

# **Systemiajattelu insinöörialoilla**

Konetekniikka  
kandidaatintutkielma

Laatija:  
Veeti Virta

07.05.2025  
Turku

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

Kandidatutkielma

**Oppiaine:** Konetekniikka

**Tekijä(t):** Veeti Virta

**Otsikko:** Systeemiajattelu insinöörialoilla

**Ohjaaja(t):** Yliopistolehtori Jani Heikkinen

**Sivumäärä:** 26 sivua

**Päivämäärä:** 07.05.2025

Kandidaatintutkielmassa selvitettiin, miten systeemiajattelua hyödynnetään eri insinöörialoilla sekä mitä hyötyjä ja haasteita siihen liittyy. Työn tavoitteena oli muodostaa kokonaiskuva systeemiajattelun soveltamisesta insinöörialoilla. Lisäksi tarkasteltiin, kuinka systeemiajattelu edesauttaa monimutkaisten järjestelmien suunnittelua, integraatiota ja päätöksentekoa. Tutkimus toteutettiin laajan kirjallisuuskatsauksen avulla. Kirjallisuuskatsauksessa analysoitiin insinööritieteiden alan tieteellistä kirjallisuutta erityisesti systeemiajattelun näkökulmasta.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella todettiin, että systeemiajattelua sovelletaan laajasti eri insinöörialoilla, kuten konetekniikassa, tietotekniikassa, ilmailu- ja avaruusteknologiassa sekä automaatiosuunnittelussa. Kirjallisuuden mukaan systeemiajattelun keskeisiksi hyödyiksi tunnistettiin parantunut monimutkaisuuden hallinta ja modulaarinen järjestelmäsuunnittelu. Lisäksi se mahdollistaa osajärjestelmien tehokkaamman integraation ja parantaa päätöksenteon tukemista. Haasteina tunnistettiin organisaatiokulttuurin muutos ja vaikeudet mitata ja kouluttaa systeemiajattelun osaamista. Lisäksi monimutkaisten mallinnusprosessien hallinta todettiin ongelmalliseksi. Kirjallisuudessa korostettiin myös mallipohjaista systeemisuunnittelua (MBSE) keskeisenä menetelmänä. Systemidynamiikka sekä yhteistoiminnallinen systeemiajattelu (CST) mainittiin myös merkittävinä lähestymistapoina.

Kokonaisuutena voidaan selkeästi todeta, että tämä tutkimus tukee laajasti kirjallisuudessa esitettyjä väitteitä, jotka korostavat systeemiajattelun merkitystä ja hyötyjä. Tulosten mukaan systeemiajattelun omaksuminen lisää järjestelmien kestävyyttä, turvallisuutta ja tehokkuutta erityisesti monimutkaisissa, verkottuneissa toimintaympäristöissä.

**Avainsanat:** mallipohjainen järjestelmäsuunnittelu (MBSE), systemidynamiikka, yhteistoiminnallinen systeemiajattelu (CST), monimutkaisten järjestelmien hallinta, insinöörialat

<b>1</b>	<b>Johdanto</b>	<b>1</b>
1.1	Systeemiajattelu eri insinöörialoilla	1
1.2	Merkitys nykypäivän insinöörityössä	2
<b>2</b>	<b>Kirjallisuus katsaus</b>	<b>4</b>
2.1	Konetekniikka	4
2.2	Tietotekniikka	7
2.3	Ilmailu- ja avaruusteknologia	10
2.4	Automaatio teknologia	14
<b>3</b>	<b>Analyysi</b>	<b>17</b>
<b>4</b>	<b>Johtopäätökset</b>	<b>24</b>
<b>5</b>	<b>Yhteenveto</b>	<b>26</b>
<b>6</b>	<b>Lähteet</b>	<b>27</b>



# 1 Johdanto

Systeemiajattelulla on pitkät juuret. Sen perusajatusten voidaan katsoa ulottuvan jo yleisen systeemiteorian varhaisiin aikoihin 1900-luvun puolivälissä, jolloin esimerkiksi Ludwig von Bertalanffy alkoi hahmotella organisoituja kokonaisuuksia selittäviä periaatteita. Itse systeemiajattelun käsitteen on todettu juontavan juurensa tekniikan, yhteiskuntapolitiikan ja filosofian varhaisista perusteista [1]. Toisin kuin vakiintuneilla luonnontieteen aloilla kuten matematiikassa tai fysiikassa, systeemiajattelulle ei kuitenkaan muodostunut yhtä yhtenäistä sanastoa tai teoriaa vuosikymmenten saatossa [1]. Alan tutkijat ovatkin korostaneet tarvetta selkeyttää ja yhdenmukaistaa systeemiajattelun kieltä ja peruskäsitteitä, jotta eri alojen insinöörit ja tutkijat ymmärtäisivät toisiaan paremmin [1]. Tämä kehitys on johtanut siihen, että systeemiajattelua on kehitetty useissa aalloissa ja eri näkökulmista esimerkiksi kova systeemiajattelu on kehitetty teknisiin järjestelmiin sekä pehmeät lähestymistavat sosio-tekniisiin ongelmiin. Ennen nykyisen laaja-alaisen systeemiajattelun muodostumista.

## 1.1 Systeemiajattelu eri insinöörialoilla

Ajan myötä systeemiajattelun periaatteita on alettu soveltaa laajasti eri insinöörialoilla. Konetekniikassa ja tuotantoteollisuudessa systeemiajattelu näkyy esimerkiksi mallipohjaisessa systeemisuunnittelussa (MBSE), jossa pyritään alusta asti huomioimaan tuotteiden koko elinkaari, osien keskenäiset riippuvuudet ja järjestelmätason vaatimukset. Autoteollisuudessa hyödynnetään MBSE-metodeja ajoneuvojen kasvavan kompleksisuuden hallintaan, minkä tavoitteena on luoda selkeä rakenteellinen malli ajoneuvon osakokonaisuuksien vuorovaikutuksille ja hallita muutoksia järjestelmätasolla [2].

