



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Joona Kokkonen

**Toimitusketjun resilienssin kehittäminen
puolijohdeteollisuudessa globaalien
saatavuushäiriöiden ehkäisemiseksi**

Just-in-time-ajattelun ja varmuusvarastoinnin tasapainottaminen

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen
akateeminen yksikkö
Kandidaatintutkielma
Tuotantotalous
Kauppatieteiden kandidaatti

Vaasa 2026

VAASAN YLIOPISTO**Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö**

Tekijä:	Joona Kokkonen		
Tutkielman nimi:	Toimitusketjun resilienssin kehittäminen puolijohdeteollisuudessa globaalien saatavuushäiriöiden ehkäisemiseksi: Just-In-Time-ajattelun ja varmuusvarastoinnin tasopainottaminen		
Tutkinto:	Kauppätieteiden kandidaatti		
Oppiaine:	Tuotantotalous		
Työn ohjaaja:	Tauno Kekäle		
Valmistumisvuosi:	2026	Sivumäärä:	31

TIIVISTELMÄ:

Puolijohteiden saatavuudessa on ilmennyt häiriöitä viimeisen vuosikymmenen aikana. Puolijohteiden toimitusketjun toimintaa ovat horjuttaneet useat tekijät, kuten COVID-19 pandemia, luonnonkatastrofit sekä kauppasodat. Tämän tutkielman tavoitteena on esittää keinoja, joiden avulla puolijohteiden toimitusketjusta saataisiin resilientimpi. Resilienssi tarkoittaa toimitusketjun kykyä kestää ja sietää siihen kohdentuvia häiriöitä. Toimitusketjun resilienssiä vahvistamalla tulevaisuuden häiriöiden vaikutusta voitaisiin pienentää ja ennaltaehkäistä. Tutkielma pyrkii löytämään tasapainoisen toimitusketjumallin, joka kustannuksellisesti mukailisi Just-in-time-ajattelun (JIT) mukaista tehokkuutta. Toimitusketjun on oltava myös ketterä ja kestävä, jotta se selviää nykypäivän muuttuvassa markkinatilanteessa.

Tämä tutkielma on toteutettu kirjallisuuskatsauksena. Tutkielman teossa on hyödynnetty akateemisia julkaisuja, kuten erilaisia tutkimuksia ja artikkeleja. Tutkimus on tehty keräämällä ja analysoimalla tietoa, hyödyntäen esimerkiksi oppikirjoja sekä vertaisarvioituja tutkimusartikkeleita. Kirjallisuuden avulla löydetään vastaus tutkimuskysymyksiin.

Tutkielman tulokset korostavat oikea-aikaisen ja läpinäkyvän tiedon merkitystä toimitusketjun sidosryhmien välillä, merkittävänä resilienssin kehittäjänä. Lisäksi puolijohteiden toimitusketjun resilienssin tärkeänä vahvisuskeinona voidaan pitää tehokkaita operatiivisia päätöksiä. Operatiivisen päätännän tulee olla ketterää, jotta niiden avulla kyetään mitätöimään häiriön aiheuttamia seurauksia. Tiedonvaihto sekä operatiiviset päätökset ovat tehokkaita tietoteknisten integraatioiden ansiosta. Tutkielman tulokset sekä kirjallisuus suosittelevat puolijohteiden tuotantolaitosten maantieteellistä hajauttamista. Puolijohteiden toimitusketjun on oltava rakenteeltaan oikeanlainen, jotta se kestää häiriöt. Puolijohteiden toimitusketjun suositellaan noudattavan hybridimallia, jossa yhdistyy JIT-ajattelun tehokkuus sekä agile-toimitusketjumallin ketteryys. Kirjallisuuden perusteella toimitusketjun resilienssi paranee, kun toimitusketjun alkupäässä noudatetaan JIT-tehokkuuta ja loppupäässä tuotantoon ja logistisiin ratkaisuihin liittyvät päätökset toteutetaan ketterän mallin mukaisesti.

AVAINSANAT: Puolijohdeteollisuus, toimitusketjun resilienssi, just-in-time-ajattelu, varmuusvarastoinni

Sisällys

1	Johdanto	5
1.1	Tutkimuksen tausta	5
1.2	Tutkielman tavoitteet ja tutkimuskysymykset	5
1.3	Tutkimusmenetelmä	6
1.4	Tutkielman laajuus ja rajoitukset	6
2	Varastonhallinnan strategiat ja toimintamallit	7
2.1	Just-in-time-ajattelun keskeiset toimintatavat ja tavoitteet	7
2.2	Just-in-time ajattelun heikkoudet puolijohdeteollisuudessa	10
2.3	Varmuusvarastointi epävarmuuden hallintakeinona	11
3	Puolijohteiden toimitusketju	13
3.1	Puolijohteiden saatavuushäiriöihin johtaneet tekijät	13
3.2	Heijastusvaikutus ja piiskavaikutus	15
4	Puolijohteiden resilienssin kehittäminen, JIT-ajattelun ja varmuusvarastoinnin tasapainottaminen	18
4.1	Toimitusketjun riskienhallinta ja ennakointi	18
4.1.1	Tietojärjestelmien merkitys osana riskienhallintaa ja ennakointia	21
4.2	Toimitusketjun hybridimalli	22
5	Pohdinta	28
	Lähteet	30

Kuvat

Kuva 1 varmuusvaraston määrittäminen	11
Kuva 2 laskuesimerkki	25

Taulukot

Kuvaotsikkoluettelon hakusanoja ei löytynyt.

Lyhenteet

JIT	Just-in-time
SS	varmuusvarasto
WIP	keskeneräiset tuotteet (engl. work in progress)

1 Johdanto

1.1 Tutkimuksen tausta

Puolijohteet ovat kriittisiä elektronisia komponentteja, jotka ovat tärkeitä kaikkien elektronisten laitteiden toiminnalle. Puolijohteita sanotaan myös mikrosiruiksi. Viimeisen vuosikymmenen aikana puolijohteiden saatavuudessa on ilmennyt häiriöitä kansainvälisellä tasolla. Globaalit puolijohteiden toimitusketjut ovat rakentuneet Just-in-time-ajattelun varaan. Just-in-time-ajattelusta käytetään myös lyhennettä JIT (Cheng & Podolsky, 1996, s. 2). Lähivuosien kriisit ovat osoittaneet JIT-ajatteluun pohjautuvan toimintamallin haavoittuaiseksi ja sitä onkin kritisoitu. Yritykset joutuvat hakemaan tasapainoa ja löytämään kestäväen toimintamallin, jotta kuluttajien kysyntä kyetään tyydyttämään vaadittavalla tasolla.

1.2 Tutkielman tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Tutkielman tavoitteena on löytää menetelmiä ja keinoja, joilla puolijohteiden toimitusketjusta saataisiin aiempaa resilientimpi. Tutkielma kartoittaa puolijohteiden toimitusketjussa esiintyviä puutteita ja heikkouksia, joita tulisi kehittää. Resilientimmän toimitusketjun ansiosta olisi tulevaisuudessa mahdollisuus sietää ja kestää puolijohteiden toimitusketjuun kohdentuvia häiriöitä paremmin. Tutkielma pyrkii löytämään tasapainoisen toimitusketjumallin, joka kustannuksellisesti mukailisi JIT-tehokkuutta. Toimitusketjun on oltava myös ketterä ja kestävä, jotta se selviää nykypäivän muuttuvassa markkinatilanteessa.

Tutkielma vastaa seuraaviin kysymyksiin:

1. Kuinka puolijohteiden toimitusketjun resilienssiä voidaan parantaa menettämättä tehokkuutta?
2. Minkälainen toimitusketjun tulisi olla malliltaan, jotta saavutetaan paras mahdollinen suorituskyky?

3. Kuinka löytää oikeanlainen tasapaino Just-in-time-tehokkuuden ja varmuusvarastoinnin välillä?

1.3 Tutkimusmenetelmä

Tämä tutkielma on toteutettu kirjallisuuskatsauksena. Tutkielman teossa on hyödynnetty akateemisia julkaisuja, kuten erilaisia tutkimuksia ja artikkeleja. Tutkimus on tehty keräämällä ja analysoimalla tietoa, hyödyntäen esimerkiksi oppikirjoja sekä vertaisarvioituja tutkimusartikkeleita. Tiedonhakuun on käytetty Tritonian Finna-palvelua sekä Google Scholaria. Tutkielmassa on pyritty hyödyntämään aina uusinta saatavilla olevaa tietoa.

1.4 Tutkielman laajuus ja rajoitukset

Tämän tutkielman tulokset perustuvat julkaistujen artikkelien ja tutkimusten tuloksiin. Tämä tutkielma esittää teoreettisia ratkaisuja ja keinoja, kuinka esimerkiksi puolijohteiden toimitusketjun resilienssiä voi kehittää. Kirjallisuuden saatavuus ja laatu vaikuttavat tutkielman tuloksiin, joten saatavilla olevan tiedon rajoittuminen tiettyyn toimialaan voi vaikuttaa tutkielman tuloksiin ja ratkaisuihin. Puolijohteiden toimitusketjun resilienssiin painottuva tutkimustyö on verrattain uutta ja julkaistujen tutkimustulosten ja artikkeleiden määrä on rajallinen.

