



**TURUN  
YLIOPISTO**  
Kauppakorkeakoulu

## **Digitaalisen kaksosen rooli logistiikassa**

Toimitusketjujen johtamisen  
kandidaatintutkielma

Laatija:  
Ronja Hämäläinen

Ohjaaja:  
KTT Harri Lorentz

6.9.2025

Turku

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Kandidaatintutkielma

**Oppiaine:** Toimitusketjujen johtaminen

**Tekijä:** Ronja Hämäläinen

**Otsikko:** Digitaalisen kaksosen rooli logistiikassa

**Ohjaaja:** KTT Harri Lorentz

**Sivumäärä:** 43 sivua

**Päivämäärä:** 6.9.2025

Digitaalinen kaksonen on noussut trendiksi niin yritys- kuin tiedemaailmassa viime vuosina. Se on logistiikan kontekstissa reaaliaikaisesti päivittyvä, todellisen maailman logistiikkasysteemin tarkka virtuaalinen malli, joka mahdollistaa diagnostiset, ennakoivat ja ohjailevat menetelmät. Sen ensisijaisena tarkoituksena on toimitusketjun läpinäkyvyyden parantaminen, optimointi ja simulointi.

Globalisoitumisen aiheuttama toimitusketjujen monimutkaistuminen vaikeuttaa koordinoitua ja materiaalivirtojen hallintaa koko logistiikkaverkostossa. Koska logistiikassa yhdistyvät useiden heterogeenisten sidosryhmien hallinnoivat, mutta tiiviisti toisiinsa kytkeytyvät prosessit, on toiminnan kokonaisvaltainen optimointi haasteellista. Samalla, kun monimutkaiset rakenteet lisäävät epävakautta ja riskejä, myös kuluttajien odotukset ja toiminnalle asetetut vastuullisuusvaatimukset kasvavat.

Digitaalisen kaksosen mahdollisuudet logistiikassa ulottuvat laajalle. Kuljetuksen ja varastoinnin kontekstissa havaitaan monia sovelluskohteita toimitusverkoston, kaupunkilogistiikan, logistiikkakeskusten, kaluston ja tuotteiden tasolla, sekä potentiaalia vastata tunnistettuihin haasteisiin. Keskeiset löydökset osoittavat, että digitaalisella kaksosella on ensisijaisesti päätöksentekoa ja riskienhallintaa tukeva rooli logistiikassa.

Digitaalisen kaksosen implementointiin liittyy kuitenkin edelleen useita haasteita, jotka hidastavat sen yleistymistä ja vaikuttavat siihen, kuinka herkästi yritykset valitsevat jonkin toisen teknisen vaihtoehdon logistiikkaansa tukemaan. Näitä ovat muun muassa korkeat kustannukset ja tietoturva- ja tietosuojakysymykset.

**Avainsanat:** digitaalinen kaksonen, logistiikka, varastointi, kuljetukset

# SISÄLLYS

<b>1</b>	<b>Johdanto</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Toimitusketjun digitaalinen kaksosen</b>	<b>10</b>
	2.1 Digitaalinen kaksosen	10
	2.2 Taustaa	11
	2.3 Teknologiset edellytykset	12
	2.4 Toimitusketjun digitaalinen kaksosen	14
<b>3</b>	<b>Logistiikka</b>	<b>17</b>
	3.1 Logistiikka	17
	3.2 Kuljetukset	18
	3.3 Varastointi	19
	3.4 Kuljetusten ja varastoinnin haasteet	21
<b>4</b>	<b>Digitaalisen kaksosen rooli logistiikassa</b>	<b>23</b>
	4.1 Digitaalisen kaksosen lisäarvo ja ulottuvuudet	23
	4.2 Kuljetukset	24
	4.3 Varastointi	27
	4.4 Yritysesimerkkejä logistiikan digitaalisesta kaksosesta	29
	4.5 Implementoinnin haasteet	30
<b>5</b>	<b>Yhteenveto ja johtopäätökset</b>	<b>32</b>
	<b>Lähteet</b>	<b>35</b>

## **KUVIOT**

KUVA 1 DIGITAALISEN KAKSOSEN KOLMIOSAINEN PERUSMALLI (MUKAILLEN VANDERHORN JA MAHADEVAN 2021)	9
KUVA 2 TOIMITUSKETJUN DIGITAALISEN KAKSOSEN VIITEKEHYS (IVANOV 2024)	15

## **TAULUKOT**

TAULUKKO 1 DIGITAALISEN KAKSOSEN ROOLI LOGISTIIKASSA	32
--	----



# 1 Johdanto

Globalisaatio, teknologian kehitys ja kuluttajien kohonnut odotukset ovat johtaneet siihen, että toimitusketjujen voidaan katsoa kilpailevan nykymarkkinoilla keskenään yksittäisten yritysten sijaan. (Farahani ym. 2014.) Tulevaisuudessa kilpailu tapahtuu todennäköisesti toimitusketjujen sijaan niiden tukena toimivien tietopalvelujen ja analyttisten algoritmien välillä (Ivanov ym. 2019). Entistä monimutkaisempien toimitusketjujen koordinointi edellyttää edistyneempää materiaalivirtojen hallintaa koko toimitusverkostossa. Lisäksi toimitusketjuilta vaaditaan jatkuvasti kovempaa ja varmempaa suorituskykyä, parempaa kustannustehokkuutta, sekä etenevässä määrin vastuullisuuden huomioimista. (Farahani ym. 2014.)

Proaktiivisen digitaalisen kaksoksen on ennakoitu vievän toimitusketjun digitalisaatio seuraavalle tasolle ja alustavat tutkimukset osoittavat sen potentiaalin lukuisilla eri abstraktiotasoilla. (Dietz ja Pernul 2020, Bhandal ym. 2022). Korkeita odotuksia kuvastaa myös se, että digitaalinen kaksonen valittiin kolmena peräkkäisenä vuonna yhdeksi Gartnerin kymmenestä teknologian huipputrendistä, jolla on keskeistä strategista arvoa (Panetta 2016, 2017, 2018). Monien teknisten innovaatioiden, kuten esineiden internetin, pilvipalveluiden, tekoälyn ja laajennetun todellisuuden nopea kehitys viime vuosina on tehnyt digitaalisen kaksoksen implementoinnista realistista toimitusketjutasolla (Attaran & Celik, 2023).

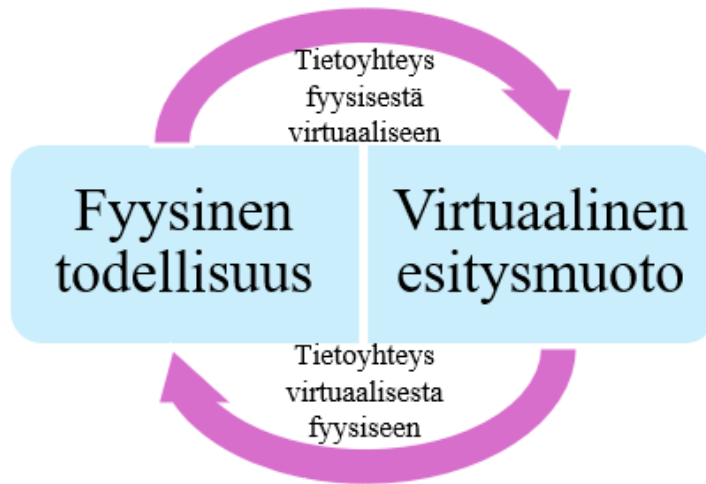
Digitaaliselle kaksokselle ei toistaiseksi ole vain yhtä yleisesti hyväksyttyä määritelmää, koska sitä hyödynnetään monilla eri teollisuudenaloilla ja sovelluskohteita on monia, joten näkökulmat vaihtelevat. Mahdollisimman monialaisesti määriteltynä digitaalinen kaksonen on fyysisen järjestelmän (sekä siihen liittyvän ympäristön ja prosessien) virtuaalinen esitysmuoto, joka päivittyy fyysisen ja virtuaalisen järjestelmän välisen tiedonvaihdon kautta (VanDerHorn ja Mahadevan 2021). Tätä havainnollistetaan Kuviossa 1. Toimitusketjun kontekstissa digitaalinen kaksonen voidaan määritellä virtuaaliseksi järjestelmäksi, joka sisältää fyysisen toimitusketjun ja sen elementtien digitaalisen visualisoinnin tietokonemallissa, fyysisestä kohteesta tietoa hankkivat digitaaliset teknologiat ja kuvailevan, ennakoivan sekä ohjailevan analytiikan päätöksenteon tueksi (Ivanov 2024).

Logistiikalla taas tarkoitetaan liiketoiminnassa systemaattista ja koordinoitua joukkoa toimintoja, joita tarvitaan hyödykkeiden fyysiseen liikutteluun ja säilytykseen toimittajalta yrityksen tilojen kautta markkinoille mahdollisimman tehokkaalla tavalla yritysten tavoitteiden saavuttamiseksi. Se on keskeinen osa toimitusketjun hallintaa. (CSCMP 2013.) Nitschen ja Strauben (2023) mukaan toimialan keskeisimpiä kehityssuuntauksia ovat globalisaatio, digitalisaatio, kestävyys, sekä riskien lisääntyminen epävakaiden muuttujien takia. Logistiikka on työvoima- ja pääomavaltainen toimiala, jossa yhdistyvät lukuisat heterogeenisten kumppaneiden hallinnoimat, mutta tiiviisti kytköksissä toisiinsa olevat toiminnalliset prosessit. Resurssien hyödyntämisen maksimointi ja sidosryhmien tehokkaan koordinoinnin varmistaminen on haasteellista. (Liu ym. 2024.) Lisäksi ympäristöystävällisempien logistiikkaverkostojen kehittäminen on välttämätöntä, koska tavarakuljetukset ja varastointi aiheuttavat arviointitavasta riippuen noin 7–11% maailmanlaajuisista kasvihuonekaasupäästöistä (MIT Climate Portal 2023; McKinsey & Company 2024).

Tämän kandidaatintutkielman tavoitteena on selvittää, mikä on digitaalisen kaksosen rooli toimitusketjujen hallinnan logistiikassa. Roolia tarkastellaan mahdollisten soveltamiskohteiden ja saadun lisäarvon kautta, mutta myös laaja-alaista käyttöönottoa hidastavat ongelmakohdat huomioidaan. Tutkielmassa logistiikkaa käsitellään aiheen rajaamiseksi pääasiassa varastoinnin ja kuljetuksen näkökulmista, joten esimerkiksi tuotantoa ei erityisemmin huomioida, vaikka sekin usein lasketaan logistiikan osa-alueeksi. Tutkielmassa keskitytään seuraavaan tutkimuskysymykseen:

- Mikä rooli digitaalisella kaksosella on logistiikassa?

Tutkielma koostuu viidestä pääosiesta. Johdannon jälkeen luvussa 2 perehdytään digitaalisen kaksosen konseptiin tarkemmin käsittelemällä sen ominaispiirteitä, taustoja ja teknisiä vaatimuksia, joiden jälkeen tarkastellaan sen erityispiirteitä toimitusketjun hallinnassa. Luvussa 3 käsitellään lyhyesti toimitusketjujen hallinnan keskeistä osa-alueita logistiikkaa, sekä mitä kaikkea siihen sisältyy ja millaisia haasteita siihen liittyy. Luvussa 4 käsitellään digitaalisen kaksosen roolia toimitusketjujen hallinnan logistiikassa ja vastataan tutkimuskysymykseen. Lopulta yhteenveto ja johtopäätökset esitetään luvussa 5.



Kuva 1 Digitaalisen kaksosen kolmiosainen perusmalli (mukaillen VanDerHorn ja Mahadevan 2021)

## 2 Toimitusketjun digitaalinen kaksonen

### 2.1 Digitaalinen kaksonen

Negrin ym. (2017) mukaan tutkimusyhteisöjen sisällä termistä on johdettu ainakin kaksi eri näkökulmaa, joista ensimmäinen ja yleisemmin omaksuttu viittaa digitaalisella kaksosella järjestelmää edustavaan malliin, joka voi muodostaa perustan erilaisille simulaatioille ja analyyseille. Toinen harvemmin omaksuttu näkökulma taas määrittelee digitaalisen kaksosen ainoastaan järjestelmän simulaationa itsestään.

Vakiintuneen määritelmän puutteen vuoksi käsitettä lähestytään usein käänteisesti selittämällä, mikä ei ole digitaalinen kaksonen. Kritzinger ym. (2018) tarkastelivat erilaisia digitaalisia kaksoiskappaleita ja jaottelivat niitä tiedon integroinnin perusteella kolmeen ryhmään. Digitaalisen mallin, varjon ja kaksosen käsitteissä on yhtäläisyyksiä, mutta niiden integraatiotasot eroavat toisistaan. Digitaalisessa mallissa tiedonkulku fyysisestä maailmasta virtuaaliseen ei ole automaattista, joten mallin toiminta on täysin kiinni manuaalisesta tiedonvaihdosta, eikä se kuvaa reaaliaikaa. Digitaalisen varjon tapauksessa tieto kulkee fyysisestä maailmasta virtuaaliseen automaattisesti anturitiedon avulla. Anturit mittaavat tietoa fyysisestä maailmasta ja välittävät ne virtuaaliselle mallille. Digitaalinen kaksonen on kyseessä vain, jos tieto kulkee automaattisesti molempiin suuntiin fyysisen ja virtuaalisen maailman välillä. Siten se pystyy heijastamaan fyysisen vastineensa todellista nykytilaa ja kehitystä. Virtuaalisesta maailmasta virtuaaliseen tietoa hyödynnetään suorittamalla muutoksia fyysiseen malliin esimerkiksi toimilaitteiden avulla (Botín-Sanabria ym. 2022).

