



**TURUN  
YLIOPISTO**  
Kauppakorkeakoulu

# **Digitaalisen kaksosen rooli toimitusketjujen riskienhallinnassa**

Toimitusketjujen johtamisen  
kandidaatintutkielma

Laatija:  
Vikke-Matias Kyttänen

Ohjaaja:  
Professori Harri Lorentz

28.04.2024

Turku

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

Kandidutkielma

**Oppiaine:** Toimitusketjujen johtaminen

**Tekijä:** Vikke-Matias Kyttänen

**Otsikko:** Digitaalisen kaksosen rooli toimitusketjujen riskienhallinnassa

**Ohjaaja:** Professori Harri Lorentz

**Sivumäärä:** 31

**Päivämäärä:** 28.04.2024

Tutkielman tarkastellaan digitaalisen kaksosen roolia toimitusketjujen riskienhallinnassa. Digitaalinen kaksonen on virtuaalinen malli fyysisestä toimitusketjusta, joka mahdollistaa toimitusketjun reaaliaikaisen seurannan, simuloinnin ja optimoinnin.

Tutkielman tavoitteena oli selvittää, miten digitaalista kaksosta voidaan hyödyntää toimitusketjujen riskienhallinnassa ja millaisia mahdollisuuksia se tarjoaa nykyisessä liiketoimintaympäristössä.

Tutkielman keskeiset johtopäätökset osoittavat, että digitaalista kaksosta on mahdollista hyödyntää toimitusketjujen riskienhallintaan, kun se sisältää tarvittavat teknologiat ja kyvykkyydet tilanteiden analysointia ja simulointia varten.

**Avainsanat:** Digitaalinen kaksonen, Riskienhallinta, Industry 4.0

# **SISÄLLYS**

<b>1</b>	<b>Johdanto</b>	<b>7</b>
	1.1 Tutkimuksen taustaa	7
	1.2 Tutkimuskysymys ja tutkielman kulku	8
<b>2</b>	<b>Digitaalinen kaksosen</b>	<b>9</b>
	2.1 Digitaalisen kaksosen määritelmiä	9
	2.2 Digitaalinen kaksosen toimitusketjujen hallinnassa	10
<b>3</b>	<b>Toimitusketjujen riskienhallinta</b>	<b>14</b>
	3.1 Toimitusketjuihin kohdistuvat riskit	16
	3.2 Haasteita toimitusketjujen riskienhallintamenetelmissä	18
<b>4</b>	<b>Digitaalisen kaksosen rooli toimitusketjujen riskienhallinnassa</b>	<b>20</b>
<b>5</b>	<b>Yhteenveto ja johtopäätökset</b>	<b>23</b>

## **KUVIOT**

Kuva 1 Digitaalisen kaksosen viitekehys (Ivanov 2024)	10
Kuva 2 Digitaalisen kaksosen mahdollistavat teknologiat (Bhandal ym., 2022)	11
Kuva 3 Riskienluokitus kehys (Hudnukar ym. 2017)	17



# 1 Johdanto

## 1.1 Tutkimuksen taustaa

Digitalisaatio ja siihen liittyvä teknologian kehittyminen on nähty jo pitkään yhtenä merkittävimmistä tekijöistä toimitusketjujen hallinnan tutkimuksessa. Erityisesti Industry 4.0 myötä esille nousseet teknologiat, kuten esineiden internet (engl. Internet of things), pilvipalvelut, big data ja tekoäly ovat kiihdyttäneet toimitusketjujen digitalisaatioastetta merkittävästi (Tjahjono ym. 2017). Digitaalinen kaksosen on digitaalinen malli fyysisestä verkostosta, jonka eri osa-alueita se kuvaa reaaliaikaisesti (Ivanov & Dolgui 2021). Se on ollut konseptitasolla olemassa jo 1960-luvulta asti, kun Nasa hyödynsi yksinkertaista digitaalista kaksosta Apollo-avaruusohjelmassa (Miskins 2019). Kuitenkin digitaalisen kaksosen potentiaali työkaluna toimitusketjujen hallinnassa on noussut vasta viime aikoina Industry 4.0 teknologioiden mukana. Industry 4.0 teknologiat, kuten esineiden internet ovat kehittyneet siihen pisteeseen, että niitä on mahdollista hyödyntää tehokkaasti osana digitaalista kaksosta (Cimino ym. 2019). Teknologisen kehityksen myötä tulleet uudet mahdollisuudet digitaalisen kaksosen käyttöön tekevätkin siitä mielenkiintoisen aiheen.

COVID-19 pandemia aiheutti merkittäviä, hankalasti ennakoitavissa olevia ongelmia globaaleihin toimitusketjuihin. Tiettyjen tuotteiden kuten kasvomaskien ja käsidesin osalta kysyntä nousi merkittävästi ja tuotteiden valmistajat eivät pysyneet vastaamaan äkillisesti nousseeseen kysyntään. Toisaalta taas autonvalmistuksessa kysynnän laskun takia autoalan valmistusprosesseja laitettiin tauolle (Ivanov 2022). COVID-19 jälkeisessä tutkimuksessa onkin esitetty, että digitaalista kaksosta on mahdollista hyödyntää COVID-19 pandemian kaltaisissa hankalasti ennakoitavissa tilanteissa toimitusketjun riskienhallintaan, päätöksentekoon ja kasvattamaan toimitusketjun näkyvyyttä (Ivanov & Dolgui 2021). Toimitusketjujen riskienhallinnan tutkimisen kannalta COVID-19 pandemian jälkeen on ilmestynyt merkittävästi mielenkiintoista uutta tutkimusta. Lisäksi aiheen ajankohtaisuus ja pandemian aiheuttamien toimitusketjuhäiriöiden kokeminen omakohtaisesti antaa kiinnostavan kulman tutkielmaa varten.

## 1.2 Tutkimuskysymys ja tutkielman kulku

Tutkielman tutkimuskysymyksenä on ”Mikä on digitaalisen kaksosen rooli toimitusketjujen riskienhallinnassa?”. Tutkielman toisessa luvussa perehdytään digitaalisen kaksosen määritelmään ja tutkitaan digitaalisen kaksosen osa-alueita Ivanovin määrittelemän viitekehyksen kautta. Kolmannessa luvussa tutkitaan mitä riskejä toimitusketjuihin kohdistuu ja mitä puutteita nykyisissä riskienhallintamenetelmissä on. Luvussa neljä tarkastellaan digitaalisen kaksosen ominaisuuksien, nykyisten riskienhallintamenetelmien puutteiden ja lähdemateriaalin pohjalta minkälainen rooli digitaalisella kaksosella voi olla toimitusketjujen riskienhallinnassa. Tutkielman viimeisessä luvussa esitetään tiivistelmä ja johtopäätökset sekä pohditaan vastausta tutkimuskysymykseen.



## 2 Digitaalinen kaksosen

### 2.1 Digitaalisen kaksosen määritelmiä

Digitaalisen kaksosen määritelmä ei ole yksiselitteinen ja kirjallisuudessa sille onkin käytetty useita erilaisia määritelmiä (Singh ym. 2021). Nasan määritelmä digitaalisesta kaksosesta kuvaa sitä yhdistetyksi monifysikaaliseksi, moniasteiseksi ja todelliseksi simulaatioksi kulkuvälineestä tai järjestelmästä, joka käyttää parhaita käytössä olevia fyysisiä malleja ja teknologiaa kuvatakseen sen fyysistä kaksosta (Shafto ym. 2010). Ilma-alusten kontekstissa digitaalinen kaksosen on myös kuvattu ultra-realistiseksi, alusta loppuun tietokonemalliksi lentokoneen rakenteesta, jota käytetään arvioimaan lentokoneen kyky täyttää tehtävän vaatimukset (Gockel ym. 2012). J. Lee ym. (2013) tutkimuksessaan määrittelevät digitaalisen kaksosen malliksi oikeasta koneesta, joka toimii pilvipalvelussa ja simuloi sen tilaa analyttisistä algoritmeista ja muista tiedonlähteistä saadun datan avulla.