2 Varastohallinnan strategiat ja toimintamallit

Lee ja muut (2024, s. 315) määrittelevät varaston kasaksi materiaaleja tai tuotteita, joita hyödynnetään kysynnän tyydyttämiseen tai tuotteiden valmistamiseen. Varastoksi lasketaan kaikki raaka-aineet, keskeneräiset tuotteet sekä lopputuotteet. Yritykset tarvitsevat varastoja tuotteiden ja materiaalien säilytystä varten.

Tässä pääluvussa perehdyn varastohallinnan strategioihin ja eroihin. Luvussa käsittelen JIT-ajattelua sekä sen keskeisiä tavoitteita, toimintatapoja ja haavoittuvaisuutta puolijohdeteollisuudessa. Luvun keskiössä on myös varmuusvarastointi, joka on toinen merkittävä varastohallinnallinen strategia, jolla varmistetaan kysynnän tyydyttäminen.

2.1 Just-in-time-ajattelun keskeiset toimintatavat ja tavoitteet

JIT-ajattelu on japanilainen tuotannollinen johtamisfilosofia (Cheng & Podolsky, 1996, s. 2). Se on osa laajempaa Lean-tuotantomenetelmää. lean-tuotannolle keskeistä on järjestelmällinen hukkan poistaminen jatkuvan kehittämisen periaatteiden kautta (Pazek, 2021). Tehokkaassa lean-tuotannossa tuotetaan tuotteita ja palveluilta vain vaadittavan määrän verran (Lee & Krajewski, 2024, s. 157). Käsitteet JIT-ajattelu ja lean-ajattelu esiintyvät välillä kirjallisuudessa harhaanjohtavasti synonyymeinä. JIT-ajattelu keskittyy tuotannon ohjaukseen ja logistisiin ratkaisuihin. JIT-ajattelu on osa laajempaa lean-tuotantoa.

JIT-ajattelu kehitettiin vuonna 1949 Japanissa Toyotan autotehtaalla. Ajattelutapa sai alkunsa, kun Toyotan tuolloinen johtaja Kiichiro Toyoda tavoitteli saavuttavansa saman tuotantoasteen kuin Yhdysvalloissa Fordin autotehtaalla. Henry Fordin ansiosta Fordin autotuotanto oli kahdeksankertainen verrattuna Toyotan tuotantoon. JIT-ajattelu syntyi, kun Toyotan tuolloinen varajohtaja Taiichi Ohno yhdessä Shigeo Shingon sekä Hiroyuki Hiranon kanssa tarttuivat Toyodan asettamaan haasteeseen.

Ohnon ja Shingon päämääränä oli löytää toimintamalli, joka mahdollistaisi virheettömän materiaalivirran. Tavoitena oli toimittaa täsmällinen määrä oikeaa materiaalia virheettömässä kunnossa juuri oikeaan paikkaan ennen kuin sitä tarvitaan. JIT-ajattelun mukaan mitään ei tuoteta, kunnes kysyntää tuotetta kohtaan ilmenee ja asiakkaan vaatimukset täyttyvät (Santos ja muut, 2006, s. 19). Toimiva yritys tai organisaatio pyrkii näin ollen jatkuvasti tunnistamaan ja poistamaan hukkaa ja kehittämään prosesseja jatkuvasti (Nicholas & Schonberger, 2018, s. 35). Hirano määritteli hukaksi kaikki prosessit, jotka eivät tuota lisäarvoa tai ole välttämättömiä (Santos ja muut, 2006, s. 21–22). JIT-ajattelussa varastot nähdään hukkana, ja niiden kokoa pyritään pienentämään. Shingo jakoi hukan seitsemään eri luokkaan, joista varasto on kaikista merkittävin ja haitallisin. Varastoksi lasketaan kaikki raaka-aineet (engl. raw materials), keskeneräiset tuotteet (engl. work-in-progress, WIP) sekä valmiit tuotteet (engl. finished goods). Hänen mukaansa varasto on sairaan tehtaan merkki, koska se kätkee ongelmat sisäänsä ilman, että niitä ratkaistaan (Santos ja muut, 2006, s. 22). JIT-ajattelun keskeisimpiä tavoitteita on varastotason pitäminen mahdollisimman alhaisena.

JIT-ajattelun tavoitteena hukan poistamisen lisäksi on maksimoida tuotteen laatu kustannuksiin suhteutettuna. Kun materiaalien käyttö on tehokasta ja koneiden käyttöaste pidetään mahdollisimman korkealla resursseihin nähden, saavutetaan ajattelumallin mukainen tehokkuus. On hyvä kuitenkin huomioida, että laadun varmistamisen on oltava koko ajan tasolla, jolla se hyödyttää organisaatiota. Näin ollen ajattelun mukaan keskittyminen tulee pitää tuotantoprosessien kehittämisessä, jonka päämääränä on virheetön taso (Cheng & Podolsky, 1996, s. 11). Keskeistä JIT-ajattelussa on optimointi ja pienet jatkuvat parannukset. Kyseinen lähestymistapa tunnetaan Japanissa nimellä ”Kaizen”. Tätä tekniikkaa pidetään JIT-ajattelun merkittävimpanä työkaluna. (Cheng & Podolsky, 1996, s. 4). Tekniikka pohjautuu tuotantoprosessin asteittaiseen parantamiseen. Kun pieniä parannuksia tehdään, niiden vaikutus on aluksi pieni. Kun mitä tahansa prosessia parannetaan jatkuvasti, sitä aletaan ymmärtämään paremmin ja pienistä parannuksista uskotaan kasautuvan suuri parannus (Nicholas & Schonberger, 2018, s. 65–66).

JIT-ajattelu kehitettiin alun perin autojen tuotantoon. Siihen pohjautuvat toimintatavat on sittemmin käyttöönotettu kaikenlaisessa teollisuudessa (Nicholas & Schonberger, 2018, s. 43). JIT-ajattelusta on kehittynyt johtamisfilosofia, joka yhdistää tiedon ja ajattelumallin mukaiset toimintatavat ja tekniikat tehokkaaksi kokonaisuudeksi, jolla tuotantoprosesseja kyetään optimoimaan. Oikeanlaisella tavalla käyttöönotettu JIT-toimintamalli vähentää yrityksessä muuttuvien taloudellisten tekijöiden aiheuttamaa epävakautta (Cheng & Podolsky, 1996, s. 9).

Kanban-järjestelmä on Ohnon kehittämä kysynnän aikataulusjärjestelmä. Järjestelmän avulla kyetään minimoimaan keskeneräinen työ prosessien välissä ja pienentämään varastoon sitoutunutta pääomaa. Kanban menetelmä on keskeinen osa JIT-tuotantoa. Siinä käytetään visuaalisia ”kanban-kortteja”, joiden avulla määritetään tuotannossa tuotettavien tuotteiden määrä (Gross & McInnis, 2003, s. 10). Periaatteen mukaisesti jokaiseen tuotettuun osaan sisältyvään osalaatikkoon kiinnitetään kanban-kortti. Tämän jälkeen kyseinen osalaatikko viedään sille merkittyyn paikkaan. Seuraavaksi osalaatikon tyhjentäjä kiinnittää kortin vastaanottopölyväaseen. Tämän jälkeen osista tai tuotteista tyhjennetty laatikko viedään uudestaan ketjun alkupäähän. Tässä tilanteessa kanban-kortti indikoi tarpeesta tuottaa uusi erä kyseisiä osia. Näin ollen sykli on valmis alkamaan alusta (Lee ja muut, 2024, s. 169).

Kanban-järjestelmää hyödyntävässä tuotannossa tuotteita tuotetaan vain asiakkaiden todellisen tarpeen ja kysynnän mukaan. Näin ollen menetelmä korvaa viikoittaiset tai päivittäiset tuotantotavoitteet. Kanban-järjestelmää hyödyntävän tuotantoyrityksen ei tarvitse nojautua ennustuksiin kysynnästä. Visuaaliset kanban-kortit kertovat milloin edetään prosessista seuraavaan (Gross & McInnis, 2003, s. 10). Kanban-järjestelmän avulla saadaan vastauksia seuraaviin kysymyksiin: mitä tuotetaan, milloin tuotetaan, minkä verran tuotetaan ja kuinka tuotteet kuljetetaan. Kanban-järjestelmä kattaa informaation työjärjestyksestä (Japan Management Association ja muut, 1985, s. 77–78).

Kanban-järjestelmällä saavutetaan useita tuotannollisia hyötyjä. Se pienentää varastoja ja parantaa operaatioiden virtausta. Ylituotannon estäminen on myös keskeinen etu, joka oikein implementoidulla kanban-järjestelmällä voidaan saavuttaa. Ylituotanto on myös yksi seitsemästä Shingon luokittelemista hukun luokasta. Kanban-järjestelmässä varastolle asetetaan minimi- ja maksimitasot, jotka toimivat reaaliaikaisina signaaleina tuotannolle eli sille, milloin tulee tuottaa ja milloin ei. Näin vältetään liiallisesta tuotannolta kysynnän laskiessa. Kanban-järjestelmä mahdollistaa ketteryuden, kun kysynnässä ilmenee vaihtelua (Gross & McInnis, 2003, s. 11–13).

