esimerkiksi lämpötilaa, iskuja ja värinää. Lähetyksen digitaalinen kaksoinen toimisi näiden antureiden keräämän tiedon varastona/arkistona. Digitaalisen kaksosen teknologioiden avulla tätä kerättyä dataa on mahdollista käyttää uudella tavalla. Esimerkiksi malli, joka sisältää pakkauksen lämpöeristystiedot ja iskunvaimennusominaisuudet, voisi mahdollistaa tuotteen sisäisten olosuhteiden päättämisen edellä mainittujen anturitietojen avulla. (Dohrmann et al. 2019, 23)

Logistiikassa digitaalisen kaksosen kannalta hyvä puoli on, että monet sen tarvitsemista avainteknologioista on jo käytössä. Näitä ovat esimerkiksi juuri erilaiset anturit tai lähetysten satelliittipaikannusjärjestelmän (engl. *Global Positioning System*) seuranta, joiden antamia tietoja voidaan käyttää virtuaalisen mallin muodostamiseen. Digitaalinen kaksoinen voidaan luoda myös esimerkiksi maailmanlaajuisista reiteistä, joka sisältäisi satelliittipaikannuksen tiedot ja paikalliset liikennetiedot yhdistettynä alueellisiin säätietoihin. Nämä molemmat saataisiin niin reaaliaikaisena tietona kuin tekoälypohjaisena ennusteena. Tämä malli voisi demonstroida, kuinka pieni reittimuutos tai jopa kokonaan toinen toimitustapa voisi optimoida toimitusketjun toimintaa ja tuoda suuriakin säästöjä. (Legnani 2021)

Esimerkiksi puutarhatuotteilla, ja muillakin erityisesti kylmätuotteilla, jokaisella lähetyksellä on oma historia lämpötiloista ja kasvuilmakehästä maatilalta kuluttajalle arvaamattomien ympäristö-, logistiikka- ja sosioekonomisten olosuhteiden vuoksi. Ei siis ole yhtä sopivaa menetelmää tuotteiden säilyvyyden maksimoimiseksi, kun ympäristön olosuhteita on vaikea ennustaa. Digitaaliset kaksoset voivat kuitenkin auttaa päätöksenteossa, koska ne ovat mukana jokaisessa lähetyksessä ja siten lähetyksistä saadaan reaaliaikaista tietoa esimerkiksi ympäristöolosuhteista ja kuljetettavien tuotteiden laadusta (esimerkiksi biokemiallinen tai fysikaalinen). Lisäksi näillä digitaalisilla kaksosilla voidaan ennustaa ja diagnosoida, kuinka jäähdytysprosessia ja ilmasto-olosuhteita hallitaan liiallisen laadun heikkenemisen estämiseksi koko toimitusketjun aikana. (Defraeye et al. 2021, 250) Digitaalisia kaksosia voidaan siis käyttää erilaisten kuljetusmuotojen vertailuun ja siten ne helpottavat kuljetusten päätöksentekoa.

Vuonna 2020 saksalainen, muun muassa kosmetiikkaa ja kotitaloustuotteita myyvä vähittäiskauppias, jolla on yli 3700 myymälää 12 Euroopan maassa, voitti Saksan logistiikkapalkinnon toimitusketjun digitaalisella kaksosella. Heidän uuteen Berliinin lähellä sijaitsevaan logistiikkakeskukseen luotiin 2000 myymälän digitaaliset kaksoset, jotka sisältävät yksityiskohtaiset hyllyjen sijoitukset ja varastointinimikkeiden (engl. *Stock Keeping Unit*, SKU) sijainnit. Tämän reaaliaikaisen datan avulla yritys pystyi optimoimaan logistiikkakeskuksen prosessit kuormalavojen purkamisesta aina tuotteiden poimimiseen ja pakkaamiseen. Lisäksi myymälän työntekijöille annettiin älypuhelimet optimaalisten varastoissa käytettävien reittien luomista varten. (Grüter & Wolf 2021)

4 JOHTOPÄÄTÖKSET

Digitaalinen kaksonen on jo 20 vuotta vanha keksintö, mutta vasta viime vuosina siitä on saatu yhä enemmän ja tarkempaa tutkimustietoa. Kirjallisuudessa digitaaliselle kaksoselle löytyy määritelmiä, jotka antavat sille vaihtelevia ominaisuuksia. Yhteisen määritelmän mukaan digitaalinen kaksonen kuitenkin on digitaalinen vastine reaali maailman tuotteesta tai prosessista. Digitaalista kaksosta varten fyysisestä kohteesta täytyy saada reaaliaikaista tietoa esimerkiksi erilaisten IoT -antureiden avulla.