Digitaalista kaksosta on myös kuvattu todella realistiseksi malliksi prosessin nykytilasta ja sen vuorovaikutuksesta suhteessa ympäristöön ja reaali maailmaan (Rosen ym. 2015), sekä digitaalinen kaksosen on virtuaalinen kuvaus reaali maailman kohteesta (engl. subject) (ihminen, tietokoneohjelma) tai reaali maailman objektista (kone, komponentti). Digitaalinen kaksosen sisältää dataa, toiminallisuuden ja rajapinnat kommunikointiin (Schluse & Rossman 2016). Lisäksi digitaalinen kaksosen on myös määritelty virtuaaliseksi kuvaukseksi oikeasta tuotteesta, joka sisältää tuotteen informaation koko tuotteen elinkaaren aikana (Schroeder ym. 2016)

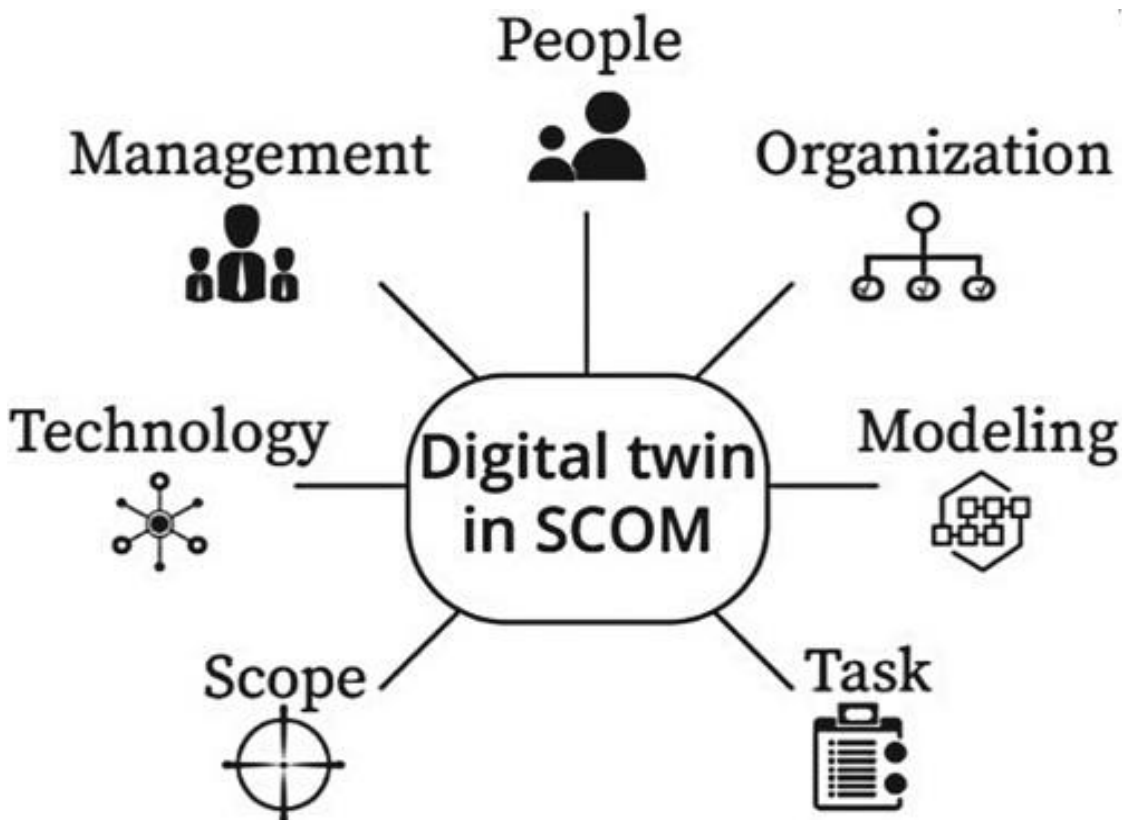
Vertaillessa digitaalisen kaksosen määritelmiä toisiinsa on niistä helppo huomata useita samankaltaisuuksia. Kaikissa määritelmässä yhteistä on se, että digitaalinen kaksosen perustuu johonkin oikeaan käytössä olevaan prosessiin ja asiaan, jonka realistinen kuvaus se on. Useimmissa määritelmässä digitaalisen kaksosen kuvataan prosessin tai asian mallinnuksen lisäksi saavan reaali maailman kaksosestaan dataa erilaisten datalähteiden kautta. Kuitenkin määritelmistä huomaa myös selviä eroja (Shafto ym. 2010) ja (Gockel ym. 2012) molemmat tutkimukset keskittyvät ilma-alusten digitaaliseen kaksoseen, joten määritelmät on rajattu koskemaan kulkuvälineen ja lentokoneen digitaalisia kaksosia. Määritelmät, kuten (Schluse & Rossman 2016) ja (J.

Lee ym. 2013) sisältävät hieman laajemman kuvauksen siitä, miten ja mistä lähteistä digitaalisen kaksosen data tulee.

## 2.2 Digitaalinen kaksosen toimitusketjujen hallinnassa

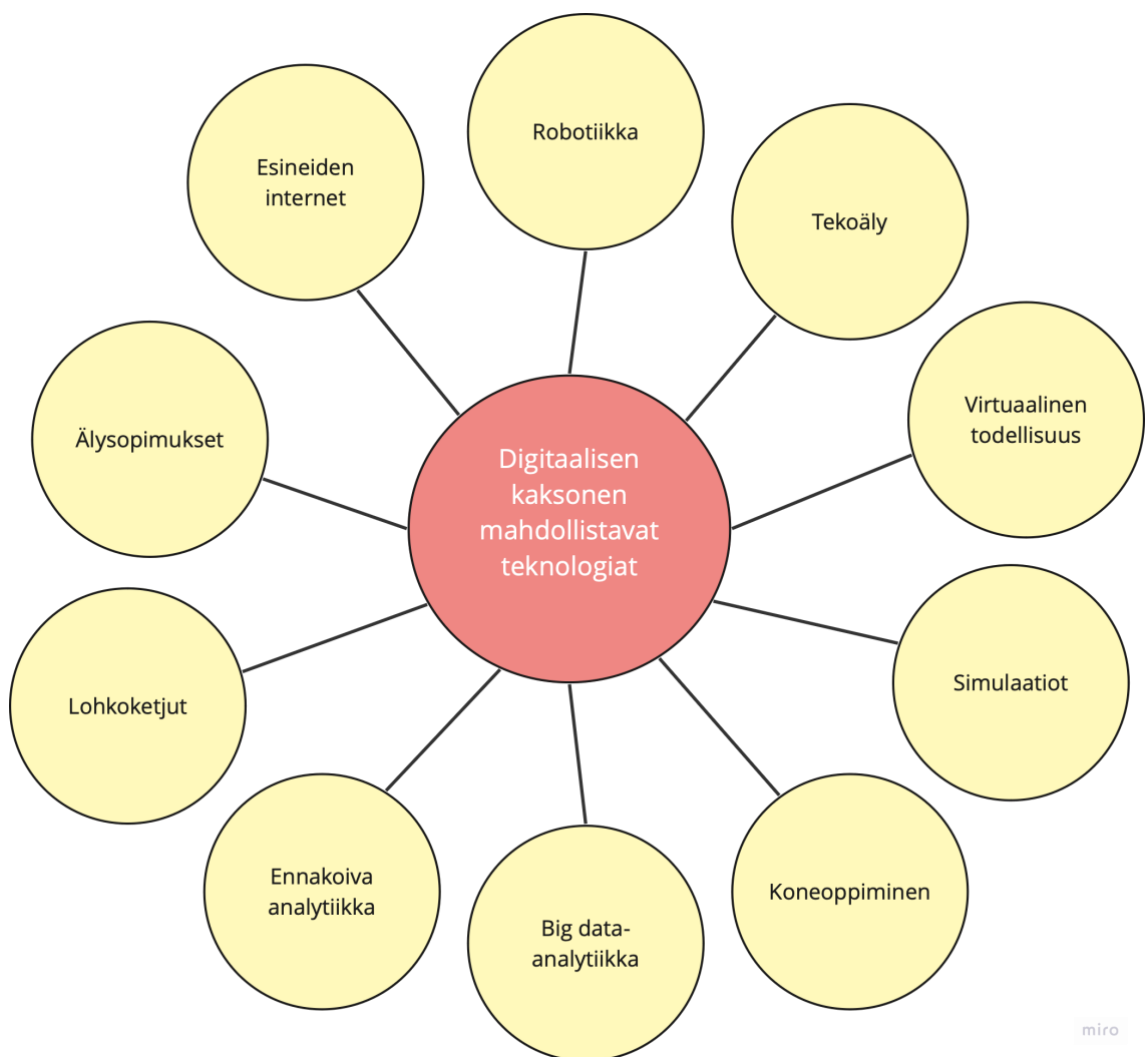
Edellä mainitut määritelmät on koostettu useamman eri alan digitaalisen kaksosen tutkimuksesta. Toimitusketjujen hallintaan keskittyvässä tutkimuksessa digitaalisen kaksosen määritelmälle on tunnistettu pääasiassa kaksi erilaista suuntausta (Negri ym. 2017). Ensimmäinen suuntaus määrittelee digitaalisen kaksosen olevan ainoastaan simulaatio fyysisestä hyödykkeestä. Toisessa suuntauksessa digitaalisen kaksosen nähdään simulaation lisäksi sisältävän myös kyvykkyyttä suorittaa erilaisia analyyseja ja tuottaa dataa päätöksentekoa varten tai sen tueksi (Dietz & Pernul 2020)