Osa tutkimuksista on sillä kannalla, ettei digitaalisen kaksosen vaikutus fyysiseen järjestelmään ei kuitenkaan ole suora, vaan sillä tarkoitetaan kaksivaiheista prosessia, jonka alussa määritellään virtuaalisen mallin avulla, tarvitaanko fyysiseen tilaan muutoksia ja mitä toimenpiteitä vaaditaan tavoitetilan saavuttamiseksi. Vasta sitten tarvittavat fyysisiin prosesseihin vaikuttavat toimenpiteet suoritetaan, jotta tavoiteltu fyysinen tila voidaan saavuttaa. (VanDerHorn ja Mahadevan 2021.) Jotkut digitaalisen kaksosen määritelmät jättävät yhteyden virtuaalisesta mallista fyysiseen kokonaan mainitsematta yleispätevämmän tulkinnan takia, vaikka se alkuperäiseen määritelmään sisältyy (Jones ym. 2020). Tämän piirteen tulkinta riippuukin paljon sovelluskohteesta. Toisaalta Ivanovin (2024) mukaan toimitusketjun digitaalinen kaksonen ja sen

todellinen vastine ovat jatkuvassa tiedonvaihdossa keskenään, joten käytös on aina rinnakkaista. Todellisen järjestelmän tilan ja toimintakyvyn heijastamisen lisäksi se voi siis lähettää ohjailevia signaaleja todelliselle järjestelmälle. Logistiikan kontekstissa Gerlach ym. (2021) puolestaan argumentoi, että yhteys virtuaalisesta mallista fyysiseen järjestelmään tapahtuu niin, että mukana olevat toimijat saavat lisää tietoa analysoimalla digitaalista kaksosta. Digitaalisen kaksosen avulla suoritettava automaattinen ohjaus ohjauselementtien avulla taas on epärealistista useimmissa tapauksissa, koska ihmisillä on edelleen keskeinen rooli logistiikkajärjestelmissä.

## 2.2 Taustaa

Digitaalisen kaksosen käsite ei ole uusi, vaikka se onkin saanut vasta viime aikoina enemmän näkyvyyttä. Taon ym. (2019) mukaan digitaalisen kaksosen teoreettinen kehitys läpikävi kolme vaihetta: muodostumisen, hautumisen ja kasvun.

Ensimmäisenä kaksosteknologian perusteita alkoi harjoittaa NASA avaruushjelmassaan Apollossa 1960-luvulla. Maan tasolle luotiin fyysisesti päällekkäisiä järjestelmiä vastaamaan avaruuden järjestelmiä. (Rosen ym. 2015; Miskinis 2019.) Esimerkiksi lentoa Apollo 13 varten he loivat identtiset avaruusaluukset, joista toinen jäi maan kamaralle mahdollistamaan avaruuteen laukaistun aluksen olosuhteiden tarkan peilaamisen (Rosen ym. 2015). Kun Apollo 13 muuttui selviytymistaisteluksi happisäiliöiden räjähdettyä lennon alussa, pelastusoperaation onnistumista edesauttoi se, että insinöörit kykenivät testaamaan mahdollisia ratkaisuja maan tasalla ja näin avustamaan astronautteja kriittisessä tilanteessa (Miskinis 2019).

Varsinainen digitaalisen kaksosen käsite esiteltiin alkujaan vuonna 2003 professori Michael Grievesin tuotteen elinkaaren hallinnan kurssilla Michiganin yliopistossa. Tällöin se kuvattiin fyysisen tuotteen virtuaalisena ja digitaalisena vastineena. Grieves loi digitaalisen kaksosen alkuperäisen kolmiulotteisen mallin, joka koostuu todellisen maailman fyysisestä tuotteesta, virtuaalisesta tuotteesta verkkoavaruudessa, sekä datan ja informaation yhteyksistä, jotka sitovat ne yhteen. (Grieves 2014.)

Aikana, jolloin käsite nousi yleiseen tietoisuuteen, fyysisten tuotteiden digitaaliset esitysmuodot olivat suhteellisen uusia ja kypsymättömiä, eikä tiedon keräämisen ollut soveltuvia työkaluja (Grieves 2014). Seuraavien vuosien viestintäteknologian, esineiden internetin, sensoriteknologian, big data-analytiikan ja simulaatioteknologioiden nopea

kehitys myötävaikuttivat digitaalisen kaksosen suosion kasvuun ja tekivät sen käytännössä mahdolliseksi (Tao ym. 2019).

Kaksoskonseptin kehitys vaikutti jämähäneen moneksi vuodeksi paikoilleen, mutta vuonna 2012 Digitaalista kaksosta sovellettiin NASAN ilma-alusten suunnittelussa ja niiden kunnan seurannassa (Hu ym. 2021). Tuolloin NASA määritteli digitaalisen kaksosen valmiin kulkuneuvon tai järjestelmän integroiduksi monifysikaaliseksi, monimittakaavaiseksi ja todennäköisyyspohjaiseksi simulaatioksi, joka hyödyntää parhaita saatavilla olevia fyysisiä malleja, anturipäivityksiä, kaluston historiatietoja ynnä muita heijastaakseen lentävän kaksosensa elämää (Glaessgen ja Stargel 2012). Siitä lähtien digitaalisen kaksosen tutkimukseen on panostettu enemmän ja enemmän. Kehitystä edesauttoivat myös useat tutkimuslöydökset, jotka tukivat ajatusta lukuisista muista mahdollisista sovelluskohteista ilmailualan lisäksi (Tao ym. 2019).

Alkuperäiseen professori Grievesin esittämään kolmiulotteiseen malliin on myöhemmin ehdotettu täydennyksiä. Tao ym. (2018) ehdottavat mallin laajempaa viisiulotteista versiota, johon on lisätty digitaalisen kaksosen data ja palvelut. Malliin sisältyvät fyysiset ja virtuaaliset kokonaisuudet, palvelut, kaksosdata ja näiden väliset yhteydet. Mahdollisten sovelluskohteiden määrän kasvun myötä myös eri alojen, käyttäjätasojen ja yritysten digitaalista kaksosta koskevat palveluvaatimukset kohoavat. Laajempi malli auttaa myös edistämään digitaalisen kaksosen jatkosovelluksia useammilla aloilla. (Qi ym. 2021.)

## **2.3 Teknologiset edellytykset**

Digitaalisten kaksosten sovellutusten implementointiin liittyviä haasteita on vielä paljon ratkaisematta, mutta keskeisimmät teknologiat ovat kehittyneet viime vuosikymmeninä nopeasti (Liu ym. 2021). Sen seurauksena monien teknologisten mahdollistajien käyttö on myös tullut kannattavaksi liiketoiminnan näkökulmasta (Bhandal ym. 2022). Yritysten yksilölliset tarpeet ja odotukset vaikuttavat siihen, millaisista teknologioiden yhdistelmistä digitaalinen kaksonen muodostuu (Tozanli ja Saénz 2022). Vakiintuneen rakennuskaavan puuttuminen ja monimuotoiset toteutukset voivat tehdä digitaalisten kaksosten yhteentoimivuudesta haastavaa (Ala-Laurinaho ym. 2020).

Yleisellä tasolla digitaalisen kaksosen toiminnan mahdollistavat esineiden internet, tekoäly, laajennettu todellisuus ja pilvipalvelut. Näiden teknologioiden yhdistelmä

mahdollistaa reaaliaikaisen datan keruun ja tallentamisen, hyödyllisten näkemysten tarjoamisen hankitun tiedon avulla, sekä digitaalisen esitysmuodon luomisen fyysiselle vastineelle. (Attaran ja Celik, 2023.) Osa tutkimuksista nostaa esiin myös sovellusohjelmointirajapinnat (Moshood ym. 2021; Lee & Lee, 2021; Qi ym. 2021).

Esineiden internet eli lyhyemmin IoT tarkoittaa avointa ja kattavaa älykkäiden esineiden verkostoa, jonka esineillä on itsenäinen kyky koordinointiin, tiedon jakamiseen, sekä reagointiin ja toimintaan muuttuvissa tilanteissa ja ympäristössä (Madakam 2015). Jokainen digitaalisen kaksosen sovellus perustuu esineiden internetin käyttöön. Kirjallisuudessa korostettu fyysisen ja digitaalisen järjestelmän molempiin suuntiin kulkeva tiedonvaihto saavutetaan antureiden ja toimilaitteiden, sekä muiden ohjauselementtien avulla (Gerlach ym. 2021). Esineiden internetin välittämää tietoa käytetään fyysisen kohteen digitaalisen kopion luontiin ja jatkuvaan päivittämiseen. Digitaalista versiota voidaan siten analysoida, ohjalla ja optimoida. (Attaran ja Celik, 2023.)

Pilvipalveluilla viitataan internetin kautta palveluna tarjottaviin dynaamisesti skaalautuviin ja virtualisoiuihin resursseihin (Furht ja Escalante 2010). Pilvipalvelu tarjoaa digitaaliselle kaksoselle tietojenkäsittely- ja tallennusteknologiaa, mikä mahdollistaa sen, että suuria datamääriä voidaan varastoida virtuaaliseen pilveen ja päästä niihin käsiksi sijainnista riippumatta. Pilvipalveluiden käyttö lyhentää tehokkaasti monimutkaisten järjestelmien laskenta-aikaa ja päihittää suurten datamäärien tallentamiseen liittyvät haasteet. (Attaran & Celik 2023.)

Tekoäly viittaa tietojärjestelmäk kontekstissa järjestelmän kykyyn tunnistaa, oppia, tulkita, ja tehdä johtopäätöksiä datan perusteella ennalta määrättyjen organisaation tai yhteiskunnallisten tavoitteiden saavuttamiseksi (Mikalef ja Gupta 2021). Tekoäly voi avustaa digitaalista kaksosta analysoimalla automaattisesti saatua dataa, tarjoamalla siihen perustuvia hyödyllisiä näkemyksiä ja ennustuksia, sekä antamalla ehdotuksia mahdollisten ongelmien välttämiseksi; tulevaisuudessa se saattaa myös tehdä itsenäisesti päätöksiä (Lv ja Xie, 2022, Ivanov 2024).

Laajennettu todellisuus (engl. extended reality) on kattotermi, jota käytetään kuvaamaan immersiiivisiä teknologioita, kuten virtuaalitodellisuutta, täydennettyä todellisuutta (engl. augmented reality) ja yhdistettyä todellisuutta (engl. mixed reality). Nämä teknologiat yhdistävät fyysisen ja virtuaalisen todellisuuden ja laajentavat koettua

todellisuuttamme. (Çöltekin ym. 2020.) Digitaalinen kaksonen hyödyntää laajennetun todellisuuden teknologioiden kykyä mallintaa digitaalisesti reaali maailman objekteja (Attaran ja Celik, 2023).

Sovellusohjelmointirajapinnat tekevät eri sovellusten kuten tietokantojen, tietoverkkojen ja esineiden internetiin liitettyjen sensorien välisen vuorovaikutuksen mahdolliseksi. Ne ovat kuin rakennuspalikoita, jotka on suunniteltu kierrätettäväksi, jolloin ohjelmointia ei tarvitse aloittaa tyhjästä. Yksinkertainen esimerkki tästä on Google Maps API, joka voidaan helposti liittää kolmannen osapuolen sisältöön. (Moshood ym. 2021.) Ne yksinkertaistavat huomattavasti digitaalisen kaksonen luomista, koska se voidaan rakentaa olemassa olevia palveluita tarpeen mukaan yhdistelemällä (Ala-Laurinaho ym. 2020).

## **2.4 Toimitusketjun digitaalinen kaksonen**

Kuten aikaisemmin yleisen käsitteen yhteydessä ilmeni, myös toimitusketjujen hallinnassa digitaaliselle kaksooselle on monenlaisia määritelmiä käyttökohteiden vaihdellessa. Verboven ym. (2020) määrittelevät digitaalisen kaksonen toimitusketjujen hallinnan ja operatiivisen johtamisen näkökulmasta todellisen prosessitoiminnon virtuaaliseksi kopioksi, joka on anturitiedon ja big data-analytiikan työkalujen avulla yhteydessä reaali maailmaan. Moshood ym. (2021) taas kuvaa sitä eräänlaiseksi kyberfyysiseksi järjestelmäksi, joka hyödyntää useita IoT-antureita ja tuottaa tarkan visualisoinnin fyysisestä kohteesta. Ivanov ja Dolgui (2021) mukaan toimitusketjun digitaaliseen kaksoseen sisältyy ominaisuus pystyä mallintamaan verkoston tilaa millä tahansa valikoituna ajan hetkenä, jolloin se mahdollistaisi täydellisen näkyvyyden toimitusketjun päästä päähän. Gerlach ym. (2021) esittävät toimitusketjun digitaalisen kaksonen laajemmin reaali maailman logistiikkasysteemin digitaalisena ja dynaamisena simulaatiomallina, jossa on pitkäaikainen, ajantasainen ja kaksisuuntainen tietoyhteys kyseiseen systeemiin. Kyseinen logistiikkajärjestelmä voi muodostaa koko arvoverkoston tai olla osa sitä. Mallin tarkkailu mahdollistaa diagnostisten, ennustavien ja ohjailevien menetelmien käytön, minkä perimmäisenä tavoitteena on parantaa suorituskykyä kokonaisvaltaisesti koko asiakastilausprosessin ajan.