Tietotekniikan alalla systeemiajattelun tarve on ilmeinen, ohjelmistojärjestelmistä on tullut niin monimutkaisia, että perinteiset lineaariset suunnittelumallit eivät riitä. Ohjelmistotalalla onkin havaittu projektiepäonnistumisten olevan jatkuvasti korkealla tasolla [3]. Vain noin kolmannes suurista ohjelmistoprojekteista onnistuu nykyään tavoitteissaan, mikä on lisännyt kiinnostusta soveltaa systeemiajattelua ohjelmistokehityksen johtamiseen ja suunnitteluun. Epäonnistumisia on pyritty vähentämään esimerkiksi tekoälypohjaisella lähestymistavalla, jossa systeemiajattelun avulla ennakoitaan ohjelmistoprojektien epäonnistumisen syitä ja pyritään parantamaan projektien hallintaa [3].

Myös muilla insinöörialoilla, kuten automaatio- ja ilmailutekniikassa, on alettu soveltaa systeemiajattelua. Nämä alat käsittelevät laajoja, toisiinsa kytkeytyviä järjestelmiä, joissa systeemiajattelu auttaa hahmottamaan eri osien yhteisvaikutukset. Yhteistä eri aloille on, että

systemiajattelun avulla pystytään yhdistämään monien erillisten erikoisalojen näkökulmat yhdeksi kokonaiskuvaksi, mikä on ratkaisevaa monimutkaisten insinööri-ongelmien ratkaisemisessa. [4] [5]

## 1.2 Merkitys nykypäivän insinööriyössä

Nykypäivänä systemiajattelu on tärkeämpää kuin koskaan. Modernit tekniset projektit ja ympäristöt ovat entistä monimutkaisempia, dynaamisempia ja globaalisti kytkeytyneitä. Systemiajattelu on ominaisuus, joka mahdollistaa kokonaiskuvan hahmottamisen, ja siksi se on kriittisen tärkeä taito nykyajan insinööreille [6]. Systemiajattelun taidot antavat insinöörielle kyvyn ymmärtää monimutkaisten järjestelmien käyttäytymistä ja vuorovaikutuksia laajassa mittakaavassa. Systemiajattelu on ominaisuus, jota tarvitaan esimerkiksi järjestelmäarkkitehtuurin suunnittelussa, turvallisuuskriittisten järjestelmien hallinnassa sekä kestävä kehityksen haasteiden ratkaisemisessa. Yritykset ja teollisuusorganisaatiot toimivat nykyään erittäin monimutkaisessa ja epävarmassa toimintaympäristössä [7][2]. Tähän liittyvät ilmiöt, kuten digitalisaatio ja globalisaatio, vaativat kokonaisvaltaista lähestymistapaa. Erilliset osaratkaisut eivät riitä, vaan on ymmärrettävä systeemin kaikki osat ja niiden keskinäiset vaikutukset.

Kiinnostus systemiajatteluun on viime vuosina kasvanut entisestään ja laajentunut uusille alueille. Systemiajattelun tutkimuksessa on neljä keskeistä painopistettä, jotka ovat kompleksisuus, järjestelmäinsinööriyö, systemiajattelun käytännöt sekä systeemidynamiikkamallinnus [8]. Tämä heijastaa sitä, että systemiajattelua hyödynnetään yhtä lailla monitahoisten teknisten ongelmien hallinnassa kuten kompleksisuuden hallinnassa ja mallinnuksessa, toisaalta organisaatio- ja prosessitasolla sitä käytetään esimerkiksi johtamisessa. Resilienssi on noussut tärkeäksi teemaksi, finanssialalla on sovellettu systemiajattelua pankkisektorin digitaalisen murroksen hallintaan, jotta ymmärrettäisiin paremmin liiketoimintaprosessien ja teknologian yhteisvaikutukset sekä parannettaisiin järjestelmien palautumiskykyä häiriötilanteissa [7]. Samoin ilmailu- ja avaruustekniikassa on alettu puhua systemiajattelusta kriittisenä lähestymistapana vaativien järjestelmien kuten satelliittikonstellatioiden tai miehitettyjen avaruusalusten suunnittelussa ja ylläpidossa [9].

Tässä tutkielmassa tarkastellaan systemiajattelun soveltamista eri insinöörialoilla, kuten konetekniikassa, tietotekniikassa, automaatio suunnittelussa ja ilmailuteknologiassa. Systemiajattelu tarjoaa kokonaisvaltaisen näkökulman monimutkaisten järjestelmien suunnitteluun ja hallintaan, mikä on erityisen tärkeää nykypäivän teknisissä projekteissa.

Tutkimuskysymykset ovat 1. Miten systeemiajattelua sovelletaan eri insinöörialoilla? 2. Mitkä ovat systeemiajattelun keskeiset hyödyt ja haasteet? 3. Kuinka systeemiajattelu edistää monimutkaisten järjestelmien suunnittelua, integraatiota ja päätöksentekoa eri insinöörialoilla?

## 2 Kirjallisuus katsaus

### 2.1 Konetekniikka

Systemiajattelu konetekniikassa tarkoittaa, että laitteiden ja järjestelmien kehittämisessä sekä suunnittelussa huomioidaan tuotteen koko elinkaari, osien vuorovaikutussuhteet toisiinsa ja laajat järjestelmätason vaatimukset. Tällainen kokonaisvaltainen lähestymistapa auttaa ennakoimaan tuotteen toimivuutta ja välttämään tulevia ongelmia jo varhain suunnitteluprosessissa [10]. Ongelmien varhainen havaitseminen nopeuttaa suunnittelua ja pienentää myöhäisistä korjauksista aiheutuvia kustannuksia. Valmistavassa teollisuudessa systemiajattelun hyödyt korostuvat erityisesti suunnittelun alkuvaiheissa, sillä aivan alkuvaiheen päätöksillä on suurin vaikutus lopputulokseen, projektiin käytettyyn aikaan ja kustannuksiin [2].