Ivanov (2024) on tutkimuksessaan muodostanut digitaaliselle kaksoselle 7-osaisen viitekehyksen kolmen aiemmin kirjallisuudessa esitellyn viitekehyksen pohjalta. Ivanovin viitekehyksen osa-alueita ovat teknologia, laajuus (engl. scope), tehtävä (engl. task/process), mallintaminen (engl. modeling), järjestäytyminen (organisation), ihmiset ja hallinta (engl. management)



Kuva 1 Digitaalisen kaksosen viitekehys (Ivanov 2024)

Digitaalisen kaksosen hyödyntämä teknologia ja teknologian avulla saatava data ovat keskeisiä tekijöitä, jotka mahdollistavat digitaalisen kaksosen hyödyntämisen toimitusketjujen hallintaan (Bhandal ym. 2022). Digitaalisen kaksosen käyttämän teknologian merkittävyys sen hyödyntämiseen toimitusketjujen hallinnassa lähtee sen toiminnan peruseriaatteista, jotka ovat kyvykkyys simulointiin, optimointiin ja data-analytiikkaan. Peruseriaatteen mahdollistavat sen, että digitaalista kaksosta voidaan hyödyntää erilaisissa päätöksentekotilanteissa, optimointimalleissa ja riskianalyysseissa (Barykin ym. 2020.).



Kuva 2 Digitaalisen kaksosen mahdollistavat teknologiat (Bhandal ym., 2022)

Yllä olevan kuvion digitaalisen kaksosen mahdollistavista teknologioista merkittävä osa on kehittynyt Industry 4.0:n mukana (Bhandal ym. 2022). Usein digitaalisessa kaksosessa hyödynnetään useita edellä mainittuja teknologioita ketjuna. Digitaalinen

kaksonen voi esimerkiksi tunnistaa esineiden internet -sensoreiden tai muun saatavilla olevan tiedon kautta melkein reaaliaikaisesti häiriöistä, jotka saattavat haitata toimitusketjua. Häiriötieto voidaan siirtää simulaatiomalliin, jonka avulla on mahdollista simuloida minkälaista haittaa toimitusketjulle voi syntyä. Sen lisäksi digitaalinen kaksonen voi käyttää koneoppimisen malleja oppiakseen mitkä häiriötiedot ovat relevantteja (Cavalcante ym. 2019).

Digitaalisen kaksosen laajuudella tarkoitetaan sitä, miten laajaa tai monimutkaista kokonaisuutta digitaalisen kaksosen avulla yritetään mallintaa. Ivanov on viitekehysessään jakanut digitaalisen kaksosen laajuuden viiteen eri luokkaan, jotka ovat järjestyksessä pienimmästä suurimpaan: tuote, prosessi, yritys, toimitusketjuverkosto ja toimitusketjuverkostojen verkosto (engl. Network of networks) (Ivanov 2024)

Digitaalisen kaksosen hyödyntämisessä laajuudella on merkitystä, koska tyypillisesti mitä laajempaa kokonaisuutta digitaalinen kaksonen kuvaa sitä monimutkaisempi se on. Yksittäisen tuotteen tasolla ei aina tarvita monimutkaisia simulaatiomalleja tai kehittyneitä algoritmeja, mutta mallinnettaessa esimerkiksi kokonaista toimitusketjua on kehittyneemmästä teknologiasta hyötyä. Laajuudella on vaikutusta myös toimitusketjun organisaatio- ja johtamisrakenteiden monimutkaisuuteen (Ivanov 2024.).

Digitaalisen kaksosen tehtävällä tai prosessilla tarkoitetaan digitaalisen kaksosen käyttötarkoitusta eli sitä mikä tehtävä digitaalisen kaksosen avulla halutaan suorittaa. Toimitusketjujen hallinnassa digitaaliselle kaksoselle on tunnistettu käyttökohteita esimerkiksi sen hyödyntämiseen toimitusketjun resilienssin ja riskienhallinnan parantamisessa (Ivanov & Dolgui 2021), älykkääseen valmistukseen (Chen ym. 2020) ja logistiikassa (Coelho ym. 2021)

Ivanov (2024) on viitekehysessään nostanut simuloinnin ja optimoinnin muun digitaalisen kaksosen teknologian yläpuolelle. Osassa kirjallisuudesta, kuten (Bhandal ym. 2022) simulointi on kuitenkin myös nähty vain yhtenä teknologiana muiden joukossa mahdollistamassa digitaalisen kaksosen hyödyntäminen toimitusketjun hallintaan.

Kyvykkyys simulointiin ja optimointiin on kuitenkin yksi digitaalisen kaksosen tärkeimmistä ominaisuuksista, koska niiden avulla digitaalista kaksosta on mahdollista

käyttää päätöksenteon tukena ja hyödyntämään useissa muissakin eri käyttötarkoituksessa. Tyypillisesti digitaalinen kaksosen tukee kaikkia kolmea data-analytiikan tyyppiä: kuvaavaa (nykyisen suorituskyvyn visualisointi), ennakoivaa (haitan tai häiriön ennakointi) ja ohjaavaa (optimointi ja häiriöstä palautuminen) (Ivanov 2024.).

Järjestäytymisellä tarkoitetaan digitaalisen kaksosen avulla kuvattavia nykyisiä organisaatorakenteita ja digitaalisen kaksosen mahdollistamia uusia liiketoiminta- ja toimintamalleja (Ivanov 2024). Digitaalisen kaksosen mahdollistamia uusia liiketoiminta- ja operaatiotamalleja ovat esimerkiksi toimitusketjujen uudelleenjärjestely ja kartoitus digitaalisen kaksosen avulla (MacCarthy ym. 2022) tai liiketoimintamalli, jossa palveluntarjoaja voi tarjota digitaalista kaksosta asiakkaiden käyttöön toimitusketjujen kartoittamisessa ja suunnittelussa pilvipalveluna (Ivanov ym. 2022).