2.2 Just-in-time ajattelun heikkoudet puolijohdeteollisuudessa

Puolijohteet eli mikrosirut ovat tärkeä osa monella eri teollisuuden alalla. Puolijohteita tarvitaan monien elektronisten laitteiden tuotantoon. Puolijohteet ovat tärkeä osa esimerkiksi matkapuhelimien ja autojen tuotantoa. Tyypillinen auto käyttää noin 50–150 puolijohdesirua toimiakseen. Niiden merkityksestä kertoo myös vaihdannan määrä. Puolijohteet ovat maailman neljänneksi vaihdetuin kauppatavara (Voas ja muut, 2021). Puolijohdeteollisuus on haastava tuotantoympäristö, koska läpimenoajat ovat pitkiä sekä kysyntä muuttuu jatkuvasti. Puolijohteiden tuotantoprosessi on monimutkainen ja se sisältää kapasiteettirajoitteita (Ziarnetzky ja muut, 2020). Puolijohdeteollisuudessa yritykset usein toimivat JIT-tuotantomallin mukaisesti (Xiong ja muut, 2025). JIT-tuotantomalli toimii ihanteellisten olojen vallitessa, mutta erilaisten kriisiolosuhteiden vallitessa JIT-periaatteiden mukaisista toimintatavoista ja menettelyistä tulee haasteellisia (Lim & Tan, 2018). Esimerkiksi japanilaiselle elektroniikkajätti Sonylle, joka toimi JIT-periaatteita noudattaen, COVID-19 pandemian aiheuttama puolijohdepula aiheutti mittavia haittoja. Sonyn täytyi pienentää tuotantokapasiteettia ja peruuttaa asiakkaiden tilauksia. Sony laski PlayStation 5-pelikonsolin myyntiennustetta 4,5 miljoonalla kappaleella vuonna 2021 puolijohdeiden saatavuusongelmien takia (Kravchenko ja muut, 2024).

Tunnetut mediat ovatkin syyttäneet JIT-toimintamallia häiriöistä ja pitäneet mallia syyppäänä puolijohdepulaan (Choi ja muut, 2023). Choin ja muiden (2023) mukaan

akateeminen koulukunta on jakautunut kahtia; toiset väittävät, että JIT-toimintamalli ei ole kestävä, toiset taas uskovat edelleen sen ylivertaisuuteen häiriöistä huolimatta. Puolijohdepulaan johtaneita tekijöitä käyn tarkemmin läpi kolmannessa pääluvussa.

2.3 Varmuusvarastointi epävarmuuden hallintakeinona

Varmuusvarasto on ylimääräinen puskuri, joka rakennetaan määrätyn varasto tason päälle. Sen avulla varaudutaan tuotantoprosessien- ja toimitusprosessien häiriöiltä ja mahdollistetaan kysynnän tyydyttäminen epävarmoina aikoina (Graves, 1987, s. 2–3). Varmuusvarastosta käytetään myös englanninkielistä nimeä safety stock (SS). Varmuusvarasto voidaan luoda tilaamalla tuotetta varastoon jo ennen kuin sitä tarvitaan. Täten puskuri epävarmuutta vastaan on luotu (Lee & Krajewski, 2024, s. 319). Shuklan ja muiden (2025) mukaan yritykset ja valtiot ovat alkaneet varastoimaan kriittisiä puolijohdekomponentteja. Tällainen toiminta voi johtaa markkinaepätasapainoon eli häiritä tarjonnan ja kysynnän välistä tasapainoa. Lisäksi varmuusvarastointi on kallista ja vaatii tarkkoja kysyntäennusteita ollakseen tehokasta.

Ayoun Nazirussaman (2024, s. 60) esittelee kaavan, jonka mukaan varmuusvarasto voidaan laskea seuraavalla tavalla:

$$SS = (\text{Max. toimitusaika} \times \text{Max. kulutus per päivä}) \\ - (\text{Keskim. toimitusaika} \times \text{Keskim. kulutus per pv})$$

Kuva 1 varmuusvaraston määrittäminen

Edellä mainittu kaava perustuu ajatukseen pahimpaan mahdolliseen skenaarioon turvautumisesta. Kaava huomioi maksimikysynnän ja pisimmän mahdollisen toimitusajan.

JIT-tuotantoympäristössä varastoja ei nähdä tarpeelliseksi, vaan ne ovat hukkaa. Varastot ovat kuitenkin tärkeitä ennustettavuuden kannalta. Varastojen avulla voidaan luoda turva, joka mahdollistaa tarvittavan määrän materiaalia seuraavan prosessin käyttöön. Asiakkaan kysyntä on aina kyettävä tyydyttämään. Kysyntää ei voi täydellisesti ennustaa,

ja siinä ilmenee vaihteluita. Tämänkaltaisessa tilanteessa varasto toimii turvana, jonka avulla kysyntään kyetään vastaamaan. Varastoinnilla suojaudutaan myös epävarmojen tavarantoimittajien varalta. Tämän kaltainen tilanne ei luonnollisesti ole otollinen, mutta voi syntyä, mikäli tuotetta on niukasti tai tasaista ja varmaa toimitusta ei kyetä varmistamaan. Esimerkiksi Huawei alkoi varmuusvarastoida puolijohteita Yhdysvaltain asettamien pakotteiden seurauksena vuonna 2019 (Ramani ja muut, 2022).

Tuotteiden varastointi ei kuitenkaan ole ilmaista. Varastoinnista aiheutuvat kustannukset voidaan jakaa tilaus/hankintakustannuksiin ja säilytyskustannuksiin. Tilaus/hankintakustannukset kattavat esimerkiksi ostajien palkat ja kaikki kulut, jotka ostotapahtuma aiheuttaa. Mitä useammin ostaa, sitä suuremmaksi ostokustannukset kasvavat. Kyseiset kustannukset syntyvät ostettujen tavaroiden arvosta riippumatta. (Muller, 2011, s. 13–15, 87). Säilytyskustannukset aiheutuvat itse varastorakennuksen vuokrasta, varastohenkilöstön palkoista, veroista, vakuutuksista ja varaston kutistumisesta (Lee & Krajewski, 2024, s. 617). Oikea-aikaisella tuotteen ostolla on mahdollista taistella kustannusinflaatiota vastaan. Lisäksi merkittävä varastoinnin etu on määrälennukset. Yleisesti ottaen mitä suurempi ostoerä on kyseessä, sitä halvemmaksi se tulee. Näiden syiden takia yritykset pyrkivät tekemään mahdollisimman suuria ostoja niin harvoin kuin mahdollista. Näin ollen varastoista tulee tarpeellisia ja kannattavia (Muller, 2011, s. 13–15, 87).

3 Puolijohteiden toimitusketju

Puolijohteet liikkuvat puolijohteiden toimitusketjussa (engl. semiconductor supply chain). Toimitusketjua voidaan pitää infrastruktuurina, joka mahdollistaa teknologiateollisuudessa käytettävien puolijohteiden tuotannon sekä jakelun (Xiong ja muut, 2025). Toimitusketju kattaa kaiken yhteydenpidon yritysten välillä. Puolijohteiden saatavuudessa ilmenneet häiriöt juontavat juurensa puolijohteiden toimitusketjun häiriöihin.

Tutkielman kolmannessa pääluvussa käsittelen puolijohteiden toimitusketjua sekä sen haavoittuvaisuuteen johtavia tekijöitä. Perehdyn tekijöihin, jotka ovat aiheuttaneen maailmanlaajuisia puolijohteiden saatavuusongelmia ja esittelen häiriöiden vaikutuksia vahvistavina ilmiöinä heijastus- ja piiskavaikutuksen.

3.1 Puolijohteiden saatavuushäiriöihin johtaneet tekijät

COVID-19 pandemiaa voidaan pitää merkittävänä osasyynä useaa teollisuudenalaa vaivanneisiin puolijohteiden saatavuushäiriöihin. Puolijohdepula on esimerkiksi aiheuttanut merkittäviä tappioita autoteollisuudessa; vuotuisten tuotannollisten menetysten arvioitiin olevan 110 miljardia Yhdysvaltain dollaria toukokuun 2021 loppuun mennessä (Ramani ja muut, 2022). COVID-19 pandemian takia tehtaita jouduttiin sulkemaan eritoten Aasiassa, mikä johti puolijohteiden valmistusongelmiin. Samanaikaisesti ihmisten työelämä koki suuren mullistuksen heidän siirtyessä etätöihin. Etätöiden määrä lisääntyi ja kotitoimistot yleistyivät. Tämän takia elektronisten laitteiden kysyntä kasvoi räjähdysmäisesti. Tarjonnan supistuminen tuotannollisten ongelmien vuoksi yhdistettynä korkeaan kysyntään lisäsi rasitteita ja toimitusketjun toiminta häiriintyi. Viruksen aiheuttamat sairastumiset lisäsivät myös työvoimapulaa, mikä vahvisti tuotannollisia ongelmia ja haittasi kysynnän tyydyttämistä (Shukla ja muut, 2025).