#### **Mallipohjainen järjestelmäsuunnittelu (MBSE)**

Viime vuosina mallipohjainen järjestelmäsuunnittelu (MBSE, Model-Based Systems Engineering) on yleistynyt konetekniikan tuotekehityksessä. MBSE:n avulla yhdistetään systemiajattelun periaatteet tuotesuunnittelun alkuvaiheista aina valmistukseen asti. MBSE:n suosion taustalla on tuotteiden kuten ajoneuvojen kompleksisuuden kasvu, mikä on lisännyt merkittävästi tarvittavan datan ja mallien määrää. Tätä kasvavaa tietomäärää pyritään hallitsemaan kehittämällä alakohtaisia mallinnuskieliä [2]. MBSE:n tavoitteena on tuottaa tuotteesta kokonaisvaltainen kuva, joka sisältää laajat ja helposti ymmärrettävät tekniset mallit tuotteista. Mallien avulla voidaan karsia epäolennaista tietoa, mikä parantaa koko järjestelmän ymmärrettävyyttä [2]. Näin eri sidosryhmien, kuten suunnittelijoiden ja valmistajien, on helpompi hahmottaa kokonaisuus ja siihen vaikuttavat tekijät.

MBSE on osoittautunut erityisen tehokkaaksi myös modulaarisessa suunnittelussa. Se tarjoaa selkeän rakenteen eri moduulien välisille rajapinnoille, minkä ansiosta muutosten hallinta onnistuu suuriinkin järjestelmiin kuuluvissa osakokonaisuuksissa [10]. Tällä lähestymistavalla helpotetaan kokonaisuuden hallintaa. Modulaarisen rakenteen myötä yksittäisiä osia voidaan kehittää tai vaihtaa ilman, että koko järjestelmää tarvitsee suunnitella uudelleen [10].

## **Monitieteinen suunnittelu ja mekatroniikka**

Monimutkaisissa koneteknisissä tuotteissa korostuu tarve yhdistää useiden eri alojen osaamista, esimerkiksi hydrauliiikkaa ja elektroniikkaa, mitä kutsutaan mekatroniikaksi [11]. Perinteisessä tuotekehitysprosessissa pyritään usein optimoimaan tuote osa kerrallaan ja keskitytään liaksi yksittäisiin komponentteihin valittaessa parhaita menetelmiä ja materiaaleja. Tällainen lähestymistapa saattaa johtaa ongelmiin osien yhteensopivuudessa, erityisesti mekatronisissa järjestelmissä, joissa usean alan komponenttien on toimittava saumattomasti yhdessä. Systemiajattelu tarjoaa monitieteisen näkökulman, jonka keinoin voidaan varmistaa myös keskenään täysin erilaisten osien rajapintojen toimivuus [12]. Elektroniikkaa sisältävien koneiden suunnittelussa on tätä varten kehitetty VDI 2206 -standardi, joka luo menetelmät eri tekniikan alojen yhdistämiselle yhteisen viitekehyksen kautta. Standardi määrittelee yhteiset rajapinnat ja vuorovaikutukset eri osajärjestelmien välille [12], mikä helpottaa mekaniikan, elektroniikan, ohjaustekniikan ja ohjelmistojen yhdistämistä yhtenäiseksi kokonaisuudeksi.

Mekatronisten järjestelmien kehitys on moniulotteinen prosessi, joka vaatii muutakin kuin perinteistä koneteknistä osaamista. Yleinen käytäntö on ollut kehittää mekatroniikkajärjestelmä käyttäen pohjana yhtä lähtöratkaisua ja muokata sitä tarpeiden mukaan. Tämän lähestymistavan rajoituksena on innovatiivisuuden kapeneminen sekä mahdolliset iteratiiviset takaisinkytkennät suunnittelussa, mikä voi nostaa kustannuksia ja pidentää läpimenoaikoja [11]. Systemiajatteluun pohjautuvat menetelmät ja standardit, kuten edellä mainittu VDI 2206 auttavat vastaamaan tähän haasteeseen tarjoamalla selkeän rakenteen. Monialainen integraatio voidaan toteuttaa hallitusti ilman, että järjestelmän jokainen osa optimoidaan erikseen muiden kustannuksella.

## **Sarjapohjainen rinnakkaissuunnittelu (SBCE)**

Sarjapohjainen rinnakkaissuunnittelu (SBCE, Set-Based Concurrent Engineering) on yksi lähestymistapa, jolla monialaisen tuotesuunnittelun haasteita voidaan ratkaista. SBCE korostaa monien mahdollisten ratkaisujen yhtäaikaista kartoittamista ja vaiheittaista karsintaa optimaalisen tai lähes parhaan toteutuksen löytämiseksi [11]. Suurin SBCE:n käyttäjä Toyota käyttää mallia mekatronisten laitteiden suunnittelussa. SBCE:n periaatteisiin kuuluvat laaja erilaisten ratkaisuvaihtoehtojen tarkastelu, vaihtoehtojen jakaminen, avoin kommunikointi, leikkauspisteiden hyödyntäminen vaihtoehtojen integroinnissa eli eri ratkaisuvaihtoehtojen

yhdisteleminen lopullisessa ratkaisussa sekä toteutettavuuden varmistaminen koko prosessin ajan [11].

Kokeelliset tulokset osoittavat, että kattavan SBCE-suunnitteluprosessin avulla laajasta ratkaisujoukosta voidaan tehokkaasti edetä viimeistelyyn ja suorituskykyiseen tuoteratkaisuun [11]. Ammar ym. [11] kuvaavat esimerkkinä elektronisen kaasuläpän suunnittelua SBCE:n avulla. Siinä yhdistyy useita osajärjestelmiä kuten moottori, sensorit, ohjausyksikkö ja mekaaniset osat, mikä havainnollistaa SBCE:n kykyä hallita monimutkaista mekatronista kokonaisuutta. SBCE soveltuu hyvin modernien koneteknisten tuotteiden suunnitteluun, sillä lähes kaikki nykyaikaiset koneet ovat mekatronisia järjestelmiä. On kuitenkin huomioitava, että SBCE:n onnistunut käyttöönotto vaatii tiivistä yhteistyötä eri suunnittelutiimien välillä, selkeästi määriteltyjä tuoteominaisuuksien prioriteetteja sekä iteratiivisia arviointikriteereitä suunnitteluratkaisujen valinnassa [11].