Ihmisten rooli digitaalisessa kaksosessa tulee siitä, miten digitaalinen kaksosen ja käyttäjän välinen kommunikaatio toimii ja digitaalinen kaksosen vaikutuksesta ihmisten päätöksenteon prosesseihin toimitusketjujen hallinnassa (Ivanov 2024). Digitaalisella kaksosella voi olla rooli toimitusketjujen hallinnan päätöksentekijöiden kumppanina, joka tarjoaa päätöksentekijöille reaaliaikaista informaatiota, mahdollisuutta simuloida erilaisia tilanteita ja vaihtoehtoja, miten toimitusketjujen häiriötilanteet on mahdollista hoitaa. Edistyneen digitaalisen kaksosen on myös mahdollista antaa tehdä itsenäisiä päätöksiä esimerkiksi digitaalisen kaksosen hyödyntämän tekoälyn tai koneoppimisen avulla (Ivanov 2024.).

Digitaalisella kaksosen avulla on myös mahdollista kehittää ja tarkastella toimitusketjujen hallintaominaisuuksia. Digitaalisen kaksosen avulla voi saada tietoa toimitusketjun näkyvyydestä, yhteistyöstä ja jäljitettävyydestä. Näitä ominaisuuksia voi hyödyntää nykyisten hallintamenetelmien tarkastelussa ja uusien hallintamenetelmien kehittämisessä laaja-alaisesti (Ivanov 2024.).

### 3 Toimitusketjujen riskienhallinta

Toimitusketjujen riskienhallinta on kokonaisuutena laaja, mutta kuitenkin kirjallisuudessa esitetyt määritelmät sille mitä toimitusketjujen riskienhallinta on eivät merkittävästi eroa toisistaan. Jüttner ym. (2003) määrittivät toimitusketjujen riskienhallinnan olevan toimitusketjun riskien tunnistamista ja hallintaa toimitusketjun osapuolten järjestelmällisen lähestymisen kautta, vähentäen toimitusketjun haavoittavuutta. Tang (2006) luonnehtii toimitusketjujen riskienhallinnan olevan toimitusketjun riskien hallitsemista hyödyntämällä koordinaatiota ja yhteistyötä toimitusketjun kumppaneiden välillä, varmistaen toimitusketjun kannattavuuden ja jatkuvuuden.

Norrman & Jansson (2004) näkevät toimitusketjun riskienhallinnan olevan resursseihin tai toimintoihin liittyvän logistiikan aiheuttamien tai niihin vaikuttavien riskien ja epävarmuuksien selvittämistä yhteistyöllä kumppaneiden kanssa hyödyntäen riskienhallinnan prosessointityökaluja. Edellä mainituissa määritelmissä on tunnistettavissa useita yhtäläisyyksiä. Riskien tunnistaminen ja hallinta ovat kaikissa määritelmissä keskiössä, mutta myös yhteistyö toimitusketjun kumppaneiden ja eri osapuolten välillä on osana kaikkia määritelmiä. Eroja määritelmien kesken tulee ainakin riskienhallinnan lopullisen tarkoituksen osalta, eli siitä mitä lisäarvoa toimitusketjulle riskienhallinnalla tavoitellaan.

Toimitusketjun riskienhallinnan prosessit voidaan jakaa neljään eri osa-alueeseen: riskien tunnistamiseen (engl. risk assesment), riskien arviointiin (engl. risk evaluation), riskin lieventämiseen (engl. risk mitigation) ja riskien seurantaan (engl. risk monitoring) Tyypillisesti toimitusketjun riskienhallinnan prosessi lähtee toimitusketjuun kohdistuvien riskien tunnistamisesta. Riskien tunnistamisella tarkoitetaan toimitusketjun riskityyppien ja riskitekijöiden tunnistamista (Ho ym. 2015.). Toimitusketjuun kohdistuvien riskien tunnistamiseen on kirjallisuudessa esitetty useita vaihtoehtoja. Kayis & Dana Karningsih (2012) esittivät tutkimuksessaan toimitusketjuun kohdistuvien riskien tunnistamiseen päätöksentekoa avustavan tietämyksenhallinta työkalun, joka tukeutuu ohjelmaan syötettyihin tietoihin sadoista eri toimitusketjuriskien osatekijöistä, riskitekijöistä ja riskitapahtumista.

Gaudenzi & Borghesi (2006) hyödynsivät toimitusketjuun kohdistuvien riskien tunnistamiseen AHP-menetelmää, jossa riskien tunnistamista varten kerättiin yrityksen työntekijöiltä tieto toimitusketjun toiminnan osalta tärkeimmistä osa-alueista eli niistä alueista, joissa mahdollinen häiriötilanne aiheuttaisi eniten vahinkoa toimitusketjulle, sen lisäksi työntekijöiltä kysyttiin heidän näkemystään minkälaisia riskityyppejä yrityksen toimitusketjuun voi kohdistua. Tietojen avulla luotiin malli, jolla oli mahdollista kokonaisvaltaisesti arvioida yrityksen toimitusketjuihin kohdistuvia riskitekijöitä ja priorisoida riskienhallinnan tavoitteita niihin toimitusketjun osiin, jossa häiriöt aiheuttavat eniten vahinkoa toimitusketjun toiminnalle. Myös digitaalista kaksosta on mahdollista hyödyntää toimitusketjuun kohdistuvien riskien tunnistamiseen. Digitaalisen kaksosen hyödyntämisen reaaliaikaisen datan avulla on mahdollista tunnistaa potentiaalisia toimitusketjuun kohdistuvia keskeytysriskejä jo ennen niiden realisoitumista (Ivanov & Dolgui 2021.).

Ho ym. (2015) määrittelevät riskien arvioimisen koostuvan riskin realisoitumisen todennäköisyyden arvioinnista ja siitä minkälaisia seurauksia riskin realisoitumisesta toimitusketjulle voi olla. Kirjallisuuskatsauksessa he ovat jakaneet riskien arvioinnin ensin mikro- ja makrotasolle ja siitä eteenpäin useisiin eri mikrotason alaluokkiin sen mukaan mitä toimitusketjun osaa on tarkasteltu riskien arvioinnin kautta. Mikrotason alaluokat koostuvat kysynnän riskin arvioimisesta, valmistuksen riskin arvioimisesta, tarjonnan riskin arvioimisesta, taloudellisen riskin arvioimisesta ja informaatoriskin arvioimisesta. Riskien arviointi on osaltaan laaja kokonaisuus ja kirjallisuutta menetelmistä ja työkaluista, joilla toimitusketjuun kohdistuvia riskejä voi arvioida on merkittävästi (Ho ym. 2015.). Esimerkkejä riskien arvioinnin työkaluista ja menetelmistä ovat ainakin aikaisemmin mainittu AHP -menetelmä (Gaudenzi & Borghesi 2006), keskiarvovarianssimalli (engl. Mean – Variance approach) (Choudhary ym. 2023) ja digitaalinen kaksonen (Ivanov & Dolgui 2021).