COVID-19 pandemian lisäksi puolijohteiden toimitusketjua ovat rasittaneet useat muutkin tekijät. Venäjän hyökkäyssota Ukrainaan sekä kauppajännitteet Yhdysvaltain ja Kiinan välillä ovat aiheuttaneet ongelmia puolijohteiden toimitusketjuun (Xiong ja muut, 2025). Xiongin ja muiden (2025) mukaan kauppasodan voidaan nähdä alkaneeksi vuonna 2017 Yhdysvaltain käynnistäessä tutkinnan Kiinan epäreilusta tavasta käydä kauppaa. Kauppasota on johtanut tariffeihin, viennin kontrolloimiseen sekä useisiin pakotteisiin monella toimialalla. Kauppasodan takia puolijohteiden valmistajien kustannukset ovat nousseet ja heijastuneet hintojen vaihteluna myös kuluttajille (Ma, 2024). Luonnon katastrofit ja tulipalot ovat horjuttaneet myös puolijohteiden toimitusketjua. Esimerkiksi Japanissa 2016 koettu maanjäristys aiheutti tuhansien miljoonien yhdysvaltaindollarien tappiot (Lim & Tan, 2018). Kyseinen maanjäristys ja Texasissa koettu lumimyrsky ovat viivästyttäneet puolijohteiden tuotantoa ja toimitukseen (Shukla ja muut, 2025).

Puolijohteiden toimitusketjua voidaan pitää rakenteeltaan monimutkaisena. Kyseinen toimitusketju sisältää monivaiheista koordinoitua, yhteydenpitoa sekä synkronointia useiden toimittajien, valmistajien ja jakelijoiden välillä (Xiong ja muut, 2025). Esimerkiksi autovalmistaja General Motors käyttää valmistuksessaan osia, jotka ovat peräisin 250 eri toimittajalta. Nämä toimittajat taas käyttävät osissaan mikrosiruja, jotka ovat peräisin 11 eri puolijohdevalmistajalta. Toimitusketjussa on useita eri tasoja. Ylemmän tason toimittajat tilaavat osia alemman tason toimittajilta, vaikka tietävätkin, että he eivät kykene täyttämään tilauksia. Näin toimitusketjun häiriöt leviävät toimitusketjua pitkin ja johtavat tuotantokatkoksiin (Ramani ja muut, 2022). Puolijohdeteollisuudessa varmuusvarastot ovat myös hyvin pienet, mikä tekee toimitusketjun toiminnasta häiriötilanteessa haavoittuvaisemman (Liao ja muut, 2025).

Maantieteellisesti pitkät etäisyydet luovat haasteita oikea-aikaisuudelle sekä täsmällisyydelle. Suuri osa maailman markkinoilla liikkuvista puolijohteista valmistetaan Taiwanissa, Etelä-Koreassa ja Japanissa. Taiwania onkin kutsuttu idän Piilaaksoksi heidän valtavan puolijohdeteollisuutensa takia. Xiongin ja muiden (2025) mukaan puolijohteiden toimitusketju on haavoittuvainen, koska tavarantoimittajien määrä on

hyvin rajallinen. JIT-mallin mukaisesti aikataulutettu tuotanto on hauras, kun raaka-aineiden tai muiden tuotantotekijöiden saatavuudessa ilmenee häiriö. Tuotannollisten häiriöiden seuraukset näkyvät nopeasti koko toimitusketjussa ja haittaavat materiaalien virtaa. Valmistajien tuotannollinen häiriö voi nopeasti johtaa saatavuuden ongelmiin tai viivästyneisiin toimituksiin.

Puolijohteiden valmistusprosessi on monimutkainen ja toimitusketjut ovat pitkiä. Esimerkiksi puolijohteiden tuotantolaitoksen rakentaminen vaatii 4–20 miljardin Yhdysvaltain dollarin arvoisen sijoituksen. Tämän lisäksi tuotantolaitoksen rakentaminen ja käyttöönotto vie noin viisi vuotta (Ramani ja muut, 2022). Puolijohteiden valmistukseen tarvitaan raaka-aineiksi esimerkiksi galliumia ja germaniumia, joita on saatavissa vain tietyiltä alueilta. Maantieteellinen riippuvuus raaka-aineiden suhteen tekee puolijohteiden toimitusketjusta riskialttiin häiriöille. Riippuvuus onkin aiheuttanut huomattavia pullonkauloja puolijohteiden tuotantoon kysynnän noustessa (Shukla ja muut, 2025). Tämän lisäksi geopoliittiset konfliktit voivat estää tuotannolla tärkeiden raaka-aineiden saannin (Tse ja muut, 2024). Shuklan ja muiden (2025) mukaan puolijohdepulaa voidaan pitää edellä mainittujen tekijöiden summana. Heidän mukaansa puolijohteiden valmistukseen käytetyt investoinnit ja resurssit ovat olleet alimitoitettuja. Tämän takia tuotantokapasiteetti on ollut vajavainen ja se on tehnyt toimitusketjusta hauraan häiriöille.

3.2 Heijastusvaikutus ja piiskavaikutus

Häiriöt, jotka kohdentuvat toimitusketjun ylä- tai alavirtaan, voivat vahvistaa häiriön kokonaisvaikutusta heijastusvaikutuksen kautta (engl. ripple effect). Määritelmän mukaan heijastusvaikutusta voidaan pitää prosessina. Toimitusketjun yhdessä osassa ilmenevä häiriö etenee toimitusketjua pitkin sen alempiin osiin asiakasta kohti. Tämä johtuu siitä, että toimitusketjun eri toiminnot ovat yhteydessä toisiinsa ja riippuvaisia toisistaan (Ghade ja muut, 2022). Toimitusketjussa ilmenevä häiriö ei pysy paikallisena, vaan leviää toimitusketjun alavirtaan samalla vahvistuen häiriön aiheuttamia vaikutuksia (Dolgui & Ivanov, 2021). Heijastusvaikutuksessa on kyse eräänlaisesta lumipalloefektistä,

joka pienen häiriön toteutuessa voimistuu entisestään ja täten vaikuttaa koko toimitusketjuun ja sen toimintaan.

Piiskavaikutus (engl. bullwhip effect) tarkoittaa kerrannaisvaikutusta, joka johtuu kysynnän muutoksista. Tilaukset liikkuvat toimitusketjussa ylöspäin, jolloin muutos kuluttajien kysynnässä voi aiheuttaa suurempia muutoksia tilausmäärissä valmistajatasolla. Tämä voi johtaa varaston epätasapainoon. Puolijohdeteollisuudessa kysynnän muutos voi käynnistää piiskavaikutuksen, joka johtaa yli- tai alituotantoon ja pahentaa globaalia puolijohdepulaa. Valmistajien on vaikea sovittaa tuotantokapasiteetti yhteen todellisen kysynnän kanssa (Shukla ja muut, 2025). Piiskavaikutus voi myös saada alkunsa operatiivisesta poikkeamasta toimitusketjussa ja se tyypillisesti voimistuu toimitusketjua ylöspäin mentäessä (Dolgui ja muut, 2020).

Dolguin ja muiden (2020) simulaatiopohjaisessa tutkimuksessa selvitettiin heijastusvaikutuksen roolia piiskavaikutuksen synnyssä. Tulokset osoittivat, että kyseisten vaikutusten välillä oli negatiivinen keskinäinen yhteys vaikutusten vahvistuessa samanaikaisesti. Tässä tilanteessa toimitusmäärät laskevat, mutta asiakkaiden tilausmäärät nousevat. Kyseinen efektien aiheuttama yhdistelmä on erittäin tuhoisa, vaikka korrelaatiota vaikutusten välillä ei olisikaan. Vaikutuksen toteutuessa samanaikaisesti syntyy tilanne, jossa rästiin jääneet tilaukset ovat kasaantuneet tilausvuoriksi. Tämä johtaa varastojen hallitsemattomaan tyhjenemiseen ja täyttymiseen. Tuotanto on sekaisin, vaikka itse häiriön aiheuttama vahinko olisikin jo korjattu. Tämän kaltainen tilanne on ilmennyt COVID-19 pandemian jälkeisen toipumisen aikana puolijohdeteollisuudessa. Aluksi pandemian aiheuttamat karanteenit pakottivat ihmiset pysymään kotioloissa ja esimerkiksi henkilöautojen kysyntä väheni radikaalisti. Vuoden 2020 loppupuolelle mentäessä henkilöautojen kysyntä kuitenkin kasvoi räjähdemäisesti. Autovalmistajien oli kiihdytettävä valmistusta ja heidän tarpeensa puolijohteita kohtaan kasvoi (Ramani ja muut, 2022). Tilannetta pahensi se, että puolijohteiden tuotannossa tuotantokapasiteetti oli allokoitu valmistamaan muiden teollisuuden alojen puolijohteita (Voas ja muut, 2021). Häiriöiden takia puolijohteiden tuotanto oli rajallista eikä kysyntää

kyetty tyydyttämään. Menneisyyttä tarkastelemalla voidaan todeta piiskavaikutuksen syntyneen kysynnän voimistumisen seurauksena. Sen vaikutus toimitusketjun ylävirtaan oli ilmeinen.