Ivanov (2024) on luonut toimitusketjujen hallinnassa ja operaatioiden johtamisessa hyödynnettävälle digitaaliselle kaksooselle seitsenosaisen viitekehyksen, johon sisältyvät teknologia, hallinta, ihmiset, organisaatio, mallinnus, tehtävä ja laajuus.



Kuva 2 Toimitusketjun digitaalisen kaksosen viitekehys (Ivanov 2024)

Ivanov (2024) korostaa teknologian osuutta viitekehyksessään, koska se on digitaalisen kaksosen perusta. Luvussa 2.3 mainittujen teknologioiden lisäksi hän nostaa esiin muun muassa big data-analytiikan, blockchain-teknologian, kyberfyysiset järjestelmät, robotiikan, RFID-teknologian ja ERP-järjestelmät. Teknologiat mahdollistavat mallien integroinnin ulkoisten tietolähteiden kanssa ja varmistavat vuorovaikutuksen muiden digitaalisten kaksosten kanssa. Viitekehyyksen mallinnus liittyy myös läheisesti teknologiaan analytiikkaominaisuuksiensa takia. Mallinnus voi toimia päätöksenteon tukena niin, että ihmiset tekevät kuitenkin lopulliset päätökset, tai ne voivat olla tekoälyn toteuttamia. Laajassa mielessä digitaalisia kaksosia voidaan pitää eri tietojärjestelmien ja -mallien yhdistelminä.

Ihmisten osa-alue viitekehyksessä korostaa sitä, miten digitaalisia kaksoset kehittävät ja muuttavat niiden käyttäjien päätöksentekoa. Digitaalisista kaksosista voi tulla johtajien ”digitaalisia kumppaneita”, jotka tukevat päätöksentekoa reaaliaikaisella tiedolla ja simuloimalla tiettyjen päätösten mahdollisia tuloksia. Hallinta taas käsittelee digitaalisen kaksosen luomaa lisäarvoa toimitusketjujen hallintaan näkyvyyttä, läpinäkyvyyttä, yhteistyötä ja jäljitettävyyttä parantamalla. Organisaation osa-alue

käsittelee sitä, miten digitaaliset kaksoset voivat mahdollistaa uusia liiketoiminta- ja toimintamalleja, sekä johtaa uusiin organisaatiorakenteisiin ja päätöksenteon toimivallan uudelleen jakoon osastojen välillä. (Ivanov 2024.)

Ivanovin (2024) viitekehyksessä tehtävä viittaa digitaalisten kaksosten kykyyn tukea päätöksentekoa useissa eri käyttökohteissa, kuten yhteistyöhön perustuvassa kysynnän suunnittelussa ja ennustamisessa, varastonhallinnassa, laadunvalvonnassa, toimitusten hallinnassa, ennakoivassa kunnossapidossa, resilienssin parantamisessa ja kestävässä kehityksessä. Laajuus luokittelee digitaaliset kaksoset toimitusketjujen hallinnassa viiteen päätyyppiin, jotka ovat yksinkertaisesta monimutkaisempaan lueteltuna tavara, prosessi, yritys, toimitusketju ja verkostojen verkko.

Kuviossa 2 kuvatut elementit osoittavat, että digitaaliset kaksoset eivät ole vain simulaatioon perustuva kopio todellisesta kohteesta, vaan monimutkainen sosiotekninen ilmiö, joka sisältää jatkuvaa ihmisen ja tekoälyn vuorovaikutusta (Ivanov 2024).

Luvussa 4 käsitellään toimitusketjujen digitaalisia kaksosia logistiikassa. Muiden kuin yritysesimerkkien tarkastelussa tulee huomata, että sovelluskohteet ovat suurelta osin juuri luvussa 1 mainittuja abstraktiotasoja eli aiheiden käsittely keskittyy teoreettisiin ja käsitteellisiin aspekteihin. Suurin osa tähän mennessä ilmestyneistä tutkimuksista on testannut esittämiään digitaalisen kaksosen toteutuksia pelkästään simulaatiossa, vain aniharvoja on arvioitu todellisen maailman toiminnallisessa ympäristössä (Liu ym. 2024). Lisäksi useat tutkijat painottavat, että vaikka verkostotason digitaalisten kaksosten strategisista hyödyistä toimitusketjujen hallinnassa puhutaan paljon, niitä käsittelevä tutkimus on vielä vähäistä ja toteutus on hyvin harvinaista (Liu ym. 2024; Gerlach 2021).

## 3 Logistiikka

### 3.1 Logistiikka

Logistiikkaa tarvitaan ostettujen materiaalien siirtämiseen toimittajilta ostajille, keskeneräisten materiaalien siirtämiseen yrityksen sisällä, valmiiden kauppatavaroiden siirtämiseen asiakkaille, tavaroiden palauttamiseen tai kierrättämiseen, sekä näiden varastointiin toimitusketjun varrella (Wisner ym. 2012). Lummuksen ym. (2001) mukaan toimitusketjun logistiikka on hyödykkeiden virtauksen ja varastoinnin suunnittelua, toteuttamista ja ohjaamista ulkoisesta alkupisteestä yritykseen ja yrityksestä kulutuspisteeseen asiakkaan vaatimusten mukaisesti. Council of supply chain management professionals laajentaa määritelmää korostamalla myös kuljetukseen ja varastointiin liittyvien tietovirtojen merkitystä prosessissa. Lisäksi he mainitsevat, että määritelmä kattaa saapuvat, lähtevät, sisäiset ja ulkoiset liikkeet, sekä eteenpäin kulkevan, että käänteisen virran. (CSCMP 2013.) Määritelmistä nähdään, että kuljetuksella, varastoinnilla, tietojärjestelmillä ja asiakaspalvelulla on hyvin keskeinen osa logistiikassa.

Logistiikkaa voidaan tarkastella myös sen tavoitteiden kautta. Eräs suosittu näkökulma on nähdä se prosessina, jonka tavoitteena on varmistaa, että tietyt tilausta, toimitusta, laatua ja kustannuksia koskevat perusvaatimukset täyttyvät. Hyödykkeiden on oltava oikeassa paikassa, oikeaan aikaan, oikeissa määrin, virheettömässä kunnossa ja kilpailukykyiseen hintaan (Rodrigue 2020). On esimerkiksi selvää, että tuotteilla ei ole asiakkaille arvoa ennen kuin ne on siirretty heidän ulottuvilleen käyttökuntoisina sovittun aikavälin sisällä. Aikaisempaa viiden kohdan vaatimusluetteloa voi Rushtonin ym. (2022) mukaan laajentaa edelleen kahdeksaksi hyvän asiakaspalvelun keskeiseksi elementiksi, joiden yhtenä perustana ovat logistiikan taso ja laatu. Tässä tapauksessa siihen lisätään oikea tuote, oikea asiakas ja vastuullisuusvaatimusten noudattaminen. Monet yllä mainituista vaatimuksista ovat sellaisia, että niiden täyttäminen on välttämätöntä markkinoilla menestymisen kannalta.

Logistiikan hallinta on keskeinen osa toimitusketjujen hallintaa. Hallintatoimintoihin sisältyy usein saapuvien ja lähtevien kuljetusten hallinta, kaluston seuranta, varastointi, materiaalinkäsittely, tilausten täyttäminen, logistiikkaverkoston suunnittelu, varastonohjaus, tarjonnan ja kysynnän suunnittelu, sekä 3PL-palveluntarjoajien

hallinnointi. Logistiikan hallinnan tehtävänä on integroida, koordinoita ja optimoida kaikki logistiikkatoiminnot keskenään, sekä integroida ne muiden liiketoimintatoimintojen kanssa. (CSCMP 2013.)

Tässä tutkielmassa digitaalisen kaksosen roolia käsitellään aiheen rajaamiseksi pääasiassa logistiikan perinteisiksi osa-alueiksi miellettyjen kuljetusten (engl. transport) ja varastotoiminnan (engl. warehousing) näkökulmista. Kyseiset osa-alueet ja niiden alitoiminnot ovat yhteydessä toisiinsa osana suurempaa ja laajempaa konseptia, vaikka niitä kohdeltiin pitkään yksittäisinä elementteinä. Sekä tiedeyhteisö että liike-elämä tunnustavat kasvaneen tarpeen omaksua kokonaisvaltaisempi näkemys logistiikan monista alitoiminnoista ja -järjestelmistä vuorovaikutussuhteineen, koska tarkoituksena on varmistaa toiminnan kokonaisvaltainen optimointi. (Rushton ym. 2022.)

### **3.2 Kuljetukset**

Kuljetus ovat olennainen osa toimitusketjun logistiikkaa, koska se yhdistää toimitusketjun eri vaiheet toisiinsa. Sopivan kuljetusmuodon valinta on tärkeä päätös, jonka keskeisin kriteeri on löytää sopiva kustannusten ja asiakaspalvelun suhde. Yritysten toiminnan kansainvälistyminen on vaikuttanut suuresti eri kuljetusmuotojen suhteelliseen merkitykseen, ja pitkän matkan liikennemuodoista on tullut entistä tärkeämpiä. Maantiekuljetus on silti edelleen monissa viimeisen vaiheen kuljetuksissa ainoa todellinen vaihtoehto. (Rushton ym. 2022.)

Kuljetusmuodon valintaan vaikuttavat kustannus- ja palveluvaatimusten lisäksi toiminnalliset tekijät, kuljetustavan ominaisuudet ja lähetystekijät. Toiminnalliset tekijät voidaan luokitella suoran jakelun ulkopuolisiksi tekijöiksi, huomioon otettaviksi asiakasominaisuuksiksi, tuotteen fyysisiksi ominaisuuksiksi ja muiksi logistisiksi komponenteiksi. Kuljetusmuotojen erilaisia ominaisuuksia on myös ymmärrettävä ja arvioitava, koska ne sopivat keskenään erityyppisiin vaatimuksiin. Kuljetusmuodon asianmukaisuuden varmistamiseksi myös useita lähetystekijöitä on otettava huomioon, esimerkkinä kiireellisen lähetysten kuljettaminen nopealla kuljetusmuodolla. Lopullisen valintaprosessin tulos on yleensä jonkinlainen kustannusten ja palvelun välinen kompromissi. (Rushton ym. 2022.)

Maantiekuljetusten kuljetusresursseja tulee arvioida sekä suunnittelun että toiminnan näkökulmasta. Suunnitteluun liittyy kuljetusresurssien kuten sopivien kulkuneuvojen

tyypin, määrän ja kuljettajien tarpeen tunnistaminen keskipitkällä ja pitkällä aikavälillä. Kuljetusten toteutuksessa näiden resurssien käyttö on optimoitava ja kustannukset pidettävä mahdollisimman alhaisina. Ajoneuvo- ja kuljettajakantaa on siis käytettävä mahdollisimman tehokkaasti päivittäin. Ajoneuvojen reititys ja aikataulutus ovat keskeisessä osassa molempien näkökulmien huomioimisessa. (Rushton ym. 2022.)

Kuljetusten osalta globaalit tai paikalliset logistiikka- ja toimitusketjut voidaan jakaa runkokuljetukseen ja jakelukuljetukseen. Runkokuljetuksen voi määritellä laajasti tavaroiden kuljettamisena toimitusketjun ensimmäisen osuuden aikana alkupisteestä välipysähdykseen ennen lopullista määränpäättä. Alkupisteenä voi olla esimerkiksi tuotantolaitos ja välipysähdyksenä jakelukeskus. Runkokuljetusta seuraa jakelukuljetus, johon usein viitataan myös nimellä kaupunkilogistiikka tai viimeinen kilometri. (Liu ym. 2024.) Tällaisissa kuljetuksissa on otettava huomioon monia asioita kuten palvelutaso, ympäristövaikutukset, liikenneuhkat, turvallisuus ja energiansäästö, mikä tekee optimoinnista haasteellista. Viimeisimmät tekniset innovaatiot tarjoavat paljon mahdollisuuksia vastata näihin ongelmiin (Taniguchi ym. 2020).

### **3.3 Varastointi**

Varastot ovat ratkaisevan tärkeitä useimmille nykyaikaisille toimitusketjuille, sillä ne ovat todennäköisesti mukana toimitusketjun monissa eri vaiheissa keskeneräisestä työstä aina valmiisiin tuotteisiin asti. Seuraavaa asiakasta ketjussa palvelevina lähetyspisteinä niillä on myös keskeinen osa korkean asiakaspalvelutason tarjoamisessa. Monissa toimitusketjuissa varastot ovat kalleimpien elementtien joukossa. Tämä johtuu käytössä olevien maa-alueiden ja rakennusten laajuudesta, henkilöstömäärästä ja tarvittavista, usein pitkälle automatisoiduista laitteista. Siksi varastojen onnistunut suunnittelu ja hallinta on kriittistä sekä palvelun että kustannusten kannalta. (Rushton ym. 2022.)