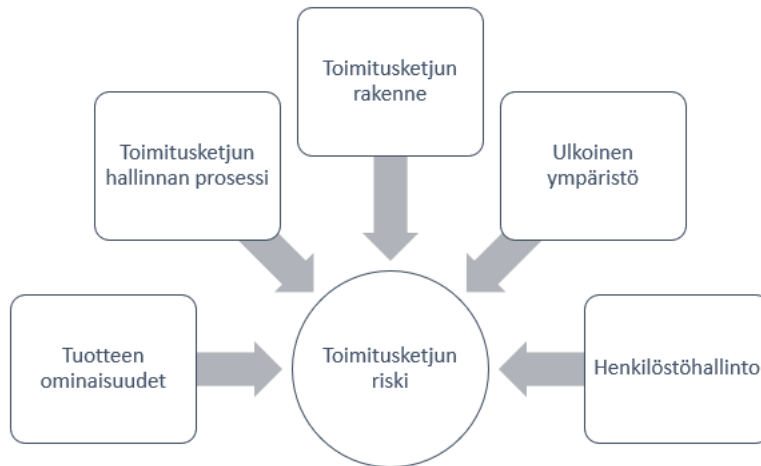
Riskin vähentämisellä tarkoitetaan varautumista erilaisia riskejä vastaan ja valmistautumista niiden realisoitumiseen. Riskien vähentämisen suunnittelulla pystytään minimoimaan riskin realisoitumisesta yritykselle ja toimitusketjulle aiheutuvat ongelmat. Riskien vähentäminen on kirjallisuuskatsauksessa myös ensin jaettu mikro- ja makrotasolle ja sitten makrotason alaluokkiin. Riskien vähentämisen mikrotason alaluokkiin kuuluvat kysynnän riskin vähentäminen, valmistuksen riskin vähentäminen, toimitusriskin vähentäminen, kuljetusriskin vähentäminen, taloudellisen

riskin vähentäminen ja informaatoriskin vähentäminen (Ho ym. 2015.). Riskien vähentämiseen liittyvää tutkimusta on tehty myös runsaasti. Erilaisia työkaluja ja menetelmiä toimitusketjun riskien vähentämiseksi ovat esimerkiksi sumean monikriteerimallin hyödyntämistä tilausten jakamisprosessin organisointiin eri toimittajien kesken vähentäen toimitusriskiä (Haleh & Hamidi 2011), likimääräisen dynaamisen ohjelmoinnin algoritmin (engl. Approximate dynamic programming algorithm) hyödyntämistä mittaamaan kahden vaihtoehdoisen hankintastragian suorituskykyä ja vähentämään hankintariskiä (Fang ym. 2013) ja yrityksen eri funktioiden käytössä olevan tietomäärän lisääminen monialaisen integraation kautta, lisäämään parempaa kokonaiskuvaa toimitusketjun tilasta (Munir ym. 2020). Riskien seuraamisella tarkoitetaan toimitusketjun tietyn osa-alueen tarkempaa tarkkailua potentiaalisten riskien varalta, tyypillisesti riskien seuraaminen on tarpeellista tiettyjen erityisriskien tunnistamista varten. Riskien seuraamista on kirjallisuudessa käsitelty huomattavasti vähemmän kuin muita toimitusketjun riskienhallinnan prosesseja (Ho ym. 2015.). Tsang ym. (2018) ovat tutkineet esineiden internet teknologiaan perustuvaa riskienvalvontajärjestelmää kylmäketjun tuotteiden laatu- ja työturvallisuusriskien hallintaa varten ja parantamaan toimitusketjun tuotteiden turvallisuutta.

### **3.1 Toimitusketjuihin kohdistuvat riskit**

Toimitusketjuihin kohdistuvilla riskeillä tarkoitetaan hankalasti ennustettavissa olevia tai ennustamattomia riskejä, jotka liittyvät toimitusketjun ympäristöön, organisaatorakenteeseen tai toimitusketjuun itsessään, jotka vaikuttavat toimitusketjun tilaan tai suoriutumiseen (Jüttner ym. 2003.). Hudnurkar ym. (2017) ovat tutkimuksessaan määritelleet toimitusketjuihin kohdistuvien riskien luokitteluun riskiluokituskehysten, jossa he ovat jakaneet toimitusketjuihin kohdistuvat riskit viiteen eri yläkategoriaan.





Kuva 3 Riskienluokitus kehys (Hudnurkar ym. 2017)

Riskienluokituskehyksessä riskikategoriat koostuvat tuotteen ominaisuuksista, toimitusketjun hallinnan prosessista, toimitusketjun rakenteesta, ulkoisesta ympäristöstä ja henkilöstöhallinnosta. Merkittävä osa toimitusketjun kohtaamista riskeistä nousee toimitusketjun sisältä. Tämä on otettu huomioon myös riskienluokituskehyksessä, jossa ulkoinen ympäristö on ainoa toimitusketjun ulkopuolisia riskejä kuvaava kategoria. (Hudnurkar ym. 2017.).

Riskienluokituskehyksestä puuttuvat määritelmät siitä, mitä eri kategoriat tarkoittavat. Muodostin eri kategorioita kuvaavat määrittelyt sen perusteella, minkälaisia riskejä kategorioiden sisälle oli koottu. Riskeillä, jotka perustuvat tuotteen ominaisuuksiin tarkoitetaan riskienluokituskehyksessä yrityksen tuotteen ominaisuuksien, vahingoittumisen ja sen raaka-aineiden aiheuttamia riskejä toimitusketjulle. Tällaisia riskejä voivat olla esimerkiksi tuotteeseen tarvittavien raaka-aineiden saatavuusongelmat, tuotteen heikko laatu tai tuotteiden katoaminen kuljetuksen aikana (Hudnurkar ym. 2017.). Toimitusketjun hallinnan prosessien riskeillä tarkoitetaan riskitekijöitä, jotka liittyvät suoraan tuotteen tai palvelun toimitusketjuun. Toimitusketjun hallinnan prosessien riskit koostuvat hankintariskeistä, tuotteen valmistamiseen liittyvistä riskeistä, tuotteen kuljetukseen liittyvistä riskeistä, tuotteen palauttamiseen liittyvistä riskeistä ja tuotteen suunnitteluprosessiin liittyvistä riskeistä. Yksittäisiä toimitusketjun hallinnan prosessien riskitekijöitä ovat esimerkiksi toimittajien ulkoistuksesta syntyvät riskit toimittajien luotettavuuden, kuljetuksien ja maariskin osalta, tuotantovaje kapasiteettiongelmiensa takia ja puutteet toimitettujen tuotteiden määrässä, laadussa tai toimitusajassa (Hudnurkar ym. 2017.).

Toimitusketjun rakenteella tarkoitetaan toimitusketjun tukitoimintoja, jotka mahdollistavat toimitusketjun toiminnan, mutta jotka eivät ole suoraan yhteydessä tavaran tai palvelun kulkemiseen toimitusketjun läpi. Toimitusketjun rakenne on jaettu vielä neljään eri alakategoriaan, jotka koostuvat valmistusolosuhteista, kuljetuksesta, tietojärjestelmistä ja taloudellisista tekijöistä. Riskejä, joiden lähde on toimitusketjun rakenne ovat esimerkiksi tietoliikenneverkkojen vikaantuminen, hankalasti ennustettavat markkinahintojen muutokset ja häiriö kuljetusverkostoissa. Ulkoisen ympäristön aiheuttamilla riskeillä tarkoitetaan riskitekijöitä, joiden lähteenä on toimitusketjun ulkoiset tekijät kuten makroympäristö tai erilaiset katastrofitilanteet, kuten pandemiat, luonnonilmiöt tai erilaiset ihmisten tekemät rikokset tai muodostamat turvallisuusuhat. Ulkoisista tekijöistä muodostuvia riskejä toimitusketjulle ovat esimerkiksi toimitusketjun häiriintyminen terroristi-iskun seurauksesta, toimitusketjun häiriintyminen luonnonilmiöiden aiheuttamien tuhojen vuoksi ja toimitusketjujen häiriintyminen poliittisen epävakauden takia (Hudnurkar ym. 2017.).

Henkilöstönhallinnolla toimitusketjuun kohdistuvien riskien lähteenä tarkoitetaan työntekijöistä ja työolosuhteista aiheutuvia riskejä toimitusketjulle. Niitä ovat esimerkiksi työntekijöiden osaamattomuuden takia syntyvät riskit toimitusketjulle, riskit työntekijöiden laillisten oikeuksien rikkomisesta ja organisaation käytännöistä ja prosesseista syntyvät riskit (Hudnurkar ym. 2017.).