### **Systemiajattelun hyödyt**

**Kokonaisvaltainen suunnittelunäkökulma** – Systemiajattelu varmistaa, että tuotteen elinkaari ja osien keskinäiset riippuvuudet huomioidaan alusta alkaen, mikä auttaa ennakoimaan toimivuutta ja ehkäisee ongelmia jo etukäteen [10] [2].

**Tehostettu modulaarisuus** – MBSE luo selkeän rakenteen moduulien rajapinnoille, mikä helpottaa muutosten hallintaa laajoissakin järjestelmissä ja lisää suunnittelun joustavuutta [10].

**Monialainen integraatio** – Systemiajattelun periaatteet ja standardit kuten VDI 2206 mahdollistavat eri teknisten alojen sujuvan yhdistämisen ja varmistavat erilaisten osien yhteensopivuuden samassa järjestelmässä [12].

**Laajempi innovaatioalue** – SBCE-lähestymistapa rohkaisee tarkastelemaan useita ratkaisuvaihtoehtoja rinnakkain, mikä lisää innovatiivisuutta ja auttaa löytämään optimaalisia ratkaisuja monimutkaisiin suunnitteluongelmiin [11].

**Lyhyemmät kehitysajat** – Vaihtoehtojen laaja tarkastelu ja virheiden varhainen eliminointi SBCE-prosessissa voivat nopeuttaa tuotekehitystä ja vähentää myöhäisten muutosten tarvetta, mikä pienentää kokonaiskustannuksia [11].

## 2.2 Tietotekniikka

Tietotekniikan järjestelmistä on tullut yhä monimutkaisempia, eikä perinteisillä lineaarisilla lähestymistavoilla pystytä enää hallitsemaan niitä riittävästi. Tietotekniikan alalla systeemiajattelua voidaan hyödyntää monin tavoin, esimerkiksi ohjelmistokehityksen optimoinnissa, IT-järjestelmien hallinnassa sekä digitaalisen transformaation resilienssin vahvistamisessa [7][13]. Systeemiajattelun soveltaminen mahdollistaa kompleksisten ongelmien ymmärtämisen, hallinnan ja ratkaisemisen kokonaisvaltaisesti. Tämä on erityisen tärkeää esimerkiksi laajoissa ohjelmistoprojekteissa, mallipohjaisessa ohjelmistokehityksessä, tekoälysovelluksissa sekä pankkisektorin digitaalisen murroksen yhteydessä [14].

### IT-järjestelmien hallinta ja systeemidynamiikka

IT-järjestelmien hallinnassa tarvitaan kokonaisvaltainen näkökulma, jossa tekniset, organisatoriset ja taloudelliset tekijät huomioidaan ja integroidaan keskenään. Systeemiajattelun yksi osa-alue, systeemidynamiikka, tarjoaa menetelmiä mallintaa IT-järjestelmien monimutkaisia vuorovaikutussuhteita. Systeemidynamiikan avulla voidaan esimerkiksi arvioida suunniteltujen hyötyjen realisoitumista, tunnistaa kausaalisia silmukoita eli takaisinkytkentöjä ja arvioida palautteen vaikutuksia järjestelmän toimintaan. Tällainen analyysi auttaa tekemään tietoon perustuvia päätöksiä ja optimoimaan IT-järjestelmien suorituskykyä. Kokonaisuutena systeemidynamiikka tukee päätöksentekoa tuomalla esiin monimutkaisten riippuvuuksien vaikutukset, joita perinteisillä menetelmillä voisi olla vaikea havaita. [14]

### Mallipohjainen ohjelmistokehitys

Mallipohjainen systeemiajattelu ei ole vielä laajasti käytössä kaikissa ohjelmistokehityksen yhteyksissä, vaikka siitä olisi huomattavaa hyötyä kokonaisuuden hahmottamisessa. Yksi syy hitaaseen omaksumiseen voi olla ohjelmoinnin korkeatasoinen abstraktiotaso, joka tekee mallintamisesta haastavaa perinteisessä koodaustyössä. Mallinnuksen hyöty ohjelmistokehityksessä on kuitenkin juuri perspektiivin laajentaminen, mallien avulla kehittäjät näkevät järjestelmän rakenteen ja toiminnan laajasti yleisellä tasolla. [15]

Mallipohjaisen ohjelmistosuunnittelun merkitys kasvaa ohjelmistojen koon ja monimutkaisuuden lisääntyessä. MBSE:n avulla ohjelmistokehitystä voidaan jäsentää hierarkkisenä systeeminä mallintamalla jokainen kehitysvaihe systemaattisesti [15]. Mallin

tulee olla johdonmukainen ja osajärjestelmien rajapintojen tulee toimia täydellisesti, jotta eri komponentit integroituvat saumattomasti. Tällainen lähestymistapa vähentää kehitysprosessin epävarmuutta, tukee iteratiivista suunnittelua ja parantaa järjestelmien jäljitettävyyttä. Lisäksi se edistää ohjelmiston paremmin toimivaa ja käyttäjäystävällisempää lopputulosta. Esimerkiksi UML-mallinnuksen käyttäminen eri järjestelmätasoilla on linjassa systeemiajattelun periaatteiden kanssa ja varmistaa johdonmukaisen kehitysprosessin [15]. Mallipohjaisuus tarjoaa yhteisen kielen kehittäjille, mikä vähentää väärinymmärryksiä ja virheitä jo suunnitteluvaiheen alussa [15].