Varastojen ensisijaisena tavoitteena on helpottaa tavaroiden varastointia ja liikkumista toimitusketjun kautta loppukuluttajalle. Vaikka varastonpitotarpeen minimoimiseksi käytetään monia tekniikoita, tavaroiden kerääminen varastoihin on usein välttämätöntä kysynnän ja tarjonnan välisten vaihteluiden tasoittamiseksi. Toisaalta globaalien toimitusketjujen, yhä epävakaampien markkinoiden ja tuotevalikoiman lisääntymisen yhdistelmä on johtanut siihen, että monissa yrityksissä varastotasot ovat jopa kasvaneet. Tavaroiden säilytys on kuitenkin vain yksi varaston monista mahdollisista rooleista,

jotka voivat liittyä olennaisesti myös esimerkiksi niiden liikkumisnopeuteen toimitusketjun läpi. (Rushton ym. 2022.)

Varasto suunnitellaan vastaamaan sen toimitusketjun erityisvaatimuksia, johon se kuuluu. Tietyt toiminnot ovat kuitenkin yhteisiä useimmille varastoille riippumatta siitä, ovatko ne luonteeltaan manuaalisia vai pitkälle automatisoituja. Näitä toimintoja ovat vastaanotto, varaston reservi- ja keräilypaikalle siirto, keräily, lajittelu, kokoaminen, lisäarvopalvelut ja pakkaaminen, sekä järjestely ja lähetys. Joissakin varastoissa materiaalivirta koostuu vielä yksinkertaisemmin vain vastaanotosta, lajittelusta, järjestelystä ja lähetyksestä. (Rushton ym. 2022.) Tällaista varastoa ei käytetä niinkään asioiden säilyttämiseen, vaan pikemminkin irtotavarylähetyksen vastaanottamiseen, niiden jakamiseen eriin, erilaisten nimikkeiden uudelleenpakkaamiseen lähteviksi tilauksiksi ja näiden tilausten jakeluun esimerkiksi tuotantolaitokseen tai vähittäiskauppaan (Wisner ym. 2012).

Varastotilojen onnistunut suunnittelu vaatii varaston tarkan roolin, varastotasojen, sekä asiakaspalvelu- ja läpivirtausvaatimusten tunnistamista. Sopivien laitteiden ja toimintatapojen valinta, sisä- ja ulkotilojen pohjapiirustusten määrittäminen, laitteiden ja henkilöstön määrän arviointi, niitä tukevien tietojärjestelmien tunnistaminen sekä ilmenevien pääoma- ja käyttökustannusten huomioiminen on monimutkainen prosessi, johon tarvitaan laaja-alaista osaamista. (Rushton ym. 2022.)

Suuren varaston johtaminen on vaikea tehtävä ja toimintaa on suunniteltava useilla eri tasoilla. Esimerkiksi kapasiteettisuunnittelua on tehtävä keskipitkällä ja pitkällä aikavälillä, jotta kasvulle on tilaa ja kausiluontoisista huipuista selvittää vaaditulla palvelutasolla. Lyhyellä aikavälillä taas tarvitaan työkuormasuunnittelua asianmukaisen kalusto- ja henkilöstömäärän tasapainottamiseksi varastovyöhykkeiden välillä. Varaston toiminnan tehokkuuden varmistamiseksi toimintojen suorituskykyä pitää mitata jatkuvasti. Lisäksi keskeisiä varastohallinnan osa-alueita ovat varaston turvallisuus, ympäristövaikutusten hallinta ja jatkuva prosessien kehittäminen. Kehittyneet tietotekniikat, kuten varastohallintajärjestelmät (engl. warehouse management system), ovat nykyaikaisten varastojen tehokkaan hallinnan edellytys, ja niiden avulla pienemmissäkin varastoissa voidaan saavuttaa merkittäviä etuja tuottavuudessa, tarkkuudessa ja nopeudessa. (Rushton ym. 2022.)

### 3.4 Kuljetusten ja varastoinnin haasteet

Logistiikan haasteita on jo hieman sivuttu johdannossa ja aiemmissa luvuissa 3.2 ja 3.3. Haasteet eivät jaa mielipiteitä kovinkaan paljon, vaan useat julkaisut ovat samoilla linjoilla. Bussen ym. (2021) mukaan nykyisten toimitusketjujen koordinointi on kasvava haaste logistiikassa, kun verkostot monimutkaistuvat toimijoiden määrän kasvun ja toiminnan kansainvälistymisen myötä. Tämä jakeluverkostojen monipuolistuminen vaikuttaa toimitusketjujen näkyvyyteen kielteisesti ja voi vaikuttaa haitallisesti organisaation ydinliiketoimintaan (Moshood ym. 2021). Haavoittuvuus häiriöille kasvaa myös ulkoistamisen, yhden toimittajan hankintastrategian ja puskurivarastojen minimoinnin seurauksena. Monimutkaisten järjestelmien optimaalinen hallinta edellyttää mahdollisimman suurta läpinäkyvyyttä koko verkostoon. Tällainen ei kuitenkaan yleensä ole mahdollista, koska on todennäköistä, ettei sidosryhmällä ole läpinäkyvyyttä edes siihen osaan verkostoa, jossa se toimii. (Busse ym. 2021.)

Verkkokaupan kasvaessa lisääntynyt toimituspalveluiden kysyntä luo painetta kehittää korkean suorituskyvyn liiketoimintamalleja kaupunkiliikenteeseen, jonka sujuvoittamisessa toimitusten suunnittelu ja ajoneuvojen reititys on keskeisessä osassa. Tällainen viimeisen kilometrin toimitusten kysynnän kasvu yrityksiltä suoraan kuluttajille tapahtuvassa kaupankäynnissä tuo mukanaan monia kielteisiä vaikutuksia, kuten ruuhkia, päästöjä ja melua varsinkin tiheään asutuilla kaupunkialueilla. (Gutierrez-Franco ym. 2021.) Myös jo pitkään jatkunut maailmanlaajuinen megatrendi, kaupungistuminen, lisää painetta kehittää kaupunkilogistiikkaa. Päättäjien, logistiikkaoperaattoreiden, kuluttajien ja kuljetusliikkeiden yhteistyötä täytyisi parantaa, jotta voidaan lieventää kaupungistumisen ympäristövaikutuksia, parantaa turvallisuutta, tukea talouskasvua ja tyydyttää asiakkaiden kohonneet tarpeet (Royo ym. 2023).

Maheshwari ym. (2024) nimeävät nykyisten varastojärjestelmien ongelmiksi sekaisen layoutin, heikon valmiuden vahinkojen torjuntaan ja hallintaan, vähäisen teknologian hyödyntämisen, huonon näkyvyyden ja epätydyttävän tilausten käsittelyn. Samoin kuin toimitusketjujen hallinnassa yleisesti varastotoimintojenkin uudistuspaineet johtuvat osaltaan asiakastilausten monimutkaisuuden ja monimuotoisuuden lisääntymisestä.

Varastohallintajärjestelmiä (engl. warehouse management system) kehittävä yhdysvaltalainen Hopstack on listannut varastohallinnan ydinhaasteiksi muun muassa varastosaldojen epätarkkuuden, epätehokkaan tilankäytön, huonon henkilöstön

hallinnan, alkeelliset prosessit, kysynnän kausiluontoisuuteen sopeutumisen, heikkotasaisen keräilyn ja huonon laadun valvonnan (Hopstack 2025). Nykypäivänä monien varastojen täytyy myös sopeutua verkkokaupan aiheuttamiin muutoksiin. Esimerkiksi monet kooltaan pienet tilaukset, suuri valikoima, vaihteleva työn määrä ja tiukat toimitusaikataulut asettavat uusia vaatimuksia varaston tehokkaalle hallinnalle (Boysen ym. 2019).

Kestävyys on noussut merkittävään asemaan ja yleiseen tietoisuuteen ilmaston muutoksen takia, joten sääntelytoimet alalla ovat ennakoitavissa. Logistiikkaverkostojen on mukautettava ja järjestelmällisesti sisällytettävä kestävä kehityksen näkökohdat strategisiin hankkeisiinsa seuraavan vuosikymmenen aikana. (Nitsche & Straube 2023.)

## 4 Digitaalisen kaksosen rooli logistiikassa

### 4.1 Digitaalisen kaksosen lisäarvo ja ulottuvuudet

Useimmat digitaalisen kaksosen teoreettiset ja käytännön hyödyt eri logistiikan osa-alueilla voidaan kategorisoida esimerkiksi niiden tuottaman arvon perusteella. Tällöin toimintojen saama lisäarvo on useimmiten kuvailevaa, analyttistä, diagnostista tai ennakoivaa (Moshood ym. 2021; Maheshwari ym. 2024). Kuvaileva arvo syntyy siitä, miten digitaalinen kaksonen lisää järjestelmän havainnollistettavuutta ja sitä kautta reagointikykyä ja tehokkuutta. Simulointiteknologioiden avulla optimoitu suorituskyky ja vianetsintä lisää analyttistä arvoa (Maheshwari ym. 2024). Osa tutkimuksista mainitsee ohjailevat menetelmät analyttisten sijaan (Gerlach 2021), mutta tämä viittaa samaan asiaan eli päätöksenteon tueksi luotuihin toimintasuosituksiin ja optimointiin (Xiros ym. 2025). Diagnostinen arvo syntyy siitä, miten historiallisen datan ja koneoppimisen perusteella digitaalinen kaksonen voi tunnistaa järjestelmän eri tiloja ja antaa sille optimoituja toimintaehdotuksia. Tulevaisuuden tilojen ennustaminen taas lisää ennakoivaa arvoa. (Maheshwari ym. 2024.) Analyttisellä, ohjailevalla ja diagnostisella arvolla viitataan siis samankaltaisiin kyvykkyyksiin.

Gerlachin ym. (2021) mukaan jokainen logistiikkasektorilla hyödynnettävä digitaalinen toimitusketjukaksonen kuvaa logistiikkasysteemiä, mutta näiden systeemien väliset rajat voivat vaihdella suuresti. Tarkastelun kohteena voi tällöin olla koko arvoverkosto tai vain tietty osa sitä. Kirjoittajat ovat luokitelleet digitaaliset kaksoset karkeasti kolmeen ryhmään niiden soveltamisalan suhteen. Soveltamisala voi olla logistiikkaverkosto, -keskus tai -kalusto. Verkostotasolla digitaalinen toimitusketjukaksonen edustaa usean sidosryhmän muodostamaa arvoverkostoa, paikkatasolla taas jotain tiettyä logistiikkakeskusta kuten varastoa tai tehdasta. Suppeinta tarkasteltavissa olevaa tasoa voidaan kutsua kalustotasoksi, ja sen digitaalinen kaksonen edustaa logistiikkasysteemien peruselementtejä kuten trukkeja ja kuorma-autoja, joita ei kuitenkaan yksinään pidetä logistiikkasysteeminä. (vrt. Ivanov 2024.) Alaluvuissa 4.2 ja 4.3 tarkastellaan, mitä mahdollisia rooleja digitaalisella kaksosella on kuljetusten ja varastoinnin kontekstissa.

## 4.2 Kuljetukset

Digitaalisen kaksosen mahdollistamasta kuljetusten lämpötilan ja muiden olosuhteiden kuten tärinän reaaliaikaisesta seurannasta ja ennakoinnista on erityistä hyötyä muun muassa herkkien tuotteiden kuten kylmäketjua vaativien lääkkeiden ja herkästi pilaantuvan ruoan toimitusketjussa. Lääkeaineiden toimituksissa laadun varmistaminen on elintärkeää, koska vaurioituneista tuotteista koituu merkittävää mainehaittaa ja palautuslogistiikan kustannukset ovat korkeat. Viallisista toimitusolosuhteista johtuvaa tuotteen vaurioitumista ja vaikuttavan aineen denaturoitumista on mahdollista ehkäistä digitaalisen kaksosen reaaliaikaista etäseuranta hyödyntämällä. (Wu ym. 2023.)

Mannertenvälisten hedelmä- ja vihannestoimitusten digitaalisia kaksosia on käytetty ymmärtämään ja simuloimaan niiden lämpökäyttäytymistä koko kylmäketjussa mitattujen lämpötilaolosuhteiden eli hedelmien kuljetusympäristön lämpötilojen perusteella. Mallinnus auttaa ymmärtämään, tallentamaan ja ennustamaan, miksi ja missä toimitusketjun vaiheessa lämpötilasta riippuvaisten hedelmien laadun heikkeneminen tapahtuu. Se puolestaan mahdollistaa jäähdytysprosessien ja logistiikan optimoinnin niin, että hävikki ja ympäristövaikutukset voidaan minimoida. (Defraeye ym. 2019, 2021.)