### **3.2 Haasteita toimitusketjujen riskienhallintamenetelmissä**

Vuonna 2020 alkaneen COVID-19 pandemian seurauksena globaaleihin toimitusketjuihin kohdistui merkittäviä ja pitkäaikaisia haittoja. COVID-19 aikana huomattiin, että useiden eri toimialojen globaalien toimitusketjujen reagointinopeus ja palautumiskyvykkyudet eivät olleet tarpeeksi korkealla tasolla. COVID-19 oli myös globaalien toimitusketjujen kannalta hankala, koska se oli hyvin ennakoimaton ja nopeasti muuttuva tilanne (Ivanov & Dolgui 2022.). Erityisesti nopeasti muuttuvissa pandemian kaltaisissa tilanteissa tarvitaan kyvykkyyttä simuloida toimitusketjun toimintaa, jotta toimitusketjun riskejä ja keskeytyksiä olisi mahdollista tunnistaa ennakkoon. Nämä kyvykkyudet eivät ole vielä tällä hetkellä toimitusketjujen riskienhallintamenetelmissä tyypillisiä ominaisuuksia, joten nopeasti muuttuvat tilanteet luovat haasteita toimitusketjun (Ivanov & Dolgui 2022.).

Digitalisaatio on yksi merkittävimmistä trendeistä toimitusketjujen hallinnan tutkimuksessa. Digitaalinen toimitusketju tarjoaa merkittäviä mahdollisuuksia yrityksille esimerkiksi toimitusketjun tehokkaamman järjestelyn ja tiedonsaannin osalta, varsinkin silloin kun tietoa jaetaan eri toimitusketjun eri osapuolten kanssa. Lisäksi digitalisaatio tarjoaa useita eri mahdollisuuksia toimitusketjujen riskienhallintaan esimerkiksi ennakoivan analytiikan, päätöksenteko ominaisuuksien ja paremman näkyvyyden ansiosta. Kuitenkin yrityksissä on vielä haasteita siirtymisessä kohti digitaalista toimitusketjua. Useat yritykset ovat vastahakoisia jakamaan toimitusketjuun liittyvää tietoa kumppaneidensa kanssa. Tämä johtaa siihen, että yritykset eivät pääse hyödyntämään digitalisaation tuomia mahdollisuuksia täysimääräisesti. Haasteita on myös informaation liikkumisessa yrityksen sisäisten tietojärjestelmien välillä, joka aiheuttaa haasteita esimerkiksi digitaalisten välineiden hyödyntämisestä riskienhallintaan (Preindl ym. 2020).

## 4 Digitaalisen kaksosen rooli toimitusketjujen riskienhallinnassa

Bhandal ym. (2022) kokoamassa kirjallisuuskatsauksessa digitaalisen kaksosen käyttötarkoituksista toimitusketjujen hallinnassa riskienhallinnan tutkimuksen osuus oli kaikista pienin. Merkittävä osa digitaalisen kaksosen riskienhallinnan ominaisuuksiin keskittyvistä tutkimuksista perustuu COVID-19 pandemian aiheuttamiin toimitusketjujen häiriöriskeihin ja siihen miten tulevaisuudessa toimitusketjut pystyvät palautumaan paremmin kohdatessaan merkittäviä häiriöitä.

Digitaalisen kaksosen mahdollistaa sen hyödyntämä teknologia. Digitaalisen kaksosen riskienhallintaan keskittyvässä tutkimuksessa digitaalisella kaksosella tarkoitetaan edistynyttä ja useita eri Industry 4.0 teknologioita hyödyntävää toimitusketjun hallinnan työkalua (Ivanov & Dolgui 2019.). Yksi tärkeimmistä teknologioista on digitaalisen kaksosen hyödyntämät tiedonlähteet ja edistyneen digitaalisen kaksosen saama data onkin hyvin keskeisessä osassa sen toimintaa (Bhandal ym. 2022). Edistynyt digitaalinen kaksosen hyödyntää toimintaansa reaaliaikaisesti tietoa, jota se saa fyysiseltä vastinpariltaan esineiden internet sensoreiden, seuranta- ja jäljitysjärjestelmien (engl. track and trace systems) ja RFID:in kautta (Ivanov & Dolgui 2021)

Edistynyt digitaalinen kaksosen voi hyödyntää datanlähteenään myös verkossa olevia riskitietokantoja ja muita julkisia tietoja. Jotta dataa pystytään hyödyntämään mahdollisimman tehokkaasti edistynyt, digitaalinen kaksosen tarvitsee myös erilaisia simulointi- ja optimointimalleja. Simulointi- ja optimointimallit hyödyntävät digitaalisen kaksosen dataa ja pystyvät luomaan ihmisen käyttöön erilaisia skenaariomalleja, joita pystytään hyödyntämään päätöksentekoon (Ivanov & Dolgui 2021.). Edistynyt digitaalinen kaksosen voi myös sisältää päätöksentekoa avustavia teknologioita, kuten erilaisia vaihtoehtoja häiriötilanteen hoitamiseen. Digitaaliselle kaksoselle on myös mahdollista ulkoistaa päätöksentekoa ja antaa sen tehdä kokonaan itsenäisiä päätöksiä esimerkiksi tekoälyä ja koneoppimista hyödyntämällä (Ivanov 2024.). Digitaalisen kaksosen hyödyntäminen toimitusketjujen riskienhallintaan vaatii siis merkittävästi edistyneitä teknologiaratkaisuja ja erityisesti tiedonsaannin reaaliaikaisuutta. Kuitenkin viime vuosina tapahtuneet edistykset Industry 4.0

teknologioiden kehityksessä tekevät digitaalisen kaksosen hyödyntämisestä riskienhallintaan mahdollisen teknologian osalta (Cimino ym. 2019.).

Tutkimusta digitaalisen kaksosen hyödyntämisestä toimitusketjun riskienhallintaan on tehty sekä laajemmasta näkökulmasta ja keskittyen enemmän tiettyyn osa-alueeseen. D. Lee & Lee (2021) tutkivat mahdollisuuksia hyödyntää digitaalista kaksosta logistiikkaprosessissa vähentämään aikataulupoikkeamia moduulirakentamisessa. Aikataulupoikkeamat ovat moduulirakentamisessa kriittinen riskitekijä. Moduulirakentamiseen liittyviä riskejä on tyypillisesti hankala tunnistaa, koska valmistajien on hankala arvioida kuljetuksiin liittyviä riskejä ja kuljetusliikkeellä on usein haasteita saada etukäteen tietoa kuljettamiensa moduulien koosta. Tutkimuksessa käytettiin digitaalista kaksosta, joka sai tietoa kuljetuksen tilasta ja sijainnista esineiden internet antureiden ja paikkatietojärjestelmän kautta.

Tutkimuksessa hyödynnettiin digitaalisen kaksosen simulaatiokyvykkyyttä ennustamaan erilaisia logistiikkaprosessiin liittyviä kuljetusriskejä ja laskemaan kuljetuksen arvioidun saapumisajan skenaarioanalyysin avulla. Digitaalisen kaksosen etuna tässä riskienhallintatilanteessa oli myös se, että digitaalisen kaksosen avulla eri toimitusketjun osapuolille kuuluvat työvaiheet voidaan integroida keskenään samaan malliin ja koko toimitusketjua on mahdollista simuloida tehokkaasti. Tutkimuksessa selvisi, että digitaalinen kaksosen pystyi ennustamaan suunniteltuihin reitteihin liittyviä riskejä ja tunnistamaan parempia vaihtoehtoisia reittejä. Kun digitaalisen kaksosen avulla suunniteltuja reittejä hyödynnettiin, pieneni myös kuljetuksiin liittyvä joutokäyntiaika ja toimituksen saapumisaika oli paremmin ennustettavissa. Digitaalisen kaksosen avulla koordinoitulla logistiikan toimitusketjulla on siis mahdollista vähentää logistiikkariskejä (D. Lee & Lee 2021.).