### **Kyberturvallisuus ja digitaalinen resilienssi**

Tietoturva on yksi tietotekniikan keskeisimpiä osa-alueita, ja sen merkitys kasvaa jatkuvasti kyberhyökkäysten kehittyessä. Erityisesti kriittisten tietojen ja infrastruktuurien kyberturvallisuuden tulee olla korkealla tasolla. Monimutkaisten uhkakuvien ja riskien ymmärtämiseksi ja hallitsemiseksi tarvitaan systeemiajattelua. Kriittisen infrastruktuurin kyberturvallisuus edellyttää kokonaisvaltaista lähestymistapaa, jossa teknologia, standardointi sekä organisaation resilienssi yhdistyvät [13]. Digitalisaation myötä uhat ja hyökkäykset monimutkaistuvat nopeasti, mikä vaatii koko järjestelmän kattavia suojausstrategioita yksittäisten suojauskeinojen sijasta. Systeemiajattelun avulla voidaan kehittää moniulotteisia kyberturvallisuuskalleja, joissa huomioidaan sekä ennakoiva uhkien hallinta että reaktiiviset toimenpiteet, samoin kuin organisaation sopeutumiskyky jatkuvasti muuttuvassa uhkaympäristössä [13].

Digitalisoituminen asettaa erityisiä haasteita esimerkiksi pankkisektorille, jossa käsitellään arkaluontoisia tietoja sekä raha-asioita. Pankkialalla tietojärjestelmien on oltava äärimmäisen turvallisia, ja samalla on huolehdittava sujuvasta asiakaskokemuksesta ja liiketoiminnan jatkuvuudesta. Systeemiajatteluun pohjautuvaa resilienssikehystä on ehdotettu ratkaisuksi pankkien digitaalisen murroksen haasteisiin [7]. Tällaisen kehyksen avulla voidaan tunnistaa kriittiset järjestelmäelementit ja varmistaa, että ne kestävät ulkoisia häiriöitä ja muutoksia tehokkaasti. Systeemiajattelun avulla organisaation resilienssiä rakennetaan tunnistamalla laajasti erilaisia haavoittuvuuksia ja löytämällä monipuolisia keinoja niiden ehkäisemiseksi [7]. Olennainen osa tätä on myös syvällisen ymmärryksen hankkiminen mahdollisista uhista ja niiden sijoittaminen osaksi koko järjestelmää ja toimintaympäristöä. Järjestelmätason ajattelu varmistaa, että kyberturvallisuusratkaisut toimivat saumattomasti osana olemassa olevia

prosesseja ja järjestelmiä, jolloin uusien suojausmekanismien käyttöönotto ja ylläpito onnistuvat luontevasti. Ratkaisujen toimivuutta arvioidaan laadun, toteutukseen tarvittavan ajan sekä kustannusten näkökulmasta, ja kaikki vaiheet suunnittelusta toteutukseen toteutetaan huomioiden järjestelmän elinkaari kokonaisuudessaan [7][13].

### **Systemiajattelun hyödyt**

**Kokonaisvaltainen ongelmanratkaisu** – Systemiajattelu auttaa jäsentämään monimutkaiset IT-ongelmat kokonaisuutena, mikä parantaa ymmärrystä ja ratkaisujen laatua [14].

**Tietopohjainen päätöksenteko** – Systemidynamiikan avulla voidaan mallintaa IT-järjestelmien monisyisiä riippuvuuksia ja tunnistaa palautesilmukoita, mikä tukee optimoitua ja perusteltua päätöksentekoa [14].

**Laajempi kehitysnäkymä** – Mallien käyttö ohjelmistokehityksessä laajentaa kehittäjien perspektiiviä järjestelmään, vähentäen osa-aluekohtaisen siiloutumisen riskiä ja tuoden esiin piileviä riippuvuuksia [15].

**Johdonmukaisempi ohjelmistotuotanto** – MBSE:n soveltaminen ohjelmistokehityksessä parantaa suunnittelun jäljitettävyyttä, vähentää virheitä ja tukee ohjelmistojen parempaa toiminnallisuutta sekä käytettävyyttä tarjoamalla yhteisen kielen ja rakenteen kehitysohjelmaan [15].

**Kattavampi kyberturvallisuus** – Systemiajattelun avulla kyberturvallisuudessa yhdistetään tekniset toimenpiteet, standardoinnin vaatimukset ja inhimilliset näkökulmat yhtenäisiksi, ennakoiviksi ja reaktiivisiksi suojausmalliksi, jotka kattavat koko järjestelmän [13].

**Lisääntynyt resilienssi** – Kokonaisvaltainen lähestymistapa vahvistaa organisaatioiden kykyä sietää häiriöitä ja muutoksia digitaalisessa toimintaympäristössä. Resilienssikehityksen avulla kriittiset kohdat tunnistetaan ja suojataan, mikä turvaa jatkuvuuden haastavissakin olosuhteissa [7].

### **2.3 Ilmailu- ja avaruusteknologia**

Ilmailu- ja avaruusteknologian projektit ovat erittäin monimutkaisia ja niiden hallinta vaatii monitasoista suunnittelua, tehokasta viestintää sekä tiivistä yhteistyötä projektin eri osapuolten välillä. Systemiajattelu ja sen eri muodot tarjoavatkin tehokkaita keinoja näiden laaja-alaisten projektien hallintaan [5]. Kokonaisvaltainen järjestelmänäkökulma auttaa pitämään monimutkaiset suunnitteluprosessit, kuten avaruusalusten tai lentokoneiden kehityshankkeet, hallinnassa siten, että kaikki kriittiset osa-alueet tulevat huomioituiksi.

#### **Hiljaisen tiedon siirto ja yhteistoiminnallinen systemiajattelu (CST)**

Ilmailu- ja avaruusosalalla erääksi keskeiseksi haasteeksi on noussut hiljaisen tiedon eli niin kutsutun ”tacit knowledge” eli hiljaisen tiedon säilyttäminen ja siirtäminen nuoremmille insinööreille kokeneempien jäädessä eläkkeelle. Yhteistoiminnallinen systemiajattelu (CST, Collaborative Systems Thinking) tarjoaa ratkaisun tähän ongelmaan [16]. CST kannustaa tiimipohjaiseen ongelmanratkaisuun ja päätöksentekoon, jossa systeminen ajattelutapa on jaettuna yksittäisten asiantuntijoiden tietämyksen sijaan koko organisaation tasolla. Toisin sanoen, tietämys järjestelmän kokonaisuudesta ja keskinäisriippuvuuksista pyritään tekemään näkyväksi ja yhteiseksi, mikä ehkäisee kriittisen tiedon häviämistä yksittäisen henkilön poistumisen myötä [16].