Digitaalinen kaksonen voisi tuoda monia hyötyjä toimitusketjuihin, joissa on monimutkainen kuljetusrakenne. Sen avulla voitaisiin esimerkiksi ottaa huomioon eri kuljetusmuotojen yksittäiset tekijät tarkemmin, jolloin toimitusaikoja olisi helpompi ennustaa (Busse ym. 2021). Se voi myös tehostaa erityyppisten kuljetusmuotojen ja palvelujen integrointia, sekä vähentää kuljetusverkon epävarmuutta (Sakti ym. 2023). Digitaalinen kaksonen voisi ottaa jatkuvasti oppia aikaisemmista tavarakuljetuksista toimitusketjun läpi. Toimijoiden välinen vuorovaikutus tallentuu tietokantaan, joten koneoppimisen ja datahistorian avulla se voi myöhemmin ennustaa tulevien tapahtumien todennäköisyyksiä, jolloin esimerkiksi satamien pullonkaulatilanteisiin voitaisiin varautua laatimalla tarvittavat tullausdokumentit oikeaan aikaan. (Busse ym. 2021; Sakti ym. 2023.) Keskeisenä kyvykkyytenä voidaan nähdä myös mahdollisuus simulointiin, jonka avulla saadaan tietoa kuljetusverkostosta. Tiedon avulla pystyttäisiin määrittämään toimitusketjun kriittiset pisteet ja häiriötekijät. Digitaalisen kaksosen avulla ongelmat voitaisiin ratkaista kustannustehokkaimmalla tavalla. (Busse ym. 2021.) Lisäksi Saktin ym. (2023) mukaan digitaalisella kaksosella on merkittävää potentiaalia edistää synkronointia kiinteiden ja liikkuvien resurssien, asiakkaiden

vaatimusten ja useiden toimijoiden välillä. Asianomaisten on sen avulla helpompi päättää, mikä kuljetusmuoto kannattaisi valita tai millainen kuljetusmuotojen yhdistelmä olisi kannattavin kokonaisuus ja mahdolliset rajoitteet huomioiden. Ulkoisten järjestelmien ymmärtäminen on välttämätöntä liiketoiminnan edun kannalta, koska kumppanien kautta saadaan uudenlaista liiketoimintaosaamista (Shahat ym. 2021). Logistiikkatoimijoiden integrointi ja läpinäkyvän yhteistyöalustan luominen digitaalisen kaksosen avulla mahdollistaisi myös luottamuksen rakentamisen liikenteenharjoittajien kesken (Xu ym. 2025).

Belfadel ym. (2023) käsittelivät digitaalista kaksosta kaupunkilogistiikassa esimerkkinään moderni jakelukeskus. Heidän esittämässään viitekehyksessä digitaalinen kaksonen pystyy ratkaisemaan reititysongelmia, ennakoimaan matka-aikoja ja kysyntää pitkällä aikavälillä historiatietoihin perustuen. Myös Gutierrez-Franco ym. (2021) havaitsivat, että viimeisen kilometrin toimituksissa voidaan digitaalisen kaksosen avulla tukea päätöksentekoa, tunnistaa ongelmia ja reagoida häiriöihin varhaisessa vaiheessa. Päätöksenteon apuna käytetään ajoneuvojen kuljettajien ja asiakkaiden käyttäytymismallien analysointia, sijaintitietoja, sekä ajankohtaisia liikenne- ja sääolosuhteita, joiden perusteella on mahdollista esimerkiksi uudelleen reitittää tai järjestellä toimituksia. Viimeisen kilometrin toimitusten suunnittelu ja toteutus saattavat erota toisistaan huomattavasti esimerkiksi asiakkaan muuttuneen aikataulun tai poikkeuksellisten liikennejärjestelyjen takia. Vastaavissa tilanteissa ajoneuvojen hallintaa voidaan tukea digitaalisella kaksosella, joka säätää reittejä dynaamisesti tilanteen vaatimalla tavalla. Lisäksi viimeisen kilometrin toimitusten digitaalisen kaksosen avulla on mahdollista lievittää kasvavan kaupunkiliikenteen synnyttämiä ongelmia kuten ruuhkia, melua ja päästöjä. (Gutierrez-Franco ym. 2021; Royo ym. 2023; Belfadel ym. 2023).

Ivanov ja Dolgui (2021) havaitsivat, että digitaaliseen kaksoseen pohjautuva päätöstukijärjestelmä voi mahdollisesti tehostaa toimitusketjujen häiriöriskien proaktiivisia ja reaktiivisia hallintastrategioita ja varautumissuunnitelmia. Kyseisen päätöstukijärjestelmän etuja ovat toimitusketjun lisääntynyt näkyvyys, historiallisten häiriötietojen analyysi ja reaaliaikainen häiriötieto. Sijainti- ja kuljetuspäätökset nostetaan esiin yhtenä järjestelmän käytännön sovelluskohteena. Kuljetukseen liittyvä häiriöriski voi olla esimerkiksi ulkomailla sijaitsevan logistiikkakeskuksen lakko tai luonnonkatastrofi. Digitaalisen kaksosen avulla häiriön nopea tunnistus ja vaikutusten

arviointi on mahdollista. Lisäksi tilanteeseen voidaan reagoida tehokkaasti testaamalla simulaatiossa vaihtoehtoisia kuljetusverkkotopologioita ja varareittejä. Saman kaltaisiin tuloksiin päätyvät Lee ja Lee (2021) käsitellessään digitaalista kaksosta tilaelementtirakentamisen kuljetusten riskien hallinnan yhteydessä. Toimitusketjun aikataulupoikkeamat ovat tilaelementtirakentamisen kriittisiä riskitekijöitä. Tällaisia poikkeamia tapahtuu usein logistiikkaprosessin aikana, koska tilaelementit ovat suuren kokonsa ja kompleksisuutensa vuoksi erityisen alttiita kuljetusepävarmuuksille. Digitaalinen kaksonen voi ennakoida mahdollisia logistiikkaprosessin riskitekijöitä, löytää vaihtoehtoisia reittejä ja ennakoida arvioidun saapumisajan tarkasti simulaation perusteella. Tämä myös helpottaa toimitusketjun tehokasta koordinoitua hankkeeseen osallistujien kesken ja mahdollistaa tilaelementtien toimituksen juuri oikeaan aikaan. (Lee ja Lee 2021.)

Digitaalisen kaksosen avulla voidaan parantaa kuljetuskapasiteetin hallintaa. Kuljetuskapasiteetin käyttöä voidaan maksimoida maantiekuljetuksissa optimoimalla reittejä nouto- ja luovutuspaikkoihin niin, että tyhjiä ajoja ja polttoainepäästöjä saadaan vähennettyä (Abdullahi ym. 2025). Kuorman lastaamisen suunnittelussa se mahdollistaa suuremman täyttöasteen ja kuljetusvahinkojen ehkäisyn optimoimalla lastin sijoittelua. Sijoittelussa se ottaa huomioon niin lastin fyysiset ominaisuudet kuin purkukohteen ja kiireellisyyden, mikä mahdollistaa prosessien tehostamisen ja sujuvan integroinnin koko toimitusketjun tasolla. (Wong ym. 2021, Gerlach 2021.)

Digitaalisilla kaksosilla on rooli myös kuljetuskaluston kunnan valvonnassa ja ennakoivassa kunnossapidossa. Kehittyneiden esineiden internetin antureiden ansiosta se mahdollistaa ajoneuvojen ja liikenneinfrastruktuurin teknisen kunnan jatkuvan seurannan, jonka avulla tekniset ongelmat ja viat voidaan tunnistaa nopeasti. Lisäksi se pystyy kerätyn tiedon perusteella ennustamaan niitä, jolloin huoltotoimenpiteitä voidaan suunnitella ja aikatauluttaa etukäteen. (Werbińska-Wojciechowska ym. 2024.)

### 4.3 Varastointi

Toimitusketjun digitaalisella kaksosella saadaan aikaan kokonaisvaltainen käsitys meneillään olevien hankkeiden ja suunnitelmien toteutuksesta what-if skenaariot mukaan lukien. Lisäksi siihen sisältyy tilastollista data-analyysiä, varastonohjauksen ja varastotoiminnan suunnittelua. Se mahdollistaa määrällisen analyysin, joka auttaa harjoittajia ymmärtämään tarjonta- ja kysyntämalleja sekä hyödyntämään big data-analytiikkaa ja sidosryhmien havaintoja kannattavimmalla tavalla. Keskeisimpinä hyötynäkökohtina voidaan pitää varastonhallinnan kannalta kysynnän ja tarjonnan suunnittelua, riskien hallintaa, optimaalista varastonohjausta, sekä sisäistä että ulkoista kuljetussuunnittelua. (Maheshwari ym. 2024.) Digitaalinen kaksonen tuo fyysisen ja virtuaalisen varaston lähemmäs toisiaan, mikä tukee tehokasta ja nopeaa varastotoiminnan suunnittelua, varastonhallintaa ja päätöksentekoa (Agalianos ym. 2020).

Varaston omaisuuserien seuranta on tärkeä osa omaisuudenhallintaa, jonka tavoitteena on tehostaa logistiikkatehtäviä. Digitaalisten kaksosten aikaansaama yksittäisten omaisuuserien täysi jäljitettävyyys mahdollistaa pitkälle automatisoidut ja optimoidut ratkaisut, esimerkiksi varastosaldojen päivittymisen automaattisesti. (Frankó ym. 2020.) Maheshwari ja Kamble (2022) osoittavat, että digitaalinen kaksonen voi tukea optimaalisen varastopolitiikan kehittämistä. Sen avulla voidaan esimerkiksi seurata varastotasoja ja kustannuksia reaaliaikaisesti ja ennakoivasti, mallintaa kysynnän kausiluontoisuutta, mitata varaston kustannustekijöitä ja arvioida niiden vaikutuksia eri tasoilla. Lisäksi laajempi näkyvyys ja tiedon jakaminen toimitusketjun eri solmukohtiin pienentää läpimenoaika ja tuo varaston optimointiin kokonaisvaltaisen näkökulman.

Samaan tapaan kuin aiemmin tässä tutkielmassa käsiteltyjen kuljetusten kohdalla, digitaalisen kaksosen mahdollistama reaaliaikainen olosuhteiden seuranta ja hallinta on tärkeässä osassa helposti pilaantuvien tuotteiden varastoinnissa. Hu ym. (2023) mukaan varaston toimintaa digitaalisen kaksosen avulla optimoimalla voidaan vähentää vihannesten hävikkiä jopa 25-30%. Tuotteiden tuoreusvaatimusten perusteella se voi säätää automaattisesti muun muassa varastovyöhykkeiden lämpötilaa, kosteutta ja reittisuunnittelua.

Baruffaldin ym. (2019) mukaan digitaalinen kaksonen voi avustaa 3PL-johtoa asianmukaisen varastonhallintajärjestelmän räätälöinnissä. Sitä voidaan käyttää

ennakoimaan annettujen logistiikka- ja toimintapäätösten vaikutuksia. Sen kautta johto pystyy tarkkailemaan varaston suorituskyvyn vaihtelua, sekä arvioimaan, miten eri skenaariot vastaavat toimintaympäristön muutoksiin. Digitaalisen kaksonen mahdollistama varaston toiminnan virtualisointi tukee päätöksentekoa esimerkiksi toiminnanohjaukseen suunniteltujen muutosten yhteydessä. Tällöin se testaa erilaisten menettelytapojen reagointi- ja sietokykyä kysynnän kausiluontoisuuteen ja varastojakauman vaihteluihin. Varastonhallintajärjestelmän digitaalinen kaksonen voi siis arvioida tietyn varasto- tai keräilykäytännön toimivuutta ja kyseisen järjestelmäominaisuuden implementoinnista seuraavia lyhyen ja pitkän aikavälin vaikutuksia. Lisäksi sen mahdollistama asiakkaiden tietoisuuden lisääminen ja suurempi näkyvyys 3PL:n toimintaan voi kasvattaa näiden luottamusta ja auttaa ylläpitämään ja luomaan parempia suhteita.

Varastossa digitaalinen kaksonen voi auttaa optimoimaan tilanjakoa osoittamalla tavaroille parhaan mahdollisen varastopaikan ja lavoittamistavan. Tällainen varastointikäytäntöjen tehostaminen saattaa myös lyhentää noudon ja keräilyn keskimääräisiä matka-aikoja ja pienentää kustannuksia. (Leng ym. 2021.) Félix-Cigalat ja Domingo (2023) tarkastelevat, miten digitaalinen kaksonen mahdollistaa varastonhallinnan kehittämisen tehostamalla sisäisiä kuljetuksia, tilanjakoa ja layoutia. Sen avulla luodun simulaation perusteella varastotilan käyttöaste ja kuljetusreitit saadaan optimoitu.