4 Puolijohteiden resilienssin kehittäminen, JIT-ajattelun ja varmuusvarastoinnin tasapainottaminen

Toimitusketjun sietokyky eli resilienssi tarkoittaa toimitusketjun kykyä sietää tai vastustaa sen tasapainoa horjuttavia tekijöitä. Toimitusketju on resilientti silloin kuin se kestää muutokset ja toimii tasolla, jolla kysyntä voidaan tyydyttää (Ramani ja muut, 2022). Kestävä toimitusketju sietää häiriöt ja sen toiminta palaa tasolle, jota se ennen häiriöiden ilmenemistä oli (Holdago & Niess, 2023). Resilientti toimitusketju on elintärkeää yritysten selviytymisen ja kasvun kannalta (Luo ja muut, 2024). Puhuttaessa toimitusketjun resilienssin kehittämisestä kyse ei ole pelkästään riskien pienentämisestä. Tuotantoprosessien optimointi, toimituskustannusten minimoiminen ja resurssien tehokas kohdentaminen ovat keskeinen osa toimitusketjun kehittämistä (Liao ja muut, 2025).

Tutkielman neljännessä pääluvussa esittelen keinoja, joidenka avulla puolijohteiden toimitusketjusta saataisiin nykyistä resilientimpi. Erittelen ratkaisuja ongelman ratkaisemiseksi ja etsin tasapainoa JIT-tehokkuuden ja varmuusvarastoinnin välille, jotta globaaleilta saatavuushäiriöiltä voitaisiin tulevaisuudessa välttyä.

4.1 Toimitusketjun riskienhallinta ja ennakointi

Riskien arviointi ja riskien hallinta ovat tärkeä osa kokonaisuutta, jolla puolijohteiden toimitusketjun resilienssiä voidaan parantaa. Moktadir ja Ren (2024) havaitsivat DFS-WINGS (Dynamic Fuzzy Sets & Weighted Influence Non-linear Gauge System) analyysimentelmää hyödyntävässä tutkimuksessaan geopolittisten riskien sekä luonnonkatastrofien oleva kaikista merkittävin tekijä toimitusketjun resilienssille. Kyseiset seikat ovat aiheuttaneet häiriöitä puolijohteiden toimitusketjulle ja sen toiminnalle. Geopoliittiset riskitekijät vaikuttavat yritysten strategiseen päätöksentekoon (Tse ja muut, 2024). Moktadir ja Ren (2024) ehdottavat, että päättäjien tulisi ottaa käyttöön riskienhallinnallisia strategioita ja ennakoitua täten mahdollisiin

tuleviin häiriöihin. Riskienhallintainfrastruktuuri on tärkeä toimitusketjun alajuoksussa toimiville yrityksille. Se tarkoittaa niitä strategisia resursseja, jotka on allkoitu toimitusketjun riskien hallintaan. Niiden avulla on mahdollista reagoida nopeasti toimitusketjun häiriöihin ja pitää tuotanto jatkuvana. (Liao ja muut, 2025). Riskienhallinnallisten päätösten on tapahduttava nopeasti, jotta pitkän aikavälin haittavaikutuksilta kyettäisiin välttymään (Ivanov ja muut, 2017). Esimerkiksi matkapuhelimia ja muita elektronisia laitteita valmistava kiinalainen yritys Huawei sieti Yhdysvaltain asettamia sanktioita varsin hyvin oman joustavuuden ja reaktiivisen toiminnan ansiosta. Huawei pyrki parantamaan omavaraisuutta puolijohdetuotannossa. Tämän mahdollisti heidän tutkimus- ja kehitystyönsä, jonka avulla Huawei kykeni saamaan korkealaatuisia kotimaisia toimittajia liikekumppaneiksi (Tse ja muut, 2024).

Tuotannon ei tulisi nojautua vain muutaman toimittajan varaan. Mikäli toimituspäässä esiintyy häiriö, se leviää toimitusketjua pitkin sen alempiin osiin. Häiriön seuraukset ovat merkittävät, mikäli puolijohteita valmistava yritys on riippuvainen kyseisestä toimittajasta. Esimerkiksi Yhdysvallat ovat pyrkineet vähentämään riippuvuuttaan Kiinasta kehittämällä kotimaista puolijohteiden tuotantoa ja tutkimusta (Ma, 2024). Toimittajien kilpailuttaminen ja harkittu valinta on osa riskienhallintaa. Moktadirin ja Renin (2024) mukaan toimittajia sekä tuotantopaikkoja tulisi monipuolistaa. Useiden toimittajien kanssa otollisten sopimusten solmiminen ei kuitenkaan ole helppoa. Usean toimittajan hyödyntäminen voi korottaa hintoja, koska toimittajakohtaiset tilausmäärät tulevat laskemaan. Tästä huolimatta tutkimukset osoittavat, että usean toimittajan hyödyntäminen johtanee hintakilpailuun ja palvelun laadun paranemiseen (Lim & Tan, 2018).

Liun ja muut (2025) tutkivat Kiinan valtapyrkimyksiä Taiwaniin ja niiden merkitystä puolijohteiden toimitusketjun resilienssille ja esittelivät mahdollisia tulevaisuuden skenaarioita ja niiden seurauksia. Kuten kappaleessa 3.1 mainitsin, Taiwan tuottaa merkittävän osan maapallon markkinoilla liikkuvista puolijohteista. Yhdysvallat sekä muut Taiwanin liittolaiset ovat olleet huolestuneita Kiinan valtapyrkimyksistä ja siitä, että

suuri osa maailman kehittyneestä sirutuotannosta keskittyy Taiwanin saarelle (Fitch & Yang, 2022). Todennäköisimpänä mahdollisuutena Liu ja muut (2025) pitävät Kiinan asettamaa karanteenia Taiwanille. Taiwanin saarto olisi toinen mahdollisuus, mutta se lasketaan kansainvälisten lakien mukaan sodan julistukseksi, mikä saattaisi Kiinan itsensä epäsuotuisaan asemaan ulkovaltojen silmissä. Mahdollinen karanteeni tulisi vaikuttamaan materiaalien ja valmiiden tuotteiden liikkuvuuteen. Oikea-aikaisista tuotteiden toimituksista tulisi haaste. Tämän lisäksi karanteeni haittaisi työvoiman vapaata liikkumista. Tutkimuksessa karanteeni esitettiin Kiinan valtapyrkimyksiä ilmentymisen lievimpänä muotona, jonka seuraukset kuitenkin horjuttaisivat kansainvälistä puolijohdeiden toimitusketjua.

Liun ja muiden (2025) esittämä skenaario on ajankohtainen ja korostaa riskienhallinnan merkitystä puolijohdeiden toimitusketjun resilienssin kehittämiseksi tulevaisuutta silmällä pitäen. Mikäli Taiwanin puolijohdevalmistus katkeaisi, tulisi tuotannon korvaamisen ja kysynnän tyydyttämisen hinnaksi 350 miljardia Yhdysvaltain dollaria (Voas ja muut, 2021). Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC) on yksi maailman suurimmista puolijohdevalmistajista. Se on alkanut monipuolistaa tuotantopaikkojaan ympäri maailmaa perustamalla uusia tehtaita esimerkiksi Yhdysvaltoihin (Fitch & Yang, 2022) ja laajentanut toimintaansa myös perustamalla tuotantolaitoksia Japaniin ja Saksaan (Liu ja muut, 2025). Tällainen tuotannon monipuolistaminen ja hajauttamainen maailman laajuisesti on yksi Moktadin ja Renin (2024) ehdottamista keinoista, joiden avulla puolijohdeiden toimitusketjusta saadaan resilientimpi.

Ivanov ja muut (2017) korostavat reaktiivisten päätösten merkitystä toimitusketjun toipumisen kannalta. Heidän mukaansa kestävyyspuskurit ja varajärjestelyt ovat äärimmäisen tärkeitä. Varajärjestelyiden (esim. useat toimittajat, varastot, kuljetuskanavat) avulla on mahdollista minimoida häiriöistä johtuvat seuraukset. Varajärjestelyt kuuluvatkin toimitusketjun resilienssin kehittämisen tärkeimpiin työkaluihin. Holdagon ja Niessn (2023) mukaan varajärjestelyt ovat keskeinen osa

vankkaa toimitusketjua. Heidän mukaansa toimitusketjun ei tule vain sietää häiriötä, vaan kestää ne vankasti. He luokittelevat varajärjestelyt (engl. redundancy) esimerkiksi kapasiteettivarauksiksi sekä kohtuullisiksi varmuusvarastoiksi. Näiden avulla riskeihin varautuminen helpottuu ja niiden vaikutuksia toimitusketjun toimintaan kyetään mitätöimään. Päätökset ja varajärjestelyt määrittävät suoraan häiriön aiheuttaman heijastusvaikutuksen vahvuuden ja leviämisen toimitusketjuun.