Ivanov & Dolgui (2021) tutkivat digitaalisen kaksosen roolia toimitusketjujen häiriöriskin hallintaan. Tutkimuksessa digitaalinen kaksosen, jota voidaan hyödyntää toimitusketjun häiriöriskin hallintaan esitetään neljän pääpiirteen kautta. Ensimmäisessä pääpiirteessä määritellään erilaiset toimitusketjun häiriötilanteet, jotka koostuvat häiriötä edeltävästä vaiheesta (varautuminen, häiriötilanteesta (reagointi) ja häiriön jälkeisistä vaiheista (toipuminen ja vakauttaminen). Häiriötä edeltävässä vaiheessa digitaalista kaksosta voidaan hyödyntää esimerkiksi arvioimaan toimittajariskiä tai erilaisien toimitusketjumallien testaamiseen. Häiriötilanteessa digitaalista kaksosta on

mahdollista hyödyntää häiriötilanteiden havaitsemiseen ja erilaisten reagointimallien simulointiin. Häiriön jälkeisessä vaiheessa digitaalinen kaksonen voi arvioida häiriötilanteen pitkänajan vaikutusta toimitusketjuun ja parantamaan toimitusketjun rakennetta tulevia häiriötilanteiden varalta (Ivanov & Dolgui 2021.).

Toisena pääpiirteenä on tietolähteiden integrointi digitaaliseen kaksoseen. Tietolähteenä voivat esimerkiksi olla toiminnanohjausjärjestelmä tai erilaisten antureiden, kuten esineiden internet antureiden ja RFID:n kautta saatavaa tieto. Tieto voi sisältää esimerkiksi informaatiota tietyn alueen maantieteellisiin seikkoihin liittyvistä riskeistä tai historiallista riskitietoa. Digitaalinen kaksonen hyödyntää tietolähteistä saatavia tietoja simulointi- ja optimointimallejaan varten. Kolmas pääpiirre on digitaalisen kaksosen fyysisten verkkojen ja kyberverkkojen integraatio. Neljäs pääpiirre on digitaalisen kaksosen riskianalytiikkaa tukeva oppimiskyvykyys, jonka avulla digitaalinen kaksonen voi oppia oikeista häiriötilanteista ja tunnistaa toimitusketjun häiriötilanteita paremmin. Digitaalista kaksosta, joka on rakennettu tukemaan edellä mainittuja piirteitä on mahdollista hyödyntää riskitilanteisiin liittyvään päätöksentekoon ja digitaalisen kaksosen tuottaman analyysin ja simulaatioiden avulla on myös mahdollista tunnistaa erilaisia toimitusketjun häiriötilanteita (Ivanov & Dolgui 2021.).

Maheshwari ym. (2023) tutkimuksessa pääpaino oli digitaalisen kaksosen hyödyntämistä elintarvikkeiden toimitusketjussa hankinta- tuotanto- ja jakelustrategioiden osalta. Tutkimuksessa kuitenkin myös huomattiin, että digitaalisen kaksosen simulaatio-ominaisuuksia on mahdollista hyödyntää tuotteisiin liittyvissä riskiarvioinneissa ja vähentämään yrityksen liiketoimintaan liittyvää kokonaisriskiä. Riskienhallinta on vielä pienessä osassa digitaaliseen kaksoseen liittyvässä tutkimuksessa, mutta kirjallisuudessa on tunnistettu kuitenkin sen potentiaali ja myöskin huomattu kiihtyvän toimitusketjujen digitalisaation johtavan digitaalisen kaksosen riskienhallintaominaisuuksien tulemisessa merkittävämpään rooliin (Ivanov & Dolgui 2021.).

## 5 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tutkielmassa käsiteltiin digitaalista kaksosta ja sen mahdollista roolia toimitusketjujen riskienhallinnassa. Tarkoituksena oli myös tutkia mitä eri ominaisuuksia digitaalisella kaksosella on ja mistä toimitusketjujen riskienhallinta koostuu. COVID-19 pandemia aiheuttamat laajamittaiset ja merkittävät häiriöt kansainvälisille toimitusketjuille herättivät tarpeen uusille riskienhallintamenetelmille ja siitä syystä myös kiinnostus tutkia digitaalisen kaksosen roolia toimitusketjujen riskienhallinnassa on viime aikoina kasvanut merkittävästi. Myös Industry 4.0 teknologioiden kehittyminen on tuonut merkittävää kiinnostusta digitaalista kaksosta käsittelevää tutkimusta kohtaan.

Luvussa kaksi tarkasteltiin digitaalisen kaksosen määritelmää ja tutkittiin digitaalista kaksosta 7-osaisen viitekehyksen kautta. Viitekehyksen osa-alueet koostuvat teknologiasta, laajuudesta, tehtävästä, mallintamisesta, järjestäytymisestä, ihmisistä ja hallinnasta Luvussa 2 huomattiin, että erityisesti digitaalisen kaksosen hyödyntämä teknologia on merkittävä osa sen toimintaa ja digitaalista kaksosta voi hyödyntää useisiin eri toimintoihin (Ivanov 2024.).

Luvussa kolme tarkasteltiin toimitusketjun riskienhallinnan prosesseja, jotka koostuvat riskien tunnistamisesta, riskien arvioinnista, riskin lieventämisestä ja riskien seurannasta (Ho ym. 2015). Luvussa käsiteltiin myös minkälaisia riskejä tyypillisesti toimitusketjuihin kohdistuu riskienluokituskehyksen kautta. Riskiluokituskehyksen osa-alueet koostuvat tuotteen ominaisuksista, toimitusketjun hallinnan prosesseista, toimitusketjun rakenteesta, ulkoisesta ympäristöstä ja henkilöstöhallinnosta (Hudnurkar ym. 2017). Luvun lopussa käsiteltiin vielä toimitusketjujen riskienhallintaan liittyviä haasteita. Luvun keskeisiä huomioita olivat toimitusketjuihin kohdistuvien riskien moninaisuus ja riskienhallintamenetelmien puutteet nopeasti muuttuvien tilanteiden osalta.

Luvussa neljä käsiteltiin digitaalisen kaksosen roolia toimitusketjujen riskienhallinnassa. Digitaalisen kaksosen roolia ja mahdollisuuksia riskienhallinnassa käsiteltiin neljän määritellyn pääpiirteen kautta (Ivanov & Dolgui 2021). Lisäksi luvussa käsiteltiin digitaalisen kaksosen roolia elintarvikkeiden toimitusketjuissa ja logistiikassa kuljetusreittien suunnitteluun.

Digitaalisella kaksosella on rooli toimitusketjujen riskienhallinnassa. Digitaalisen kaksosen rooli toimitusketjujen riskienhallinnassa on tiedon laajamittainen tuottaminen päätöksentekotilanteita varten simulaation ja data-analyysin avulla. Lisäksi digitaalisella kaksosella voi olla tulevaisuudessa myös rooli itsenäisenä päätöksentekijänä (Ivanov 2024).. Erityisesti digitaalisesta kaksosesta voi olla hyötyä merkittävien toimitusketjuhäiriöiden ja epävarmuuksien tunnistamisessa ja hallinnassa vähentämässä toimitusketjun häiriöriskiä (Ivanov & Dolgui, 2021.). Sen lisäksi digitaalista kaksosta on mahdollista hyödyntää yksittäisen toimitusketjun osa-alueen, kuten logistiikan riskin pienentämisessä (D. Lee & Lee 2021). Digitaalisen kaksosen hyödyntämät teknologiat ovat kuitenkin merkittävässä roolissa mahdollistamassa sen riskienhallintakyvykkydet ja ilman Industry 4.0 teknologioita riskienhallinta ei ole mahdollista digitaalisen kaksosen avulla (Ivanov & Dolgui 2021).