Tehokkaat CST-tiimit omaavat tutkimusten mukaan muutamia keskeisiä piirteitä, kuten selkeän roolienjaon tiimin sisällä johtajuuden, erityisosaamisen ja systemiosaamisen välillä, tiimin viestintäkulttuuri on avoin ja luottamuksellinen sekä päätöksenteko on ryhmälähtöistä ja yhteistoiminnallista ei yksilökeskeistä [16]. Näiden piirteiden avulla organisaatiot voivat varmistaa, että projektiryhmä hyödyntää kollektiivista asiantuntemusta ja säilyttää kokonaiskuvan hankkeesta, vaikka yksittäisiä avainhenkilöitä vaihtuisi.

#### **Sisäänrakennettu systemiajattelu NASA:ssa**

Myös suurissa avaruusorganisaatioissa on hyödynnetty uudenlaisia toimintamalleja systemiajattelun saamiseksi osaksi arkea. NASA:n Dresden Flight Research Centerissä (DFRC) on kehitetty lähestymistapa, jossa työntekijät soveltavat systemiajattelun periaatteita luonnollisesti osana päivittäistä työtään, ajattelematta sitä erillisenä prosessina [17]. Tämän toimintamallin tavoitteena on määrittää hankkeiden tarpeet, suunnitella useita vaihtoehtoisia

ratkaisuja ja valita niistä optimaalinen ottaen huomioon sekä tekniset että turvallisuuteen ja kustannuksiin liittyvät tekijät [17]. Menetelmä integroi siis systeemiajattelun osaksi projektin normaalia kulkua alusta lähtien.

Avaruussovelluksissa systeemiajattelun merkitys korostuu, koska jo yksi ainoa suunnitteluvirhe voi vaarantaa koko lennon onnistumisen ja turvallisuuden. Siksi DFRC:n mallissa painotetaan järjestelmällistä riskienhallintaa, datan analysointia ja kokeellista testausta koko kehitysprosessin ajan. Kun systeemiajattelua sovelletaan automaattisesti osana jokapäiväistä työtä eikä erillisenä vaiheena, varmistetaan, että kaikki päätökset tehdään systeemiajattelun mukaisesti ja riskit otetaan järjestelmätasolla huomioon ennakoivasti. [17]

DFRC:n mallissa korostuvat myös käytännönläheinen koulutus ja organisoitu työssä oppiminen. Insinöörit syventävät osaamistaan jatkuvasti projektien yhteydessä, mikä luo organisaatioon oppivan kulttuurin [17]. Mallin keskeinen käsite on "triadi", joka koostuu kolmesta avainhenkilöstä: projektipäälliköstä, tutkimuksen pääinsinööristä ja lentotoimintainsinööristä. Tämän kolmikon tiivis yhteistyö mahdollistaa tehokkaan riskienhallinnan ja strategisen suunnittelun projektissa [17]. Triadin jäsenillä on yhdessä kattava näkemys kaikista hankkeen osa-alueista, ja he kykenevät näin tekemään päätöksiä, jotka huomioivat koko järjestelmän edun yksittäisten osaoptimointien sijaan [17]. Kun systeemiajattelun periaatteet upotetaan organisaation rakenteisiin ja käytäntöihin, ne voivat tehostaa projektien johtamista ja vähentää kriittisten virheiden todennäköisyyttä [17].

### **Mallipohjainen järjestelmäsuunnittelu ilmailualalla**

MBSE on ilmailu- ja avaruusteknologian alalla muodostunut keskeiseksi menetelmäksi hallita järjestelmien monimutkaisuutta ja yhdistää eri sidosryhmien näkemykset yhdeksi yhteiseksi malliksi. MBSE:n avulla voidaan esittää ilmailu- ja avaruusteknologian monimutkaisetkin asiat selkeästi ymmärrettävässä muodossa [9]. Perinteiseen asiakirjapohjaiseen kehitystapaan verrattuna MBSE korostaa visuaalisten ja formaalien mallien käyttöä koko projektin elinkaaren ajan sekä yhtenäisen järjestelmätietovarannon ylläpitämistä. NASA:n Jet Propulsion Laboratory on soveltanut MBSE:tä Mars 2020 -mönkijän suunnittelussa yhdistäen toiminnalliset, rakenteelliset ja parametritason kuvaukset yhteen integroituun malliin [9]. Tämän mallipohjaisen lähestymistavan ansiosta dokumentaation automaattinen generointi tehostuu ja eri sidosryhmien välinen reaaliaikainen suunnitteluratkaisujen tarkastelu tulee

mahdolliseksi [9]. Yhteinen malli toimii yhden totuuden lähteenä, jonka pohjalta kaikki osapuolet voivat tehdä päätöksiä yhtenäisin tiedoin.

MBSE:tä voidaan hyödyntää ilmailualalla laajasti myös muissa tehtävissä, kuten monialaisessa simuloinnissa, vaatimusten hallinnassa sekä kolmiulotteisessa yhteissuunnittelussa [9]. Monitasoiset mallit, esimerkiksi vaatimusmallit ja toimintamallit, varmistavat yhtenäisen näkyvyyden koko suunnitteluprosessiin ja parantavat eri insinööriryhmien välistä vuorovaikutusta. Kun käytössä on yksi yhtenäinen mallipohjainen tietolähde, teknisen tilan hallinta tuotteen elinkaaren ajan helpottuu ja päällekkäisten tai erillisten tietovarastojen tarve vähenee [9].