Yritykset voivat hyötyä digitaalisesta kaksosesta paljonkin, mutta sen käyttöönotto vaatii suuren investoinnin ja sen rakentamiseen voi liittyä useita haasteita etenkin, jos yrityksellä ei ole monipuolisia digitaalisia järjestelmiä käytössään. Kuitenkin, jos haasteisiin löydetään toimivat ratkaisut, on digitaalisesta kaksosesta paljon hyötyä esimerkiksi prosessien optimoinnissa ja riskienhallinnassa.

Tässä työssä keskityttiin toimitusketjun hallintaprosessien kannalta tärkeisiin liiketoimintoihin, kuten varastointiin, tuotantoon ja logistiikkaan. Yleisesti toimitusketjua tarkasteltuna digitaalista kaksosta voidaan hyödyntää koko toimitusketjuprosessin tarkkailuun ja kehittämiseen. Sen avulla voidaan esimerkiksi parantaa lyhyen- ja keskipitkän aikavälin päätöksiä tai hallita toimitusketjun toimintaa häiriötilanteiden aikana. Tällä toimitusketjun optimoinnilla taas yritykset voivat saavuttaa selkeitä kustannusetuja. Lisäksi yksi suurimmista hyödyistä, joka toimitusketjun digitaalisella kaksosella voidaan saavuttaa, on riskienhallinnan helpottaminen. Kun häiriötilanteita on mahdollista ennakoida ja häiriön vaikutuksia arvioida, voi yritys saavuttaa suuriakin säästöjä. Häiriöriskien hallinnan osalta toimitusketjun digitaalisen kaksosen tutkimus on kuitenkin melko alussa, eikä siitä vielä löydy selkeitä teorian ulkopuolisia esimerkkejä.

Tuotanto on toimitusketjun osa, jonka digitaalisesta kaksosesta löytyy eniten tutkimustietoa. Tuotannon digitaalisella kaksosella voidaan seurata niin tietyn koneen toimintaa kuin koko tuotantoprosessiakin. Sen avulla voidaan parantaa tuotannon toimivuutta ja suorittaa tuotantokoneille huoltotoimenpiteitä jo ennalta. Digitaalisen kaksosen käytössä tuotannossa yritys voi saavuttaa esimerkiksi kustannussäästöjä tai nopeuttaa tuotantoprosessiaan.

Etenkin DHL on perehtynyt varastoinnin digitaaliseen kaksoseen ja onkin jo toteuttanut digitaalisen kaksosen sovelluksia suurissakin varastoissa. Tällaisesta varastosta kerätään jatkuvasti reaaliaikaisia tietoja ja sen digitaalisen kaksosen avulla voidaan valvoa tulevia ja lähteviä tavaravirtoja. Varastoinnissa digitaalisen kaksosen avulla on mahdollista myös ennustaa annettujen logistiikka- ja toimintapäätösten keskipitkän aikavälin vaikutuksia.

Kuljetuksissa digitaalista kaksosta voidaan hyödyntää useammalla tavalla. Se, mistä sovelluksesta yritys saa eniten hyötyä, riippuu esimerkiksi kuljetettavan tuotteen ominaisuuksista. Kuljetettavan tuotteen ollessa esimerkiksi elintarvike, joka vaatii kuljetuksissa tietyn lämpötilan, voidaan digitaalisella kaksosella mitata lämpötiloja kuljetusten aikana ja optimoida kuljetustapoja kylmäketjun säilymiseksi. Vasta viime vuosien aikana kuljetuksista kerättyjä anturitietoja on alettu käyttämään digitaalisen kaksosen lisäämiseen. Kuljetusten digitaalinen kaksosen voi myös mitata ja ennustaa sijainnin liikennetietoja ja sääolosuhteita ja niiden perusteella laskea optimaalisimman reitin. Reittimuutoksen avulla toimitus voi välttää esimerkiksi luonnonkatastrofin aiheuttamat ruuhkat tai sulut ja kuljetus saadaan toimitettua perille.

Jokaisella yrityksellä myös toimitusketju on yksilöllinen. Toimitusketjuissa ja niiden osissa on kuitenkin jonkin verran samankaltaisuuksia, joten jo olemassa olevia esimerkkejä on varmasti mahdollista pääpiirteissään yleistää myös muiden yritysten toimitusketjuille. Pääpiirteissään eri yritysten toimitusketjun hallinnan digitaaliset kaksoset ovat samanlaisia, mutta jokaisella digitaalisen kaksosen luojalla on oma näkemyksensä, millaisia tuloksia sillä halutaan saavuttaa ja mihin yksityiskohtiin se eniten keskittyy.