## Lähdeluettelo

- 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*, 5(6), 1498–1515.  
<https://doi.org/10.33889/IJMEMS.2020.5.6.111>
- 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: An International Journal*, 27(2), 182–206.  
<https://doi.org/10.1108/SCM-01-2021-0053>
- Cavalcante, I. M., Frazzon, E. M., Forcellini, F. A., & Ivanov, D. (2019). A supervised machine learning approach to data-driven simulation of resilient supplier selection in digital manufacturing. *International Journal of Information Management*, 49, 86–97.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.03.004>
- Chen, G., Wang, P., Feng, B., Li, Y., & Liu, D. (2020). The framework design of smart factory in discrete manufacturing industry based on cyber-physical system. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 33(1), 79–101.  
<https://doi.org/10.1080/0951192X.2019.1699254>
- Choudhary, N. A., Singh, S., Schoenherr, T., & Ramkumar, M. (2023). Risk assessment in supply chains: A state-of-the-art review of methodologies and their applications. *Annals of Operations Research*, 322(2), 565–607. <https://doi.org/10.1007/s10479-022-04700-9>
- Cimino, C., Negri, E., & Fumagalli, L. (2019). Review of digital twin applications in manufacturing. *Computers in Industry*, 113, 103130.  
<https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.103130>

- Coelho, F., Relvas, S., & Barbosa-Póvoa, A. P. (2021). Simulation-based decision support tool for in-house logistics: The basis for a digital twin. *Computers & Industrial Engineering*, *153*, 107094. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.107094>
- Dietz, M., & Pernul, G. (2020). Digital Twin: Empowering Enterprises Towards a System-of-Systems Approach. *Business & Information Systems Engineering*, *62*(2), 179–184. <https://doi.org/10.1007/s12599-019-00624-0>
- Fang, J., Zhao, L., Fransoo, J. C., & Van Woensel, T. (2013). Sourcing strategies in supply risk management: An approximate dynamic programming approach. *Computers & Operations Research*, *40*(5), 1371–1382. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2012.08.016>
- Gaudenzi, B., & Borghesi, A. (2006). Managing risks in the supply chain using the AHP method. *The International Journal of Logistics Management*, *17*(1), 114–136. <https://doi.org/10.1108/09574090610663464>
- Gockel, B., Tudor, A., Brandyberry, M., Penmetsa, R., & Tuegel, E. (2012, huhtikuuta 23). Challenges with Structural Life Forecasting Using Realistic Mission Profiles. *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference & 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference & 14th AIAA*. 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference & 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference & 14th AIAA, Honolulu, Hawaii. <https://doi.org/10.2514/6.2012-1813>
- Haleh, H., & Hamidi, A. (2011). A fuzzy MCDM model for allocating orders to suppliers in a supply chain under uncertainty over a multi-period time horizon. *Expert Systems with Applications*, *38*(8), 9076–9083. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.11.064>
- Ho, W., Zheng, T., Yildiz, H., & Talluri, S. (2015). Supply chain risk management: A literature review. *International Journal of Production Research*, *53*(16), 5031–5069. <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1030467>

- Hudnurkar, M., Deshpande, S., Rathod, U., & Jakhar, S. (2017). Supply Chain Risk Classification Schemes: A Literature Review. *Operations and Supply Chain Management: An International Journal*, 10(4), 182–199. <https://doi.org/10.31387/oscm0290190>
- Ivanov, D. (2022). Viable supply chain model: Integrating agility, resilience and sustainability perspectives—lessons from and thinking beyond the COVID-19 pandemic. *Annals of Operations Research*, 319(1), 1411–1431. <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03640-6>
- 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>
- Ivanov, D., & Dolgui, A. (2019). New disruption risk management perspectives in supply chains: Digital twins, the ripple effect, and resilience. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 337–342. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.138>
- 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., & Dolgui, A. (2022). Stress testing supply chains and creating viable ecosystems. *Operations Management Research*, 15(1), 475–486. <https://doi.org/10.1007/s12063-021-00194-z>
- Ivanov, D., Dolgui, A., & Sokolov, B. (2022). Cloud supply chain: Integrating Industry 4.0 and digital platforms in the “Supply Chain-as-a-Service”. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 160, 102676. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102676>
- Jüttner, U., Peck, H., & Christopher, M. (2003). Supply chain risk management: Outlining an agenda for future research. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 6(4), 197–210. <https://doi.org/10.1080/13675560310001627016>

- Kayis, B., & Dana Karningsih, P. (2012). SCRIS: A knowledge-based system tool for assisting manufacturing organizations in identifying supply chain risks. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 23(7), 834–852.  
<https://doi.org/10.1108/17410381211267682>
- Lee, D., & Lee, S. (2021). Digital Twin for Supply Chain Coordination in Modular Construction. *Applied Sciences*, 11(13), Article 13. <https://doi.org/10.3390/app11135909>
- Lee, J., Lapira, E., Bagheri, B., & Kao, H. (2013). Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment. *Manufacturing Letters*, 1(1), 38–41.  
<https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2013.09.005>
- MacCarthy, B. L., Ahmed, W. A. H., & Demirel, G. (2022). Mapping the supply chain: Why, what and how? *International Journal of Production Economics*, 250, 108688.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108688>
- Maheshwari, P., Kamble, S., Belhadi, A., Venkatesh, M., & Abedin, M. Z. (2023). Digital twin-driven real-time planning, monitoring, and controlling in food supply chains. *Technological Forecasting and Social Change*, 195, 122799.  
<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122799>
- Miskins, C. (2019). *The Mysterious History of Digital Twin Technology and Who Created It*. Challenge Advisory. <https://www.challenge.org/insights/digital-twin-history/>
- Munir, M., Jajja, M. S. S., Chatha, K. A., & Farooq, S. (2020). Supply chain risk management and operational performance: The enabling role of supply chain integration. *International Journal of Production Economics*, 227, 107667.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107667>
- 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>

- Norrman, A., & Jansson, U. (2004). Ericsson's proactive supply chain risk management approach after a serious sub-supplier accident. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 34(5), 434–456.  
<https://doi.org/10.1108/09600030410545463>
- Preindl, R., Nikolopoulos, K., & Litsiou, K. (2020). Transformation strategies for the supply chain: The impact of industry 4.0 and digital transformation. *Supply Chain Forum: An International Journal*, 21(1), 26–34. <https://doi.org/10.1080/16258312.2020.1716633>
- 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>
- Schluse, M., & Rossman, J. (2016, marraskuuta 24). *From simulation to experimentable digital twins: Simulation-based development and operation of complex technical systems | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore*.  
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7753162/authors#authors>
- Schroeder, G. N., Steinmetz, C., Pereira, C. E., & Espindola, D. B. (2016). Digital Twin Data Modeling with AutomationML and a Communication Methodology for Data Exchange. *IFAC-PapersOnLine*, 49(30), 12–17. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.11.115>
- Shafto, M., Conroy, M., Glassgen, E., Kemp, C., LeMoigne, J., & Wang, L. (2010). *Draft Modeling, Simulation, Information, Technology & Processing Roadmap*. Technology Area 11. National Aeronautics and Space Administration.  
<https://emacromall.com/reference/NASA-Modeling-Simulation-IT-Processing-Roadmap.pdf>
- Singh, M., Fuenmayor, E., Hinchy, E. P., Qiao, Y., Murray, N., & Devine, D. (2021). Digital Twin: Origin to Future. *Applied System Innovation*, 4(2), Article 2.  
<https://doi.org/10.3390/asi4020036>

- Tang, C. S. (2006). Perspectives in supply chain risk management. *International Journal of Production Economics*, 103(2), 451–488. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2005.12.006>
- Tjahjono, B., Esplugues, C., Ares, E., & Pelaez, G. (2017). What does Industry 4.0 mean to Supply Chain? *Procedia Manufacturing*, 13, 1175–1182.  
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.191>
- Tsang, Y. P., Choy, K. L., Wu, C. H., Ho, G. T. S., Lam, C. H. Y., & Koo, P. S. (2018). An Internet of Things (IoT)-based risk monitoring system for managing cold supply chain risks. *Industrial Management & Data Systems*, 118(7), 1432–1462.  
<https://doi.org/10.1108/IMDS-09-2017-0384>