Jotta MBSE:n hyödyt saataisiin täysimääräisesti käyttöön ilmailuteknologiassa, on tärkeää integroida vakiintuneet MBSE-työkalut ja menetelmät, kuten SysML (System Modeling language) -mallinnuskieli, osaksi perinteistä kehitysprosessia [16]. SysML on yhtenäinen mallinnuskieli, joka vastaa nykyisiä tarpeita ja huomioi ohjelmiston lisäksi myös laitteistot, mekaaniset osat sekä ihmiset. Lisäksi on oleellista luoda organisaatioon yhteinen ymmärrys mallien rakenteesta ja varmistaa, että yleistasoiset järjestelmämallit kytkeytyvät sujuvasti eri erikoisalueiden yksityiskohtaisempiin malleihin. Tämä varmistaa, että hyvin monimutkaisetkin avaruusprojektit voidaan toteuttaa tehokkaasti ja että kaikki osapuolet pysyvät tietoisina järjestelmän tilasta ja muutoksista.

### **Toimitusketjun hallinta SoS-lähestymistavalla**

Ilmailu- ja avaruusalan toimitusketjut ovat usein globaaleja ja äärimmäisen monimutkaisia. Tämän takia ne ovat alttiita monenlaisille riskeille, kuten viivästyksille, toimituskatkoksille ja laatuongelmille. Riskienhallinta ilmailuteknologiassa edellyttää systeemiajattelun hyödyntämistä, koska toimitusketjut muodostuvat toisiinsa kytkeytyneistä, monimutkaisista järjestelmistä. Yhdenkin osan häiriö voi vaikuttaa koko verkostoon ja siten lopputuotteen epäonnistumiseen [5].

Tämän takia on kehitetty systeemien systeemi (SoS, System of Systems) menetelmä muun muassa toimitusketjujen tarkasteluun. Sen ydinajatuksena on katsoa toimitusketjua kokonaisuutena sen sijaan että keskityttäisiin vain erillisiin osiin tai yksittäisiin toimijoihin. Tämän näkökulman avulla voidaan tunnistaa toimitusketjun kriittiset riskipisteet ja -tekijät sekä varmistaa, että riskinhallintatoimenpiteet kattavat koko järjestelmän, eivätkä vain yksittäisiä

osia siitä [5]. SoS-lähestymistavan tavoitteena on eliminoida erityisesti yleisimmät toimitusketjujen ongelmat, kuten viivästykset ja laatuvirheet, sekä vähentää epävakaiden markkinoiden aiheuttamia kustannusriskejä koko arvoketjussa [5].

Systeemiajatteluun perustuva riskienhallinta on luonteeltaan proaktiivista, riskit pyritään tunnistamaan ja analysoimaan jo ennen kuin ne toteutuvat [13]. Tähän voidaan hyödyntää esimerkiksi päätösteorian malleja, data-analytiikkaa sekä erilaisten skenaarioiden simulointia ennakoita. Proaktiivisella lähestymisellä toimitusketjujen toimintaa voidaan optimoida ja niiden joustavuutta parantaa, jolloin ne kestävät paremmin yllättäviäkin häiriöitä. Samalla varmistetaan, että lopputuote täyttää turvallisuus- ja laatuvaatimukset huolimatta verkoston kompleksisuudesta [5].

### **Systeemiajattelun hyödyt**

**Parantunut projektinhallinta** – Monitasoinen systeemiajattelu tehostaa erittäin monimutkaisten hankkeiden hallintaa tuomalla rakenteen viestintään ja sidosryhmien yhteistyöhön, mikä vähentää väärinkäsityksiä ja koordinoituvirheitä [5].

**Tietopääoman säilyttäminen** – Yhteistoiminnallinen systeemiajattelu (CST) mahdollistaa keskeisen hiljaisen tiedon jakamisen tiimien sisällä, mikä turvaa organisaation osaamispääoman säilymisen kokeneiden työntekijöiden poistumisesta huolimatta [16].

**Tehokkaampi päätöksenteko** – Systeemiajattelun integrointi arjen prosesseihin (esim. NASA DFRC:n triadimalli) varmistaa, että päätöksenteossa huomioidaan systemaattisesti kaikki tekniset, turvallisuuteen liittyvät ja taloudelliset näkökulmat, mikä parantaa päätösten laatua ja projektien lopputulosta [17].

**Monimutkaisuuden hallinta malleilla** – MBSE auttaa hallitsemaan avaruusjärjestelmien kompleksisuutta ylläpitämällä yhdenmukaista mallipohjaista tietoa koko elinkaaren ajan. Tämä yhdistää eri sidosryhmien näkemykset ja vähentää ristiriitoja, mikä nopeuttaa kehitystyötä ja parantaa lopputuotteen laatua [9].

**Kokonaisvaltainen riskienhallinta** – SoS-lähestymistapa parantaa toimitusketjujen riskienhallintaa tunnistamalla kriittiset riskipisteet ja varmistamalla, että hallintatoimet kattavat koko verkoston eivätkä vain sen osia. Näin minimoidaan viiveiden, laatuongelmien ja markkinahäiriöiden vaikutukset [5].

## 2.4 Automaatio teknologia

Teollisuusautomaation järjestelmien kasvava monimutkaisuus vaatii kokonaisvaltaista systeemiajattelua niin suunnittelussa, kehityksessä kuin eri osien integraatiossakin. Perinteiset menetelmät eivät yksinään kykene käsittelemään modernien automaatiojärjestelmien monitieteellisyyttä ja monimutkaisuutta, tähän ratkaisuksi on noussut MBSE, joka tarjoaa rakenteellisia ja mallivetoisia lähestymistapoja automaatiotratkaisujen suunnitteluun [18]. Lisäksi SoS-menetelmä on saanut yhä enemmän huomiota automaatiossa järjestelmien monimutkaisuuden kasvaessa, erityisesti kun useita automaatiojärjestelmiä kytketään toisiinsa verkostoituneiksi kokonaisuuksiksi [19].