4.1.1 Tietojärjestelmien merkitys osana riskienhallintaa ja ennakointia

Tietojärjestelmä on kokonaisuus, joka hyödyntää laajaa kirjoa tietotekniikkaa toimiakseen. Tietojärjestelmä on suunniteltu erilaisten tehtävien suorittamista varten. Tietojärjestelmä yhdistää tekniikan ja ihmisten toimintatavan, näin ollen vuorovaikutus ja viestintä mahdollistuu eri toimijoiden välillä (Boell & Cecez-Kecmanovic, 2015).

Liaon ja muiden (2025) mukaan tehokas tiedonkäsittely parantaa puolijohteiden toimitusketjun resilienssiä. Kollektiivinen riskienhallinta ja nopeat operatiiviset muutokset ovat mahdollisia tiedonvaihdon ollessa läpinäkyvää ja synkronoitua. Operatiiviset muutokset ovat kriittisiä häiriöiden jälkeisenä aikana. Nopea mukautuminen häiriöihin ja operatiiviset muutoksen mahdollistuvat tietojärjestelmien ollessa tehokkaita ja joustavia. Hyvin toimiva tiedonvaihto toimitusketjun alkupäästä loppupäähän on tärkeää toimitusketjun resilienssin kannalta. Tehokas tiedonvaihto lisää toimitusketjun nopeutta (engl. velocity) eli reagointikykyä häiriöiden ilmetessä (Holdago & Niess, 2023). Liaon ja muiden (2025) mukaan joustavat tietojärjestelmät parantavat yrityksen strategista ketteryyttä. Tehokkaat tietojärjestelmät mahdollistavat operatiiviseen tehokkuuden ja hyvän yhteyden pidon kumppanien ja toimittajien välillä, mikä vahvistaa toimitusketjun resilienssiä.

Puolijohteiden toimitusketjun alavirrassa monimutkaisista tuotantoprosesseista kärsiville yrityksille tietojärjestelmän tehokas toiminta on elintärkeää. Sen avulla oikea aikainen tiedonvaihto mahdollistuu. Oikea-aikaisen tiedon avulla yritykset voivat minimoida niitä riskejä, jotka liittyvät äkillisiin teknologian muutoksiin ja tuotteiden

lyhyeen elinikään. Näin ollen oikea-aikainen tieto varastotasoista, tuotantoaikataulutuksesta sekä kysynnän ennustuksista on kriittistä. Se mahdollistaa yrityksille kyvyn liikkua ketterästi ja vastata markkinoiden muutoksiin ja toimittajien häiriöihin. Ketteryys (engl. agility) kuvaa yritysten kykyä mukautua kysynnän vaihteluihin ja täten tyydyttää kysyntä vaaditulla tasolla (Holdago & Niess, 2023). Tehokas yhteydenpito toimitusketjun sisällä on puolijohdeteollisuudessa erittäin tärkeää, jotta tiukkoihin markkinoilletuloaikavaatimuksiin kyetään vastaamaan. Toimitusketjun resilienssi paranee tietoteknisten integraatioiden vaikutuksesta vahvistaen liiketoimintaa (Liao ja muut, 2025). Kravchenko ja muut (2024) painottavat myös tutkimuksessaan oikea-aikaisen tiedon välittymisen merkitystä nopealle päätöksenteolle. Heidän mukaansa tietotekniikan tehokas hyödyntäminen niin omaan vahvistaa toimitusketjun resilienssiä.

Esimerkkinä kuljetusyhtiö DHL hyödyntää tietojärjestelmää kartoittamalla omaa toimitusketjua ja sen toimintaa kokonaisvaltaisesti. Järjestelmä rakentaa riskiprofiileja ja tunnistaa riskialueita. Tämä mahdollistaa toimitusketjun riskejä pienentävien toimien aloittamisen lähes reaaliajassa. (Ivanov ja muut, 2019). Tämän kaltainen järjestelmä on esimerkki yritysten nykyisin käyttämistä ennakoivien toimitusketjun häiriöiden ohjelmistoista. Vastaavia tietoteknisiä integraatioita käyttämällä voidaan tulevaisuudessa varautua häiriöihin ja vahvistaa puolijohteiden toimitusketjun resilienssiä.

4.2 Toimitusketjun hybridimalli

Puolijohdeteollisuudessa toimitusketjujen on oltava myös rakenteeltaan oikeanlaisia ja kestäviä, jotta tulevaisuuden häiriöiltä ja niiden seurauksilta vältytään parhaalla mahdollisella tavalla. Toimitusketjunhallinta ja suunnittelu on nykyisin tärkeää yritysten toiminnan kannalta. Oikeanlainen toteutus tuo yrityksille kilpailuetua (Fadaki ja muut, 2020). Nykypäivän muuttuvat markkinat ja huimaa vauhtia kehittyvä teknologia luo uudenlaisia haasteita yrityksille. Yritysten on kyettävä tarjoamaan kuluttajille laadukkaita tuotteita lyhyemmässä ajassa ja alhaisemmilla hinnoilla. Ratkaisuna edellä mainittuihin

haasteisiin on kehitetty niin sanottu leagile-strategia/toimitusketjumalli (Hashem & Aboelmaged, 2023). Leagile-strategian mukaan toimivaa toimitusketjua voidaan pitää eräänlaisena hybridimallin toimitusketjuna, koska siinä yhdistyy sekä Lean -ajattelusta tuttu hukkaa minimoiva periaate, että agile-toimitusketjumallin ketteryys (Fadaki ja muut, 2020; Hashem & Aboelmaged, 2023). Lean-ajattelussa keskeistä on lisäarvoa tuottamattomien prosessien eliminointi. Lean-elementti on ollut lähivuosisikymmenien aikana tärkeä osa toimitusketjumalleja asiakasarvon luoja ja liiketoiminnan edistäjänä. Toimitusketjumalleissa esiintyvä ketteryuden elementti, joka mahdollistaa nopeat operatiiviset muutokset, on tärkeä epävakauden vallitessa markkinoilla (Hashem & Aboelmaged, 2023).

Fadaki ja muut (2020) havaitsivat tutkimuksessaan tasapainotetun toimitusketjun johtavan parempaan suorituskykyyn yrityksen kannalta. Heidän mukaansa leagile-toimitusketjumalli on optimaalisin ratkaisu yritysten toiminnan kannalta. Tutkimus osoittaa markkinoiden epävarmuuden olevan keskeisin tekijä, joka määrää yritysten toimitusketjumallin muodon. Epävarmuuden vallitessa yritykset ajautuvat kauemmas optimaalisesta leagile-toimitusketjumallista. Epävarmuus markkinoille aiheuttaa suuren poikkeaman toimitusketjun muotoon ohjaamalla yrityksiä lean- tai agile-malliin. Murphyn ja muiden (2017) mukaan epävarmuus johtaa myös korkeaan varmuusvaraston tasoon. Fadakin ja muiden (202) tutkimus osoittaa, että turvallisten ja vankkojen markkinaolosuhteiden vallitessa yritykset kykenevät tasapainottamaan toimintansa paremmin ja omaksuvat teoreettisen optimiratkaisun eli leagile-toimitusketjumallin.

Holdago ja Niess (2023) painottivat varajärjestelyiden merkitystä toimitusketjun resilienssin kannalta. Näin ollen tärkeä toimitusketjun suorituskyvyn turvaaja ja resilienssin ylläpitäjä on optimaalinen varmuusvaraston taso. Kuten mainittua puolijohdeteollisuuden yritykset toimivat JIT-periaatteiden mukaisesti. Toisessa pääluvussa totesin JIT-toimintatapojen olevan toimivia ihanteellisten olosuhteiden vallitessa, mutta niiden nähtiin johtavat haavoittuvaisuuteen häiriöiden ilmetessä. Kun tähän yhdistetään Fadakin ja muiden (2020) tutkimustulokset siitä, kuinka epävarmat

olot ohjaavat yritysten toimitusketjumallia ja toimintaa poispäin optimaalisemmasta leagile-pisteestä, päästään tilanteeseen, jossa JIT-tehokkuuden ja varmuusvarastoinnin välille on kyettävä löytämään tasapaino.

Salameh ja Ghattas (2001) esittävät matemaattisen kaavan, jolla voidaan laskea optimaalinen JIT-varasto huoltokatkoksen ajaksi. He esittelevät artikkelissaan seuraavanlaisen esimerkin, jossa he vertaavat kolmea tosistaan eroavaa skenaariota. Kirjanlyhenne S tarkoittaa varmuusvaraston kokoa.