Digitaalinen kaksonen on hyödyllinen työkalu varastointialueiden toiminnan tehostamisessa. Gaon ym. (2022) esittelemä digitaalinen kaksonen mahdollistaa automatisoidun konttiterminaalien säilytyspihan aikataulutuksen optimoinnin dynaamisissa olosuhteissa. Se keskittyy optimoimaan varastoalueen tilanjakoa, vihivaunujen polkusuunnittelua ja pinoamisnosturien aikataulusuunnittelua. Se pystyy seuraamaan, visualisoimaan ja hallinnoimaan säilytyspihan toimintaa reaaliaikaisesti, sekä simuloinnin avulla löytämään tehokkaimmat ratkaisut ja sopeutumistavat häiriöihin. Esimerkiksi tilanteessa, jossa konttialus tai -auto saapuu varastopihalle sovittuun ajan ulkopuolella digitaalinen kaksonen ajoittaa ja jakaa automaattisten pinoamisnostureiden tehtäväjärjestyksen uudelleen niin, että suoritusvälit ja odotusajat saadaan minimoitua. Se myös määrittää vihivaunuille mahdollisimman lyhyen reitin ja varmistaa, että ruuhkia ei synny. Lisäksi purku- ja lastaustoimenpiteet toteutetaan tehokkaasti älykkäällä tilanjaolla, mikä vähentää konttien uudelleen järjestelyn tarvetta.

Leung ym. (2022) esittelivät viitekehyksen tehostamaan fyysisen internetin jakelukeskukseen saapuvan tavaravirran koordinoitua ja optimointia. Heidän simulaatiotuloksensa mukaan digitaalisen kaksosen avulla varaston sisäisiä matka-aikoja ja täydennysoperaatioiden määrää saadaan pienennettyä.

Zhaon ym. (2021) ja Zhanin ym. (2022) mukaan digitaalisen kaksosen avulla voidaan myös parantaa varaston työturvallisuutta. Digitaalinen kaksonen seuraa ja havainnoi työntekijöiden liikkeitä ja oppii tunnistamaan epänormaalin liikkeen tai liikkeiden puutteen, joka voi olla merkki sattuneesta työtapaturmasta. Se varmistaa, että tarvittavat pelastustoimenpiteet saadaan aloitettua välittömästi ja ne suoritetaan mahdollisimman tehokkaasti. Lisäksi Sharotry ym. (2022) havaitsivat, että työntekijöiden vammoihin johtavia tapaturmia voidaan ehkäistä digitaalisella kaksosella, joka seuraa heidän biomekaanista väsymystasoaan analysoimalla nivelkulmien muutoksia manuaalisissa materiaalinkäsittelyn työtehtävissä. Lähestymistavan soveltaminen rajoittuu työntekijän yksilölliseen väsymystasoon, josta tämä saa palautetta. Luotu viitekehys olisi kirjoittajien mukaan kuitenkin mahdollista viedä suurempaan mittakaavaan, jossa sitä hyödynnettäisiin koko henkilöstön hallintaan. Sen avulla työvuorosunnittelua, henkilöresurssien kohdentamista ja käyttäjäkohtaisia työtehtäviä voitaisiin tulevaisuudessa optimoida reaaliaikaisesti fyysisen kuormitustason perusteella.

#### **4.4 Yritysesimerkkejä logistiikan digitaalisesta kaksosesta**

Tunnettuja logistiikassaan jonkinlaista digitaalista kaksosta hyödyntäviä yrityksiä on jo paljon. Määrän odotetaan kasvavan edelleen ja Gartner (2023) arvioi, että maailmanlaajuisesti yli 40 % suuryrityksistä käyttäisi digitaalista kaksosta hankkeissaan vuoteen 2027 mennessä tarkoituksenaan lisätä tuottavuuttaan. Tässä luvussa esitellään joitakin maailman johtavia logistiikkayrityksiä, jotka käyttävät digitaalista kaksosta.

Lähetys- ja logistiikkapalveluyritys UPS hyödyntää digitaalista kaksosta logistiikkatoiminnoissaan siirtyäkseen reaktiivisesta proaktiiviseen verkostonhallintaan. Lähestymistapa mahdollistaa pullonkaulojen ennakoinnin ja niihin puuttumisen, palveluvelvoitteiden täyttämisen ja resurssien käyttöasteen maksimoinnin. Keskeisimmiksi hyödyiksi yritys lukee what-if skenaariosuunnittelun, verkoston kitkakohtien nopean tunnistamisen, tarkemman tulosten ja yksityiskohtaisen lähetysten kunnon seurannan (UPS 2024.) Yritys hyödyntää kuorma-autoissaan satoja antureita, joilla kerätään tietoa niin kuljettajista, työntekijöistä kuin asiakkaistakin. Näin

laajan logistiikkaverkoston eri yksiköiltä kerätään jatkuvasti dataa edistyneisiin analytiikkaohjelmistoihin, joiden optimointityökalujen avulla sen tehokkuutta ja joustavuutta voidaan parantaa. Digitaaliset kaksoset seuraavat järjestelmässä liikkuvia paketteja reaaliajassa lähetystarran luomisesta lopulliseen toimitukseen. Verkoston virtuaalinen kopio suorittaa dynaamisia reittien optimointi- ja navigointitehtäviä, hallitsee kapasiteetin allokointia ja pakettien lähetysreittejä solmukohtaisesti. (Tozanli ja Saéenz 2022.)

Logistiikkayhtiö FedEx käyttää myös digitaalisia kaksosia optimoidakseen kuljetuskalustoaan, resurssien käyttöä ja resurssien kohdentamista sekä vahvistaakseen kykyään ennustaa, tunnistaa ja minimoida häiriöt ja vahingot tarkasti (Tozanli ja Saéenz 2022). FedExin toimintayksikkö FedEx Office loi yhdessä Accenturen ja River Logicin kanssa digitaalisen kaksosen sen laajasta tulostus- ja jakeluverkostosta. Digitaaliseen kaksoseen sisältyi lähes 2200 vähittäismyymälän verkostoa, 18 kaupallista painolaitosta ja maanlaajuinen kuljetuskalusto, joiden avulla pystyttiin visualisoimaan skenaarioita, optimoimaan toimintaa vastaamaan asiakkaiden nykyisiä vaatimuksia ja parantamaan asiakaskokemusta (FedEx 2021.)

Logistiikkayhtiö DHL on toteuttanut yhteistyökumppanilleen Tetra Pakille Singaporeen digitaalisen varastokonseptin, jossa otettiin käyttöön varaston digitaalinen kaksonen. Se seuraa ja simuloi varaston fyysistä tilaa ja käyttäytymistä reaaliajassa kellon ympäri mahdollistaen erityisesti tuottavuuteen ja turvallisuuteen liittyvien ongelmien ratkaisun heti niiden ilmetessä. Digitaalinen kaksonen tukee Tetra Pakkia muun muassa varastopaikkojen, inventaarion ja työvirtojen hallinnassa, sekä varastolaitteiden allokoinnissa. Tämän seurauksena varastotilojen käyttöaste ja toiminnan tehokkuus kasvavat ja työturvallisuus paranee. (DHL 2019.)

#### **4.5 Implementoinnin haasteet**

Digitaalisen kaksosen potentiaalia kehittää logistiikkaa on analysoitu edeltävissä luvuissa. On kuitenkin syytä huomioida, että sen implementointiin liittyy edelleen monenlaisia haasteita, jotka rajoittavat yleistymistä logistiikassa ja muussa toimitusketjujen hallinnassa.

Digitaalisten kaksosten maksimipotentiaalin hyödyntäminen vaatii sitä, että tietoja vaihdetaan laajalti useiden eri tahojen välillä. Javaidn ym. (2023) mukaan suurimpia

implementointiin liittyviä haasteita yrityksille ovat riittävän korkean tietoturvan ja tietosuojan saavuttaminen. Suunnitteluprosessin aikana on sidosryhmien kesken ratkaistava lukuisia immateriaalioikeuksiin, valvontaan ja suojaukseen liittyviä ongelmia (Maheshwari ym. 2024). Digitaalinen kaksosen sisältää runsaasti arkaluontoista tietoa, mikä tekee siitä houkuttelevan kohteen kyberrikollisille. Tuo tieto ja mahdollisuus vaikuttaa yritysten prosesseihin aiheuttaisi tuhoisia seurauksia joutuessaan vääriin käsiin (Kamble ym. 2022).

Kustannukset ovat luonnollisesti keskeisessä roolissa, kun yritykset arvioivat uusien teknologioiden hyötyjä. Monet logistiikka- ja kuljetusalan toimijat ovat pieniä ja keskisuuria yrityksiä, joilla on rajalliset digitaaliset valmiudet ja investointikapasiteetti (Liu 2024). Digitaalisen kaksosen käyttö vaatii edelleen useimmissa tapauksissa suuria alkuinvestointeja, joten usein yritysten on kannattavampi valita muita samankaltaisia etuja tarjoavia edullisempia vaihtoehtoja (Moshood ym. 2021; Maheshwari ym. 2024).

Logistiikassa digitaalisen kaksosen perustana voivat olla sadat tai tuhannet anturit ja laitteet, joten kerätyn tiedon määrä on valtava. Esitystavan tarkkuuteen vaikuttaa olennaisesti käytetyn datan laatu. Laadun varmistamiseksi tarvitaan korkealaatuisia algoritmeja, jotka osaavat tarkistaa ja suodattaa relevantin datan nopeasti haluttua käyttötarkoitusta varten. (Fuller ym. 2020; Maheshwari ym. 2024.) Epäyhtenäiset tietolähteet ja -formaatit aiheuttavat myös integraatiohaasteita, jotka haittaavat reaaliaikaisen simulaatiomallinnuksen luontia. Lisäksi kerätyn tiedon skaalautuvuuden varmistaminen vaatii erityistä huomiota. (Zaidi ym. 2024.) Toimitusketjujen hallintaan liittyvät prosessit ovat laajoja ja monimutkaisia, eri suuruisten solmujen ja lohkojen yhdistelmiä, joten järjestelmän komponenttien tarkka esittäminen on todella hankalaa (Maheshwari 2024). Haasteellista on tällöin myös päättää, mitä mallissa kannattaa priorisoida ja mitä voi yksinkertaistaa (Moshood 2021).

## 5 Yhteenvedo ja johtopäätökset

Tutkielman tarkoituksena oli kartoittaa, mikä on digitaalisen kaksosen rooli toimitusketjujen hallinnan logistiikassa, kuljetuksen ja varastoinnin näkökulmista. Aiheelle luotiin pohja digitaalisen kaksosen konseptin ja historian yleisellä tarkastelulla, minkä jälkeen toimitusketjujen hallinnan konteksti korostui. Sitten selvitettiin logistiikan pääpiirteitä, tavoitteita ja haasteita. Lopuksi tarkasteltiin digitaalisen kaksosen roolia logistiikassa kuljetusten ja varastoinnin, sekä yritysmerkkien kautta. Lisäksi tarkasteltiin sen tuottamaa lisäarvoa, mahdollisia ulottuvuuksia ja roolin kehitystä hidastavia haasteita. Taulukkoon 1 on koottu tutkielman keskeiset tulokset.

Taulukko 1 Digitaalisen kaksosen rooli logistiikassa

Soveltamisala	Lyhyt kuvaus digitaalisen kaksosen roolista	Hyödyt	Lähde
Toimitusverkosto	Tarjoaa ajantasaista tietoa kuljetusverkostosta, seuraa toimijoiden vuorovaikutussuhteita, integroi ja koordinoi eri sidosryhmät, kuljetussuunnittelu, toimitusaikojen ennustaminen	Läpinäkyvyys, joustavuus, palvelutason parantaminen, päätöksentekö, uudenlainen liiketoimintasuunnittelu ja luottamus	Busse ym. (2021); Sakti ym. (2023), Shahat ym. (2021), Xu ym. (2025)
Riskien hallinta	Logistiikkaverkoston reaaliaikainen häiriötieto ja historiatietojen analyysi ja simulointi mahdollistaa proaktiiviset ja reaktiiviset hallintastrategiat ja varautumisen	Läpinäkyvyys, korkeampi resilienssi, pullonkaulojen eliminointi	Ivanov ja Dolgui (2021); Sakti ym. (2023); Busse ym. (2021), Gao ym. (2022)
Viimeinen kilometri / Kaupunkilogistiikka	Dynaaminen reititys, häiriöihin reagointi varhaisessa vaiheessa, matka-aikeiden ennakointi, kuljettajien ja asiakkaiden käytösmallien analysointi, reititoptimointi	Kaupunkiliikenteen ongelmien lievennys, korkea palvelutaso	Belfadel ym. (2023); Gutierrez-Franco ym. (2021); Royo (2023)
Kuljetuskalusto	Teknisen kunnan jatkuva valvonta, huoltoimenpiteiden ennakointi	Kaluston kunnan optimointi, korkean palvelutason ylläpito	Werbińska-Wojciechowska ym. 2024
Varastonohjaus	Varastosaldojen päivittyminen automaattisesti, varastotason ja kustannuksien reaaliaikainen seuranta, kysynnän kausiluontoisuuden mallinnus, laajempi näkyvyys ja tiedonjakaminen sidosryhmille	Varastosaldojen suurempi tarkkuus, kustannusten arvioinnin helpottuminen, läpimenoaajan lyhentäminen	Frankó ym. (2020), Mareshwari ja Kamble (2022)
Varaston sisäiset kuljetukset, layout suunnittelu ja tilanjako	Sisäisten tavaravirtojen hallinta, aikataulutus, matkakojojen, reittien, layoutin ja varastopaikkojen optimointi	Suurempi tilan käyttöaste, nopeammat täydennys-, nouto- ja keräilyoperaatiot, tehokkuus	Gao ym. (2022), Leng ym. (2021); Félix-Cigalat ja Domingo (2023); Leung ym. (2022)
Varaston työturvallisuus ja henkilöstön hallinta	Työntekijöiden liikkeiden seuranta, tulevaisuudessa henkilöstön hallinta	Turvallisempi työympäristö, nopea reagointi tapaturman sattuessa, henkilöstöresurssien kohdentaminen	Zhao ym. (2021); Zhan ym. (2022), Sharotry ym. (2022)
Lastausuunnittelu ja tavaran laivoitus	Kuorman suurempi täytöaste ja hienosäädetty sijoittelu. Reititusuunnittelu, joka minimoi tyhjiä ajoja. Varastolla optimoitu laivoittamistapa.	Kuljetusvahinkojen ehkäisy, polttoainepäästöjen vähentäminen, optimoitu laivoitus ja tilan hyödynnäminen	Wong ym. (2021), Abdullahi ym. (2025), Leng ym. (2021)
Kuljetuslähtökset ja varastossa olevat hyödykkeet	Olosuhteiden reaaliaikainen seuranta ja ennakointi, logistiikan optimointi niin, että laatu pysyy hyvänä.	Pienempi hävikki ja ympäristövaikutukset	Wu ym. (2023); Dedracye ym. (2019, 2021); Hu ym. (2023)