LÄHTEET

AnyLogistix. N.d. Supply Chain Digital Twins: definition, the problems they solve, and how to develop them. [WWW-dokumentti]. [Viitattu: 11.3.2021]. Saatavissa: <https://www.anylogistix.ru/upload/iblock/e25/e25c3c6fcca6401f583e91297d80e916.pdf>

Arnautova, Y. 2021. If You Build Products, You Should Be Using Digital Twins. [WWW-dokumentti]. [Viitattu: 31.3.2021]. Saatavissa: <https://www.globallogic.com/insights/blogs/if-you-build-products-you-should-be-using-digital-twins/>

Barricelli, B. R., Casiraghi, E. & Fogli, D. 2019. A Survey on Digital Twin: Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications. *IEEE Access*. Vol. 7, s. 167653-167671.

Baruffaldi, G., Accorsi, R. & Manzini, R. 2019. Warehouse management system customization and information availability in 3pl companies. *Industrial Management & Data Systems*. Vol. 119, nro. 2, s. 251-273.

Barykin, S. Y., Bochkarev, A. A., Kalinina, O. V. & Yadykin, V. K. 2020. Concept for a Supply Chain Digital Twin. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*. Vol. 5, nro. 6, s. 1498-1515.

Cai, Y., Starly, B., Cohen, P. & Lee, Y. 2017. Sensor Data and Information Fusion to Construct Digital-twins Virtual Machine Tools for Cyber-physical Manufacturing. *Procedia manufacturing*. Vol. 10, s. 1031-1042.

Chen, Z. & Huang, L. 2021. Digital twins for information-sharing in remanufacturing supplychain: A review. *Energy*. Vol. 220, s. 1-8.

Coors-Blankenship, J. 2020. Taking Digital Twins for a Test Drive with Tesla, Apple. [WWW-dokumentti]. [Viitattu: 16.3.2021] Saatavissa: <https://www.industryweek.com/technology-and-iiot/article/21130033/how-digital-twins-are-raising-the-stakes-on-product-development>

Defraeye, T., Shrivastava, C., Berry, T., Verboven, P., Onwude, D., Schudel, S., Bühlmann, A., Cronje, P. & Rossi, R. M. 2021. Digital twins are coming: Will we need them in supply chains of fresh horticultural produce?. *Trends in Food Science & Technology*. Vol. 109, s. 245-258.

Dohrmann, K., Gesing, B. & Ward, J. 2019. Digital Twins in Logistics. [WWW-dokumentti].
[Viitattu: 15.3.2021]. Saatavissa:
<https://www.dhl.com/content/dam/dhl/global/core/documents/pdf/glo-core-digital-twins-in-logistics.pdf>

Downey, J. 2020. What Is Digital Twin Technology And How It Benefits Manufacturing In The Industry 4.0 Era?. [WWW-dokumentti]. [Viitattu: 30.3.2021]. Saatavissa:
<https://slcontrols.com/what-is-digital-twin-technology-and-how-can-it-benefit-manufacturing/>

Galea-Pace, S. 2019. DHL Supply Chain introduces first digital twin of warehouse in Asia for Tetra Pak. [WWW-dokumentti]. [Viitattu: 23.3.2021]. Saatavissa:
<https://www.supplychaindigital.com/logistics-1/dhl-supply-chain-introduces-first-digital-twin-warehouse-asia-tetra-pak>

Gartner. 2019. Gartner Survey Reveals Digital Twins Are Entering Mainstream Use. [WWW-dokumentti]. [Viitattu: 1.4.2021]. Saatavissa: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2019-02-20-gartner-survey-reveals-digital-twins-are-entering-mainstream>

Grüter, R. & Wolf, P. 2021. DIGITAL SUPPLY CHAIN TWIN - USE CASES AND BENEFITS. [WWW-dokumentti]. [Viitattu: 10.4.2021]. Saatavissa:
<https://www.tenthpin.com/insights/digital-supply-chain-twin-use-cases-and-benefits/>

Immerman, D. & Lang, J. 2019. Top Use Cases for Digital Twin Technology to Drive Digital Transformation. [WWW-dokumentti]. [Viitattu: 8.4.2021]. Saatavissa: https://www.ptc.com/-/media/Files/PDFs/IoT/J12599_DigiTwin_Use_Cases_ebk_v8_lowres.pdf

Ivanov, D. 2020. Predicting the impacts of epidemic outbreaks on global supply chains: A simulation-based analysis on the coronavirus outbreak (COVID-19/SARS-CoV-2) case. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. Vol. 136, s. 1-14.

Ivanov, D. & Dolgui, A. 2020. A digital supply chain twin for managing the disruption risks and resilience in the era of Industry 4.0. *Production Planning & Control*. s. 1-14.