Koneen käynti aika, $T = 30$ päivää

Varmuusvaraston täyttönopeus, $\alpha = 15000$ yksikköä vuodessa

Kulutusnopeus, $\beta = 30000$ yksikköä vuodessa

Varastointikustannus, $h = 28$ \$/yksikkö/vuosi

Puutekustannus, $p = 1$ \$/puuttuva yksikkö

huoltokatkos, $t =$ vaihtelee tasaisesti yhden ja kolmen päivän välillä ($a=1, b=3$)

$$= \frac{h(\alpha + \beta)}{2\alpha\beta(B - a)} \ln\left(\frac{T + b}{T + a}\right) S^2 + \frac{2p\beta}{(2T + a + b)(b - a)} \left(\frac{b^2}{2} - \frac{b}{\beta}S + \frac{S^2}{2\beta^2}\right)$$

Kuva 2 laskuesimerkki

Taulukko 1 laskuesimerkin tulokset

	S	aiheutuneet kokonaiskustannukset:
ei varmuusvarastoa	0	\$2109,38
Optimaalinen varmuusvaraston taso	170,44	\$671,31
minimivarasto sille, että varasto ei lopu kesken, vaikka huolto kestäisi maksimiajan	250	\$984,7

Salamehin ja Ghattasin (2001) esittämä laskuesimerkki osoittaa, kuinka täydellinen varastottomuus johtaa suuriin kustannuksiin, koska tässä tapauksessa puutekustannukset kohoavat korkeiksi (\$2109,38). Laskenta myös todistaa 100 % varautumisen olevan kustannuksellisesti tehotonta. Optimaalinen ratkaisu löytyy kohdasta $S=170,44$. Tämän mukainen ratkaisu on kustannuksellisesti tehokkain ja järkevin ratkaisu yritykselle huoltokatkoksen ajaksi. Laskuesimerkin tulokset ovat nähtävissä taulukossa 1.

Vaikka Salamehin ja Ghattasin (2001) matemaattinen malli on kehitetty varmuusvarastotason optimointiin ennakoivan huoltokatkoksen ajaksi, voidaan sitä kuitenkin soveltaa tiettyjen häiriöiden tapauksessa puolijohdeteollisuuteen. Puolijohdeteollisuudessa häiriöiden kestoa ei voida tarkoin arvioida kuten mahdollista huoltokatkoa, mutta esimerkiksi huoltokatkon voi rinnastaa tulipaloon tai muuhun tuotannon osittain katkaisevaan häiriöön. Moktadirin ja Renin (2024) mukaan luonnon katastrofit ovat merkittävä toimitusketjun toiminnan häiriötekijä, ja niihin varautuminen kyseistä matemaattista mallia soveltamalla olisi tehokasta. Mallin oikeanlainen soveltaminen mahdollistaisi riittävän varmuusvaraston, mutta säilyttäisi puolijohdeteollisuudessa harjoitettavan JIT-toimintamallin tehokkuuden. Salamehin ja Ghattasin (2001) malli lisää toimitusketjun agiliteettiä eli siirtää toimitusketjun muotoa lean-niukkuudesta kohti ketterämpää muotoa. Näin ollen toimitusketjun toiminta ei menisi liian laihaan eli leaniin suuntaan, eikä varasto taso mukailisi täydellistä JIT-tehokkuutta. Näin puolijohdeteollisuuden toimitusketjussa esiintyvien häiriöiden vaikutusta toimitusvarmuudelle ja liiketoiminnalle voitaisiin ennaltaehkäistä.

Kyseinen varmuusvarastotason optimointi kulkee käsi kädessä Fadakin ja muiden (2020) tutkimustulosten kanssa siitä, kuinka kummankaan toimintamallin mukainen ääripää ei ole tehokas, vaan optimaalinen ratkaisu löytyy mallien keskikohdista. Choin ja muiden (2023) mukaan varastotason nostaminen ei tee toimitusketjusta resilientimpää. Heidän mukaansa tämä on yleinen harhaluulo. Korkea varastotaso jäykistää toimitusketjua sekä kohottaa kustannuksia.

Bhamra ja muut (2021) esittävät kolme konkreettista lähestymistapaa leagile-strategian luomiseksi. Ensimmäisessä menetelmässä peruskysyntä erotetaan piikkikysynnästä. Peruskysyntää, joka on tasaista, tulisi hoitaa kustannustehokkain lean-menetelmin. Piikkikysyntään tulisi taas vastata ketterällä agile-strategialla. Kirjoittajat ehdottavat myös pareto-periaatetta, jossa tuotteiden virtaa hallitaan myyntimääriin perustuen. 20 % myydyimmistä tuotteista noudattaisi lean-strategiaa noudattavia periaatteita, kun taas

80 % loppuosaa hallittaisiin ketterän agile-strategian avulla. Bhamra ja muut (2021) tuovat esille irtikytkentäpiste-hallintamenetelmän. Menetelmän mukaan lean-strategiaa noudatetaan toimitusketjun tiettyyn pisteeseen saakka. Tämän pisteen jälkeen toimitusketjun alavirran segmentissä toimitaan ketterää agile-strategiaa hyväksi käyttäen. Irtikytkentäpiste menetelmä olisi tehokas tapa luoda toimiva hybridimallinen leagile-strategiaa noudattava toimitusketjumalli puolijohdeteollisuuteen. Kyseisen menetelmän avulla puolijohteiden toimitusketju olisi resilientimpi, koska alkupään tuotannon osuus toimisi JIT-tehokkuutta noudattaen. Näin ollen alkupään puolijohteiden toimitusketjussa säästytäisiin varastointiin liittyviltä kuluilta. Ketterä-strategia tulisi käyttöön vasta puolijohteiden valmistusprosessin myöhemmässä vaiheessa. Tämä ehkäisisi Voasin ja muiden (2021) esittämää tilannetta, jossa tuotantokapasiteetti on jo allokoitu eri tarkoitukseen suunnattujen puolijohteiden tuotantoon. Ketteryys eliminoisi niukkuutta, jota esimerkiksi autoteollisuuden partaalla koettiin kysynnän muutoksen siirtäessä huomion keskipisteen muualle. Ketterä strategia puolijohteiden toimitusketjun loppupäässä poistaisi myös riskin, joka liittyy puolijohteiden lyhyeen elinikään.

5 Pohdinta

Tutkielmassa kartoitettiin puolijohteiden toimitusketjun heikkoja kohtia, jotka tekevät sen toiminnasta haaraan häiriöiden esiintyessä. Tutkielman tavoitteena oli esittää menetelmiä, joiden avulla puolijohteiden toimitusketjun toiminnasta saataisiin resilientimpi. Kyseisten tutkielmassa esitettyjen menetelmien avulla olisi mahdollista pienentää tulevaisuudessa ilmenevien häiriöiden seurauksia ja ennalta ehkäistä niitä.

Kirjallisuus korosti eritoten toimitusketjun sisäisen tiedonvaihdannan merkitystä. Kirjallisuudessa tämä nähtiin tärkeäksi tekijäksi, jota vahvistamalla puolijohteiden toimitusketjun resilienssi paranisi. Tutkielmassa käytetyt artikkelit korostivat myös operatiivisen päätännän ja ketteryuden merkitystä. Tehokkaan tiedonvaihdon sidosryhmien välillä tietoteknisiä integraatioita hyödyntäen voidaan todeta olevan mahdollistaja nopeisiin operatiivisiin päätöksiin. Operatiivisten päätösten merkitys korostuu häiriön tapahtuessa puolijohteiden toimitusketjussa. Tuotantolaitosten maantieteellinen hajauttaminen on kirjallisuuden perusteella merkittävää resilienssin kannalta. Geopoliittiset riskit ja luonnonkatastrofit aiheuttavat pienemmän häiriön puolijohteiden toimitusketjun toimintaan, mikäli valmistajien tuotantolaitokset sijaitsevat eripuolilla maapalloa. Puolijohteiden valmistajien tulisi kyetä monipuolistamaan toimittajien määrää. Näin ollen puolijohteiden tuotanto ei katkeaisi ja häiriöityisi toimittajan vaikeuksien takia. Tutkielman tulokset puhuvat myös oikeanlaisen toimitusketjumallin tärkeydestä. Puolijohteiden toimitusketjun suositellaan noudattavan hybridimallia, jossa yhdistyy JIT-ajattelun tehokkuus sekä agile-toimitusketjumallin ketteryys. Kirjallisuuden perusteella toimitusketjun resilienssi paranee, kun toimitusketjun alkupäässä noudatetaan JIT-tehokkuuta ja loppupäässä tuotantoon ja logistisiin ratkaisuihin liittyvät päätökset toteutetaan ketterän mallin mukaisesti.

Tutkielman tuloksiin pohjautuen puolijohdeteollisuuden yritykset voisivat ottaa käyttöön tutkielmassa esiteltyjä keinoja. Niiden avulla puolijohteiden toimitusketjun resilienssi kehittyisi vahvemmaksi ja kansainvälisten saatavuushäiriöiden vaikutukset

kyettäisiin mitätöimään ja ennaltaehkäisemään. Tulevaisuudessa puolijohteiden toimitusketjun resilienssin vahvistamisen tulisi olla systemaattista ja järjestelmällistä. Kirjallisuus antoi näyttöä siitä, kuinka proaktiivinen kehittäminen on toimivaa ja tehokasta. Täten puolijohteiden parissa toimivien yritysten tulisi aktiivisesti parantaa ja hakea kestäviä ratkaisuja, joiden avulla toimitusketjun toiminta pysyisi vahvana myös epävarmojen olojen vallitessa.