Logistiikan haasteita käsitellessä ilmeni, että edistyksellisempää koordinointia ja häiriöihin varautumista tarvitaan monimutkaisten rakenteiden hallinnassa. Tutkielman mukaan digitaalisesta kaksosesta olisi hyötyä juuri tällaisissa verkostoissa, joissa se voisi tehostaa logistiikkatoimijoiden integrointia, parantaa synkronointia kiinteiden ja liikkuvien resurssien, toimijoiden ja asiakkaiden vaatimusten välillä, sekä vähentää verkoston epävarmuutta proaktiivisella ja reaktiivisella riskienhallinnalla. Lisäksi se mahdollistaisi optimoidut, joustavat ja kustannustehokkaat ratkaisut, sekä läpinäkyvän yhteistyöalustan luomisen ja luottamuksen rakentamisen. Vaikka toiminnan kokonaisvaltainen optimointi onkin logistiikan tavoitteena ja digitaalinen kaksonen olisi sen saavuttamisen kannalta hyödyllinen työkalu, täytyy huomioida, että laaja implementointi verkostotasolla on haasteellista. Tämä johtuu muun muassa tietosuojaan ja -turvaan liittyvistä kysymyksistä, kustannuksista ja kerättävän tiedon valtavasta määrästä. Muu kuin teoreettinen tutkimus ja käytännön sovellutukset verkoston digitaalisista kaksosista ovat vielä erittäin harvinaisia, mutta odotukset ovat korkealla.

Kaupunkilogistiikan haasteena on verkkokaupan myötä kasvanut toimituspalveluiden kysyntä, mikä lisää ruuhkia, melua ja päästöjä kaupunkialueilla. Digitaalinen kaksonen voi auttaa sujuvoittamaan toimituksia reittien dynaamisen optimoinnin, matka-aikojen ennakoinnin ja kysynnän historiatietoihin perustuvien mallinnusten avulla. Se tukee päätöksentekoa analysoimalla kuljetusverkoston toimijoita ja muuttujia ja tarjoaa ymmärrystä siitä, miten kasvavan kaupunkiliikenteen ongelmia voidaan lievittää. Se myös pystyy optimoimaan kuljetuskapasiteetin käyttöä säätämällä reittejä nouto- ja luovutuspaikkoihin niin, että tyhjiä ajoja joudutaan ajamaan mahdollisimman vähän, jolloin polttoainepäästöjä saadaan vähennettyä.

Varastohallinnan haasteiksi mainittiin muun muassa sekainen layout, huono näkyvyys, inventoinnin epätarkkuus ja heikko valmius vahinkojen torjuntaan. Digitaalinen kaksonen voi varastojen tasolla mahdollistaa tilojen ja tilanjaon suunnittelun, varastosaldojen automaattisen päivittymisen, kysynnän kausiluontoisuuden mallinnuksen, laajemman näkyvyyden ja tiedonjakamisen sidosryhmille. Tilojen ja tilanjaon suunnittelun avulla varaston käyttöaste saadaan mahdollisimman korkeaksi niin, että täydennys-, nouto-, keräily-, lastaus- ja purkuoperaatiot pystytään edelleen toteuttamaan tehokkaasti ja matka-ajat ovat lyhyitä. Lisäksi varaston sisäisiä tavara virtoja ja muita toimintoja voidaan tehostaa säätämällä aikataulutusta ja reittejä dynaamisesti tilanteen vaatimalla tavalla, esimerkiksi aikataulumuutosten takia.

Logistiikkakeskuksissa myös työturvallisuutta voidaan parantaa digitaalisen kaksosen seuranta hyödyntämällä, sillä sen avulla työtapaaturmia voidaan ehkäistä ja niihin pystytään reagoimaan välittömästi.

Yksinkertaisimmillaan digitaalisen kaksosen voi olla esimerkiksi tuotteiden ja niihin liittyvien prosessien tasolla optimoimassa niiden laatuun vaikuttavia tekijöitä kuten jäähtyysprosesseja tai lavoitustapoja varastoinnin tai kuljetuksen aikana. Tämä auttaa luonnollisesti pienentämään hävikkiä, mikä on taloudellisten vaikutusten lisäksi oleellista myös toiminnan vastuullisuuden ja asiakastyytyväisyyden kannalta. Kalustotasolla digitaalisen kaksosen mahdollistama ennakoiva kunnossapito varmistaa, etteivät äkilliset laiteviat häiritse toimintaa ja vaikuta palvelutasoon negatiivisesti.

Digitaalisen kaksosen rooli logistiikassa on fyysisen järjestelmän visualisointi, sekä diagnostisten, ennustavien ja ohjailevien menetelmien käyttö ja sitä kautta esille tulleiden näkemysten avulla varsinkin lyhyen ja keskipitkän aikavälin päätöksenteon tukeminen. Sitä voidaan hyödyntää laajalti toimitusverkostoon, kokonaisvaltaiseen tai yksittäisen toiminnon riskienhallintaan, kuljetuksissa kaupunkilogistiikkaan, kuljetuskaluston ennakoivaan kunnossapitoon ja lastaussuunnitteluun, sekä varastoinnissa saapuviin, sisäisiin ja lähteviin tavaravirtoihin, varastonohjaukseen ja tilojen ja niiden käytön suunnitteluun. Kirjallisuus osoittaa, että ensisijainen tarkoitus on mahdollistaa logistiikkaprosessien tai järjestelmien tarkkailu ja optimointi, sekä häiriöihin varautuminen ja nopea reagointi niiden sattuessa.

Digitaaliseen kaksoseen kohdistuu suuria odotuksia, mutta haasteita on edelleen ratkaistavana ja varsinkaan pienten ja keskisuurten yritysten saamat hyödyt eivät välttämättä ylitä kynnystä implementointiin. Toisaalta voidaan ennustaa, että tulevaisuudessa mainittujen suuryritysten kaltaisten toimijoiden kiinnostus digitaalista kaksosta kohtaan kasvaa, koska sen tarjoaman läpinäkyvyyden, optimoinnin ja riskienhallinnan merkitys korostuu suurissa monimutkaisissa järjestelmissä.

## Lähteet

- Abdullahi, I. – Larijani, H. – Liarokapis, D. – Paterson, J. – Jones, D. – Murray, S. (2025) A data-intelligence-driven digital twin framework for improving sustainability in logistics. *Applied Sciences*, 15(2), 601.  
<https://doi.org/10.3390/app15020601>
- Agalianos, K. – Ponis, S. T. – Aretoulaki, E. – Plakas, G. – Efthymiou, O. (2020) Discrete event simulation and digital twins: Review and challenges for logistics. *Procedia Manufacturing*, 51, 1636–1641.  
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.228>
- Ala-Laurinaho, R. – Autiosalo, J. – Nikander, A. – Mattila, J. – Tammi, K. (2020) Data link for the creation of digital twins. *IEEE Access*, 8, 228675–228684.  
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3045856>
- Attaran, M. – Celik, B. G. (2023) Digital twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities. *Decision Analytics Journal*, 6, 100165.  
<https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100165>
- Baruffaldi, G. – Accorsi, R. – Manzini, R. (2019) Warehouse management system customization and information availability in 3PL companies: A decision-support tool. *Industrial Management & Data Systems*, 119(2), 251–273.  
<https://doi.org/10.1108/IMDS-01-2018-0033>
- Belfadel, A. – Hörl, S. – Tapia, R. J. – Politaki, D. – Kureshi, I. – Tavasszy, L. – Puchinger, J. (2023) A conceptual digital twin framework for city logistics. *Computers, Environment and Urban Systems*, 103, 101989.  
<https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2023.101989>
- Bhandal, R. – Meriton, R. – Kavanagh, R. E. – Brown, A. (2022) The application of digital twin technology in operations and supply chain management: A bibliometric review. *Supply Chain Management*, 27(2), 182–206.  
<https://doi.org/10.1108/SCM-01-2021-0053>
- Botín-Sanabria, D. M. – Mihaita, A.-S. – Peimbert-García, R. E. – Ramírez-Moreno, M. A. – Ramírez-Mendoza, R. A. – Lozoya-Santos, J. D. J. (2022) Digital twin technology challenges and applications: A comprehensive review. *Remote Sensing*, 14(6), 1335. <https://doi.org/10.3390/rs14061335>

- Boysen, N. – de Koster, R. – Weidinger, F. (2019) Warehousing in the e-commerce era: A survey. *European Journal of Operational Research*, 277(2), 396–411.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.08.023>
- Busse, A. – Gerlach, B. – Lengeling, J. C. – Poschmann, P. – Werner, J. – Zarnitz, S. (2021) Towards digital twins of multimodal supply chains. *Logistics*, 5(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/logistics5020025>
- CSCMP Glossary (2013) Council of Supply Chain Management Professionals.  
<[https://cscmp.org/CSCMP/cscmp/educate/scm\\_definitions\\_and\\_glossary\\_of\\_terms.aspx](https://cscmp.org/CSCMP/cscmp/educate/scm_definitions_and_glossary_of_terms.aspx)> haettu 31.8.2025
- Çöltekin, A. – Lochhead, I. – Madden, M. – Christophe, S. – Devaux, A. – Pettit, C. – Lock, O. – Shukla, S. – Herman, L. – Stachoň, Z. – Kubíček, P. – Snopková, D. – Bernardes, S. – Hedley, N. (2020) Extended reality in spatial sciences: A review of research challenges and future directions. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(7), 439. <https://doi.org/10.3390/ijgi9070439>
- Defraeye, T. – Tagliavini, G. – Wu, W. – Prawiranto, K. – Schudel, S. – Assefa Kerisima, M. – Verboven, P. – Bühlmann, A. (2019) Digital twins probe into food cooling and biochemical quality changes for reducing losses in refrigerated supply chains. *Resources, Conservation and Recycling*, 149, 778–794.  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.06.002>
- 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*, 109, 245–258. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.025>
- DHL (2019) DHL Supply chain partners Tetra Pak to implement its first digital twin warehouse in Asia Pacific [tiedote]. 16.7.2019.  
<<https://group.dhl.com/en/media-relations/press-releases/2019/dhl-supply-chain-partners-tetra-pak-implement-first-digital-twin-warehouse-asia-pacific.html>>  
haettu 31.8.2025
- Dietz, M. – Pernul, G. (2020) Digital twin: Empowering enterprises towards a system-of-systems approach. *Business & Information Systems Engineering*, 62, 179–184. <https://doi.org/10.1007/s12599-019-00624-0>
- Farahani, R. Z. – Rezapour, S. – Drezner, T. – Fallah, S. (2014). Competitive supply chain network design: An overview of classifications, models, solution

- techniques and applications. *Omega*, 45, 92–118.  
<https://doi.org/10.1016/j.omega.2013.08.006>
- FedEx (2021) FedEx Office teams up with Accenture and River Logic to optimize its print production and delivery network [tiedote]. 3.8.2021  
<<https://newsroom.fedex.com/newsroom/global/fedex-office-accenture-river-logic-optimize-print-production-and-delivery-network>> haettu 31.8.2025
- Félix-Cigalat, J. S. – Domingo, R. (2023) Towards a digital twin warehouse through the optimization of internal transport. *Applied Sciences*, 13(8), 4652.  
<https://doi.org/10.3390/app13084652>
- Frankó, A. – Vida, G. – Varga, P. (2020) Reliable Identification Schemes for Asset and Production Tracking in Industry 4.0. *Sensors*, 20(13), 3709.  
<https://doi.org/10.3390/s20133709>
- Fuller, A. – Fan, Z. – Day, C. – Barlow, C. (2020) Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research. *IEEE Access*, 8, 108952–108971.  
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>
- Furht, B. – Escalante, A. (2010) *Handbook of cloud computing*. Springer, New York.
- Gao, Y. – Chang, D. – Chen, C.-H. – Xu, Z. (2022) Design of digital twin applications in automated storage yard scheduling. *Advanced Engineering Informatics*, 51, 101477. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101477>
- Gerlach, B. – Zarnitz, S. – Nitsche, B. – Straube, F. (2021) Digital supply chain twins—Conceptual clarification, use cases and benefits. *Logistics*, 5(4), 86.  
<https://doi.org/10.3390/logistics5040086>
- Glaessgen, E. H. – Stargel, D. S. (2012) The digital twin paradigm for future NASA and U.S. Air Force vehicles. In 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference (AIAA Paper 2012-1818). American Institute of Aeronautics and Astronautics.  
<https://doi.org/10.2514/6.2012-1818>
- Greene, S. (2023) Freight transportation. MIT Climate Portal 3.2.2023.  
<<https://climate.mit.edu/explainers/freight-transportation>> haettu 31.8.2025
- Grieves, M. (2014) DT: manufacturing excellence through virtual factory replication [white paper].  
<[https://www.researchgate.net/publication/275211047\\_Digital\\_Twin\\_Manufacturing\\_Excellence\\_through\\_Virtual\\_Factory\\_Replication](https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication)> haettu 26.8.2025