Ivanov, D., Dolgui, A. & Sokolov, B. 2019. Handbook of Ripple Effects in the Supply Chain. Berliini: Springer

Jiang, Z., Guo, Y. & Wang, Z. 2021. Digital Twin to Improve the Virtual-Real Integration of Industrial IoT. *Journal of Industrial Information Integration*. Vol. 22, s. 1-8.

Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J. & Sihn, W. 2018. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC PapersOnLine*. Vol. 51, nro. 11, s. 1016-1022.

Kuehn, W. 2018. Digital twins for decision making in complex production and logistic enterprises. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*. Vol. 13, nro. 3, s. 260-271.

Lagunas, J. 2021. Optimize your supply chain with a digital twin. [WWW-dokumentti]. [Viitattu: 30.3.2021] Saatavissa: <https://www.accenture.com/us-en/blogs/business-functions-blog/optimize-your-supply-chain-with-a-digital-twin>

Lambert, D. M. 2014. Supply Chain Management – Processes, Partnerships, Performance. Tempe: Supply Chain Management Institution.

Legnani, L. 2021. It's time to put your data into action: Digital twins in transportation. [WWW-dokumentti]. [Viitattu: 8.4.2021]. Saatavissa: <https://blog.toughbook.eu/blog/its-time-put-your-data-action-digital-twins-transportation>

Marmolejo-Saucedo, J. A. 2020. Design and Development of Digital Twins: a Case Study in Supply Chains. *Mobile Networks and Applications*. Vol. 25, nro. 6, s. 2141-2160.

Mentzer, J. T., DeWitt, W., Keebler, J. S., Min, S., Nix, N. W., Smith, C. D. & Zacharia, Z. G. 2001. Defining Supply Chain Management. *Journal of business logistics*. Vol. 22, nro. 2, s. 1-25.

Molino, F. 2020. Digital Twin – The key for proactive supply chain planning. [WWW-dokumentti]. [Viitattu: 3.4.2021]. Saatavissa: <https://www.nfiindustries.com/blog/digital-twin-the-key-for-proactive-supply-chain-planning/>

Ohnemus, T. 2018. Digital Twin Excellence: Two Shining Examples. [WWW-dokumentti]. [Viitattu: 23.3.2021]. Saatavissa: <https://www.digitalistmag.com/iot/2018/06/14/digital-twin-excellence-2-shining-examples-06175901/>

Qi, Q., Tao, F., Hu, T., Anwer, N., Liu, A., Wei, Y., Wang, L. & Nee, A. Y. C. 2021. Enabling technologies and tools for digital twin. *Journal of manufacturing systems*. Vol. 58, s. 3-21.

Rayas, A. & Salam, S. 2019. *Internet of Things From Hype to Reality: The Road to Digitization*. 2. Painos. Berliini: Springer

Ritvanen, V., Inkiläinen, A., von Bell, A. & Santala, J. 2011. *Logistiikan ja toimitusketjun hallinnan perusteet*. Helsinki: Suomen huolintaliikkeiden liitto.

Rosemann, M. 2018. Transparency And Trust: The Hallmarks Of Digital Twins In Logistics. [WWW-dokumentti]. [Viitattu: 8.4.2021]. Saatavissa: <https://www.digitalistmag.com/digital-supply-networks/2018/08/16/transparency-trust-hallmarks-of-digital-twins-in-logistics-06183473/>

Roy, R. B., Mishra, D., Pal, S. K., Chakravarty, T., Panda, S., Chandra, M. G., Pal, A., Misra, P., Chakravarty, D. & Misra, S. 2020. Digital twin: current scenario and a case study on manufacturing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 107, s. 3691-3714.

Rusch, B. 2019. In the Tetra Pak warehouse in Singapore, the twin is in charge. [WWW-dokumentti]. [Viitattu 23.3.2021]. Saatavissa: <https://www.hannovermesse.de/en/news/news-articles/in-the-tetra-pak-warehouse-in-singapore-the-twin-is-in-charge>

Sakki, J. 2014. *Tilaus-toimitusketjun hallinta: digitalisoitumisen haasteet*. 8. painos. Vantaa: Jouni Sakki Oy.

Simchenko, N. A., Tsohla, S. Y. & Chyvatkin, P. P. 2019. IoT & Digital Twins Concept Integration Effects on Supply Chain Strategy: Challenges and Effects. *International Journal of Supply Chain Management*. Vol. 8, nro. 6, s. 803-808.

Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H. & Sui, F. 2018. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 94, nro. 9, s. 3563-3576.

Tao, F., Zhang, H., Liu, A. & Nee, A. Y. C. 2019. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. Vol. 15, nro. 4, s. 2405-2415.

Zheng, Y., Yang, S. & Cheng, H. 2019. An application framework of digital twin and its case study. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. Vol. 10, nro. 3, s. 1141-1153.