On mielenkiintoista nähdä miten tulevaisuudessa yritykset käyttäytyvät ja reagoivat, mikäli vastaavanlaisia häiriöitä esiintyy toimitusketjussa. Tulevaisuudessa puolijohdeteollisuuden yrityksiltä tullaan vaatimaan paljon sietokykyä sekä heidän tulee sopeutua muuttuviin oloihin. Esimerkiksi Kiinan mahdollisten valtapyrkimysten toteutumisen myötä on mielenkiintoista nähdä häiriöityykö puolijohteiden saatavuus, vai ovatko esimerkiksi autovalmistajat onnistuneet vähentämään riippuvuuttaan Taiwanin suuntaan. Jatkotutkimuksessa olisi mielenkiintoista tutkia puolijohteita hyödyntävän yrityksen toimintaa ja heidän konkreettisia toimia toimitusketjun resilienssin kehittämiseksi.

Lähteet

- Ayou, N. (2024). *Materials and Inventory Management*. Baker & Taylor Publisher Services (BTPS).
- Bhamra, R., Nand, A., Yang, L., Albregard, P., Azevedo, G., Corraini, D., & Emiliasiq, M. (2021). Is leagile still relevant? A review and research opportunities. *Total quality management & business excellence*, 32(13-14), 1569-1593. <https://doi.org/10.1080/14783363.2020.1750360>
- Boell, S. K., & Cecez-Kecmanovic, D. (2015). *What is an Information System?* IEEE. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2015.587>
- Cheng, T. C., & Podolsky, S. (1996). *Just-in-time manufacturing: an introduction*. Springer Science & Business Media.
- Choi, T. Y., Netland, T. H., Sanders, N., Sodhi, M. S., & Wagner, S. M. (2023). Just-in-time for supply chains in turbulent times. *Production and operations management*, 32(7), 2331-2340. <https://doi.org/10.1111/poms.13979>
- Dolgui, A., & Ivanov, D. (2021). Ripple effect and supply chain disruption management: New trends and research directions. *International journal of production research*, 59(1), 102-109. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1840148>
- Dolgui, A., Ivanov, D., & Rozhkov, M. (2020). Does the ripple effect influence the bullwhip effect? An integrated analysis of structural and operational dynamics in the supply chain. *International journal of production research*, 58(5), 1285-1301. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1627438>
- Fadaki, M., Rahman, S., & Chan, C. (2020). Leagile supply chain: Design drivers and business performance implications. *International journal of production research*, 58(18), 5601-5623. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1693660>
- Fitch, A., & Yang, J. (2022). Chip-Making Juggernaut TSMC Eyes Multibillion-Dollar Arizona Factory Expansion; New facility would produce cutting edge 3-nanometer semiconductors. *The Wall Street journal. Eastern edition*.
- Ghadge, A., Er, M., Ivanov, D., & Chaudhuri, A. (2022). Visualisation of ripple effect in supply chains under long-term, simultaneous disruptions: A system dynamics approach. *International journal of production research*, 60(20), 6173-6186. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1987547>

- Graves, S. C. (1987). Safety stocks in manufacturing systems
- Gross, J. M., & McInnis, K. R. (2003). *Kanban Made Simple*. Amacom.
- Hashem, G., & Aboelmaged, M. (2023). Leagile manufacturing system adoption in an emerging economy: An examination of technological, organizational and environmental drivers. *Benchmarking : an international journal*, 30(10), 4569-4600. <https://doi.org/10.1108/BIJ-03-2022-0199>
- Holgado, M., & Niess, A. (2023). Resilience in global supply chains: Analysis of responses, recovery actions and strategic changes triggered by major disruptions. *Supply chain management*, 28(6), 1040-1059. <https://doi.org/10.1108/SCM-01-2023-0020>
- Ivanov, D., Dolgui, A., & Sokolov, B. (2019). The impact of digital technology and Industry 4.0 on the ripple effect and supply chain risk analytics. *International journal of production research*, 57(3), 829-846. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1488086>
- Ivanov, D., Dolgui, A., Sokolov, B., & Ivanova, M. (2017). Literature review on disruption recovery in the supply chain. *International journal of production research*, 55(20), 6158-6174. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1330572>
- JapanManagementAssociation, Bodek, N., & Lu, D. (1985). *Kanban Just-in Time at Toyota*. Routledge.
- Kravchenko, K., Gruchmann, T., Ivanova, M., & Ivanov, D. (2024). Responding to the ripple effect from systemic disruptions: Empirical evidence from the semiconductor shortage during COVID-19. *Modern supply chain research and applications*, 6(4), 354-375. <https://doi.org/10.1108/MSCRA-03-2024-0011>
- Lee J. Krajewski & Malhotra, M. (2024). *Operations Management: Processes and Supply Chains, Global Edition*. Pearson Education (UK).
- Liao, Z., Tantai, B., Abdul-Hamid, A., Mukhtar, D., & Ali, M. H. (2025). Exploring resilience in the downstream supply chain of the semiconductor industry: The mediating roles of risk mitigation, process simplification, and flexibility. *International journal of production economics*, 281, 109530. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2025.109530>
- Lim, A. H. Y., & Tan, C. L. (2018). JIT and supply chain disruptions following a major disaster: A case study from the auto industry. *Global Business and Organizational Excellence*, 37(6), 51-58. <https://doi.org/10.1002/joe.21887>

- Liu, R. C., Tang, H., Kao, Y., & Chou, Y. (2025). From vulnerabilities to resilience: Taiwan's semiconductor industry and geopolitical challenges. *Telecommunications policy*, 49(4), 102951. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2025.102951>
- Luo, X., Kang, K., Lu, L., & Ke, Y. (2024). Research on Investment and Coordination Strategies for Supply Chain Resilience under Supply Disruption Risk. *Symmetry (Basel)*, 16(9), 1192. <https://doi.org/10.3390/sym16091192>
- Ma, M. (2024). A Study on the Game Strategy of Chip Price Behavior at the Background of the US-China Trade War. *SHS web of conferences*, 188, 03012. <https://doi.org/10.1051/shsconf/202418803012>
- Moktadir, M. A., & Ren, J. (2024). Global semiconductor supply chain resilience challenges and mitigation strategies: A novel integrated decomposed fuzzy set Delphi, WINGS and QFD model. *International journal of production economics*, 273, 109280. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2024.109280>
- Muller, M. (2011). *Essentials of inventory management*. AMACOM Division of American Management Association International.
- Nicholas John M. & Schonberger, R. (2018). *Lean production for competitive advantage: A comprehensive guide to lean methods and management practices* (2nd edition.). CRC Press.
- Murphy, Knemeyer, A., & Knemeyer, A. M. (2017). *Contemporary Logistics, Global Edition*. Pearson.
- Pazek, K. (2021). *Lean Manufacturing*. IntechOpen.
- Ramani, V., Ghosh, D., & Sodhi, M. S. (2022). Understanding systemic disruption from the Covid-19-induced semiconductor shortage for the auto industry. *Omega (Oxford)*, 113, 102720. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2022.102720>
- Salameh, M., & Ghattas, R. (2001). Optimal just-in-time buffer inventory for regular preventive maintenance. *International journal of production economics*, 74(1), 157-161. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(01\)00122-0](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(01)00122-0)
- Santos, J., Wysk, R. A., & Torres, J. M. (2006). *Improving production with lean thinking*. John Wiley & Sons, Incorporated.
- Shukla, H. M., Harkare, A. H., Borghare, S., & Ghatole, Y. (2025). Root Cause Analysis of Global Semiconductor Shortage: A Comprehensive Theoretical

Framework. *Journal of the Institution of Engineers (India) Series C*.
<https://doi.org/10.1007/s40032-025-01300-x>

Tse, Y. K., Dong, K., Sun, R., & Mason, R. (2024). Recovering from geopolitical risk: An event study of Huawei's semiconductor supply chain. *International journal of production economics*, 275, 109347.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2024.109347>

Voas, J., Kshetri, N., & DeFranco, J. F. (2021). Scarcity and Global Insecurity: The Semiconductor Shortage. *IT professional*, 23(5), 78-82.
<https://doi.org/10.1109/MITP.2021.3105248>

Xiong, W., Wu, D. D., & Yeung, J. H. Y. (2025). Semiconductor supply chain resilience and disruption: Insights, mitigation, and future directions. *International journal of production research*, 63(9), 3442-3465.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2387074>

Ziarnetzky, T., Monch, L., & Uzsoy, R. (2020). Simulation-Based Performance Assessment of Production Planning Models With Safety Stock and Forecast Evolution in Semiconductor Wafer Fabrication. *IEEE transactions on semiconductor manufacturing*, 33(1), 1-12.
<https://doi.org/10.1109/TSM.2019.2958526>