- Groombridge, D. (2022) Top strategic trends for 2023 [esitysmariaali]. Gartner for information technology executives.  
<<https://emt.gartnerweb.com/ngw/globalassets/en/publications/documents/2023-gartner-top-strategic-technology-trends-ebook.pdf>> haettu 31.8.2025.
- Gutierrez-Franco, E. – Mejia-Argueta, C. – Rabelo, L. (2021) Data-driven methodology to support long-lasting logistics and decision making for urban last-mile operations. *Sustainability*, 13(11), Article 11.  
<https://doi.org/10.3390/su13116230>
- Hopstack (2025) Top 10 Warehouse management challenges & solutions (päivitetty 2025). 1.1.2024 <<https://www.hopstack.io/blog/top-10-warehouse-management-challenges>> haettu 26.8.2025.
- Hu, B. – Guo, H. – Tao, X. – Zhang, Y. (2023) Construction of digital twin system for cold chain logistics stereo warehouse. *IEEE Access*, 11, 73850–73862.  
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3295819>
- Hu, W. – Zhang, T. – Deng, X. – Liu, Z. – Tan, J. (2021) Digital twin: A state-of-the-art review of its enabling technologies, applications and challenges. *Journal of Intelligent Manufacturing and Special Equipment*, 2(1), 1–34.  
<https://doi.org/10.1108/JIMSE-12-2020-010>
- Ivanov, D. – Dolgui, A. – Sokolov, B. (2019) *Handbook of ripple effects in the supply chain*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-14302-2>
- Ivanov, D. – Dolgui, A. (2021) A digital supply chain twin for managing the disruption risks and resilience in the era of Industry 4.0. *Production Planning & Control*, 32(9), 775–788. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1768450>
- Ivanov, D. (2024) Conceptualisation of a 7-element digital twin framework in supply chain and operations management. *International Journal of Production Research*, 62(6), 2220–2232. <https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2217291>
- Javaid, M. – Haleem, A. – Suman, R. (2023) Digital twin applications toward industry 4.0: A review. *Cognitive Robotics*, 3, 71–92.  
<https://doi.org/10.1016/j.cogr.2023.04.003>
- Jones, D. – Snider, C. – Nassehi, A. – Yon, J. – Hicks, B. (2020) Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29, 36–52. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>

- Kamble, S. S. – Gunasekaran, A. – Parekh, H. – Mani, V. – Belhadi, A. – Sharma, R. (2022) Digital twin for sustainable manufacturing supply chains: Current trends, future perspectives, and an implementation framework. *Technological Forecasting and Social Change*, 176, 121448. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121448>
- Kritzinger, W. – Karner, M. – Traar, G. – Henjes, J. – Sihn, W. (2018) Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016–1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>
- Lee, D. – Lee, S. (2021) Digital twin for supply chain coordination in modular construction. *Applied Sciences*, 11(13), 5909. <https://doi.org/10.3390/app11135909>
- Leng, J. – Yan, D. – Liu, Q. – Zhang, H. – Zhao, G. – Wei, L. – Zhang, D. – Yu, A. – Chen, X. (2021) Digital twin-driven joint optimisation of packing and storage assignment in large-scale automated high-rise warehouse product-service system. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 34(7–8), 783–800. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2019.1667032>
- Leung, E. K. H. – Lee, C. K. H. – Ouyang, Z. (2022) From traditional warehouses to physical internet hubs: A digital twin-based inbound synchronization framework for PI-order management. *International Journal of Production Economics*, 244, 108353. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108353>
- Liu, M. – Fang, S. – Dong, H. – Xu, C. (2021) Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 346–361. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.017>
- Liu, Y. – Pan, S. – Ballot, E. (2024) Unveiling the potential of digital twins in logistics and supply chain management: Services, capabilities, and research opportunities. *Digital Engineering*, 3, 100025. <https://doi.org/10.1016/j.dte.2024.100025>
- Lummus, R. R. – Krumwiede, D. W. – Vokurka, R. J. (2001) The relationship of logistics to supply chain management: Developing a common industry definition. *Industrial Management & Data Systems*, 101(8), 426–432. <https://doi.org/10.1108/02635570110406730>
- Lv, Z. – Xie, S. (2022) Artificial intelligence in the digital twins: State of the art, challenges, and future research topics. *Digital Twin*. <<https://digitaltwin1.org/articles/1-12>> haettu 26.8.2025

- Madakam, S. (2015) Internet of things: smart things. *International Journal of Future Computer and Communication*, 4(4), 250–253.  
<https://doi.org/10.7763/IJFCC.2015.V4.395>
- Maheshwari, P. – Kamble, S. (2022) The application of supply chain digital twin to measure optimal inventory policy. *IFAC-PapersOnLine*, 55(10), 2324–2329.  
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.055>
- Maheshwari, P. – Kamble, S. – Kumar, S. – Belhadi, A. – Gupta, S. (2024) Digital twin-based warehouse management system: A theoretical toolbox for future research and applications. *The International Journal of Logistics Management*, 35(4), 1073–1106. <https://doi.org/10.1108/IJLM-01-2023-0030>
- Mikalef, P. – Gupta, M. (2021) Artificial intelligence capability: Conceptualization, measurement calibration, and empirical study on its impact on organizational creativity and firm performance. *Information & Management*, 58(3), Article 103434. <https://doi.org/10.1016/j.im.2021.103434>
- Miskinis, C. (2019) The history and creation of the DT concept.  
<<https://www.challenge.org/insights/digital-twin-history/>> haettu 26.8.2025
- Moshood, T. D. – Nawanir, G. – Sorooshian, S. – Okfalisa, O. (2021) Digital twins driven supply chain visibility within logistics: A new paradigm for future logistics. *Applied System Innovation*, 4(2), Article 2.  
<https://doi.org/10.3390/asi4020029>
- Negri, E. – Fumagalli, L. – Macchi, M. (2017) A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems. *Procedia Manufacturing*, 11, 939–948.  
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198>
- Nitsche, B. – Straube, F. (2023) Current state and future of international logistics networks —The role of digitalization and sustainability in a globalized world. *Logistics*, 7(4),83. <https://doi.org/10.3390/logistics7040083>
- Panetta, K. (2016) Gartner’s top 10 strategic technology trends for 2017. Smarter with Gartner. <<https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartners-top-10-technology-trends-2017/>>, haettu 26.8.2025
- Panetta, K. (2017) Gartner’s top 10 strategic technology trends for 2018. Smarter with Gartner. <<https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartners-top-10-technology-trends-2018/>>, haettu 26.8.2025

- Panetta, K. (2018) Gartner's top 10 strategic technology trends for 2019. Smarter with Gartner. <<https://gartner.com/smarterwithgartner/gartners-top-10-technology-trends-2019/>>, haettu 26.8.2025
- 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*, 58, 3–21. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.10.001>
- Rodrigue, J. (2020) *The Geography of transport systems* (5. p.). Routledge, Lontoo. <https://doi.org/10.4324/9780429346323>
- Rosen, R. – Von Wichert, G. – Lo, G. – Bettenhausen, K. D. (2015) About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 567–572. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.141>
- Royo, B. – Politaki, D. – Gonzalez, J. N. – Batalla, A. (2023) Digital twin opportunities and benefits in last-mile logistics for Madrid value case. *Transportation Research Procedia*, 72, 1693–1699. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.642>
- Rushton, A. – Croucher, P. – Baker, P. (2022) *The handbook of logistics and distribution management: Understanding the supply chain* (7. p.). Kogan Page, Lontoo.
- Sakti, S. – Zhang, L. – Thompson, R. G. (2023) Synchronization in synchronomodality. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 179, 103321. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2023.103321>
- Shahat, E. – Hyun, C. T. – Yeom, C. (2021) City digital twin potentials: A review and research agenda. *Sustainability*, 13(6), 3386. <https://doi.org/10.3390/su13063386>
- Sharotry, A. – Jimenez, J. A. – Mediavilla, F. A. M. – Wierschem, D. – Koldenhoven, R. M., – Valles, D. (2022) Manufacturing operator ergonomics: A conceptual digital twin approach to detect biomechanical fatigue. *IEEE Access*, 10, 12774–12791. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3145984>
- Taniguchi, E. – Thompson, R. G. – Qureshi, A. G. (2020) Modelling city logistics using recent innovative technologies. *Transportation Research Procedia*, 46, 3–12. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.157>
- Tao, F. – Zhang, M. – Liu, Y. – Nee, A. Y. C. (2018) Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment. *CIRP Annals*, 67(1), 169–172. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.055>

- Tao, F. – Zhang, H. – Liu, A. – Nee, A. Y. C. (2019). Digital twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2405–2415.  
<https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>
- Tinnes, E. – Perez, F. – Probst, T. (2024) Decarbonizing logistics: Charting the path ahead [artikkeli]. McKinsey & Company 19.6.2024.  
<[https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/decarbonizing-logistics-charting-the-path-ahead#/>](https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/decarbonizing-logistics-charting-the-path-ahead#/) haettu 31.8.2025
- Tozanli, Ö. – Saéenz, M. J. (2022) Unlocking the potential of digital twins in supply chains. MIT SLOAN MANAGEMENT REVIEW, 63(4), 1-4.
- UPS. (2024) UPS takes center stage at Google Cloud next '24 and RFID Journal conferences [video]. 6.10.2024 <<https://about.ups.com/us/en/our-stories/innovation-driven/ups-takes-center-stage-at-google-cloud-next--24-and-rfid-journal.html>> haettu 31.8.2025.
- VanDerHorn, E. – Mahadevan, S. (2021) Digital twin: Generalization, characterization and implementation. *Decision Support Systems*, 145, 113524.  
<https://doi.org/10.1016/j.dss.2021.113524>
- Verboven, P. – Defraeye, T. – Datta, A. K. – Nicolai, B. (2020) Digital twins of food process operations: The next step for food process models? *Current Opinion in Food Science*, 35, 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.03.002>
- Werbińska-Wojciechowska, S. – Giel, R. – Winiarska, K. (2024) Digital twin approach for operation and maintenance of transportation system—Systematic review. *Sensors*, 24(18), 6069. <https://doi.org/10.3390/s24186069>
- Wisner, J. – Tan, K. – Leong, G. (2012) *Principles of supply chain management: A balanced approach* (3. p.) Cengage Learning, Mason.
- Wong, E. Y. C. – Mo, D. Y. – So, S. (2021) Closed-loop digital twin system for air cargo load planning operations. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 34(7–8), 801–813.  
<https://doi.org/10.1080/0951192X.2020.1775299>
- Wu, W. – Shen, L. – Zhao, Z. – Harish, A. R. – Zhong, R. Y. – Huang, G. Q. (2023) Internet of everything and digital twin enabled service platform for cold chain logistics. *Journal of Industrial Information Integration*, 33, 100443.  
<https://doi.org/10.1016/j.jii.2023.100443>

- Xiros, V. – Gonzalez Castro, J. M. – Fernandez-Pelaez, F. – Magoutas, B. – Christidis, K. (2025) Supply chain data analytics for digital twins: A comprehensive framework. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/app15126939>
- Xu, L. – Mak, S. – Schoepf, S. – Ostroumov, M. – Brintrup, A. (2025) Multi-agent digital twinning for collaborative logistics: Framework and implementation. *Journal of Industrial Information Integration*, 45, 100799. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2025.100799>
- Zaidi, S. A. H. – Khan, S. A. – Chaabane, A. (2024) Unlocking the potential of digital twins in supply chains: A systematic review. *Supply Chain Analytics*, 7, 100075-. <https://doi.org/10.1016/j.sca.2024.100075>
- Zhan, X. – Wu, W. – Shen, L. – Liao, W. – Zhao, Z. – Xia, J. (2022) Industrial internet of things and unsupervised deep learning enabled real-time occupational safety monitoring in cold storage warehouse. *Safety Science*, 152, 105766. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105766>
- Zhao, Z. – Shen, L. – Yang, C. – Wu, W. – Zhang, M. – Huang, G. Q. (2021) IoT and digital twin enabled smart tracking for safety management. *Computers & Operations Research*, 128, 105183. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.105183>