### Mallipohjainen järjestelmäsuunnittelu teollisuusautomaatiossa

MBSE on laajasti käytössä teollisuusautomaation alalla, erityisesti järjestelmien monimutkaisuuden hallinnassa ja suunnittelutehokkuuden parantamisessa. SysML -pohjaiset mallinnustavat, kuten MASP (Manufacturing Automation Software Projects) mahdollistavat sekä toiminnallisten että ei-toiminnallisten vaatimusten yksityiskohtaisen mallintamisen sekä automaatiojärjestelmien laitteiston ja ohjelmiston integraation saman mallin sisällä [18]. Tämän lähestymistavan avulla automaatio-ohjelmisto voidaan osittain generoida suoraan järjestelmämalleista, mikä varmistaa suunnittelun ja toteutuksen yhdenmukaisuuden. Samalla se vähentää virheiden määrää myöhemmissä kehitysvaiheissa ja parantaa valmiiden järjestelmien ylläpidettävyyttä, kun dokumentaatio ja toteutus vastaavat toisiaan. [18]

Scheeren ym. vertailivat perinteisiä dokumenttipohjaisia menetelmiä MBSE-pohjaisiin menetelmiin automaatiiossa ja korostavat, kuinka abstraktit mallinnus- ja simulointityökalut kuten Modelica parantavat eri alojen insinöörien välistä yhteistyötä [20]. MBSE edistää tehokasta viestintää eri teknisten alojen välillä ja vähentää epä johdonmukaisuuksia automaatioprojekteissa. Abstraktien järjestelmämallien yhdistäminen simulointeihin auttaa havaitsemaan suunnitteluvirheitä jo varhaisessa vaiheessa ennen varsinaista toteutusta, mikä minimoi kalliiden myöhäsvaiheen muutosten tarpeen [20].

Myös rakennusautomaation puolella on havaittu saman suuntaisia etuja. Eduissa korostavat systeemitason ajattelun merkitys erityisesti kyber-fyysisten järjestelmien integroinnissa rakennusautomaatioon [4]. Järjestelmäsuunnittelun menetelmät parantavat projektien läpinäkyvyyttä, monitieteistä yhteistyötä ja kehityksen tehokkuutta. Vaikka kyseisen tutkimuksen painopiste oli rakennusautomaation alalla, sen tulokset ovat sovellettavissa myös

teollisuusautomaation alueelle, jossa eri teknisten alojen välinen koordinointi on yhtä lailla kriittistä [4]. Tämä alleviivaa MBSE:n ja yleisen systeemiajattelun arvoa kaikilla automaation osa-alueilla.

### **Järjestelmien järjestelmä (SoS) -lähestymistapa automaatiossa**

Teollisuusautomaation kehitys on siirtymässä kohti yhä hajautetumpia ja yhteistyöhön perustuvia järjestelmiä, mikä korostaa tarvetta SoS-näkökulmalle. Teollisuusautomaatio muuttuu perinteisistä hierarkkisista arkkitehtuureista kohti verkottuneita ekosysteemejä, joissa useat itsenäiset alajärjestelmät toimivat dynaamisesti yhdessä [19]. Tällaiset heterogeeniset, yhteistyöhön perustuvat rakenteet tuovat mukanaan haasteita, kuten yhteentoimivuuden varmistamisen, luotettavan tiedonsiirron ja käyttäytymisen hallinnan. Perinteiset hierarkkiset automaatioarkkitehtuurit eivät tue riittävästi modernien verkottuneiden automaatiojärjestelmien vaatimaa joustavuutta eikä skaalautuvuutta [19].

SoS-näkökulman omaksuminen automaatiossa tarkoittaa myös sitä, että insinöörien on mallinnettava järjestelmän käyttäytymistä useilla abstraktiotasoilla, jotta kokonaisuuden synkronointi säilyy hallinnassa. Laitteiston ja ohjelmiston kasvava integraatio, edellyttää tällaista monitasoista ja monipuolista mallintamista [18]. Lähestymistapa, joka yhdistää korkean tason SysML-mallinnuksen, koodin generoinnin ja reaaliaikaisen virheiden etsinnän, osoittaa konkreettisesti, miten SoS-periaatteita voidaan hyödyntää eri järjestelmäkomponenttien synkronoinnin ylläpitämiseksi [18]. Vaikka automaatiojärjestelmä koostuu useista itsenäisistä osista, systeemiajattelun avulla ne voidaan suunnitella toimimaan yhtenä saumattomana kokonaisuutena [18].

### **Systeemiajattelu teollisuus 5.0:ssa**

Teollisuus 5.0 edustaa uutta paradigmaa, jossa ihmisen ja kehittyneiden teknologioiden yhteistyö korostuu [21]. Teollisuus 5.0 integroi innovaatiot ihmistoimijoihin muodostaen arvolähtöisemmän, kestävämmän, resilentimmän ja ihmiskeskeisemmän tuotantoympäristön [21]. Näin laajeneva kokonaisuus on monimutkainen järjestelmä, jonka hallinta edellyttää lähestymistapaa, jossa huomioidaan järjestelmän kaikki osat ja niiden vuorovaikutus. Tutkimukset osoittavat, että monimutkaisten järjestelmien integroinnilla on korvaamaton rooli

Teollisuus 5.0:ssa [22]. Monimutkaisten systeemien integraatio (CSI, Complex Systems Integration) lähestymistapa ohjaa teknologian kehityksen suuntaa ja edesauttaa Teollisuus 5.0:n tavoitteiden saavuttamista, tehden mahdolliseksi hallita uuden tuotantoympäristön kasvavaa monimutkaisuutta [22].

Systeemiajattelun avulla Teollisuus 5.0:n ihmisten ja teknisten tuotantolaitteiden yhteistyö toteutuu käytännössä. Ihmiset nähdään tuotantojärjestelmän keskiössä olevina älykkäinä toimijoina, ei vain prosessien kohteina [21]. Tässä teknologia toimii ihmisen yhteistyökumppanina. Teknologiat kuten älykkäät laitteet, tekoäly ja IoT yhdessä systeemiajattelun kanssa varmistaa, että nämä teknologiset ratkaisut integroidaan saumattomasti ihmisten ja prosessien kokonaisuuteen. Kokonaisuutena se johtaa parempaan monimutkaisten järjestelmien hallintaan, jossa ihminen ja teknologia toimivat saumattomasti yhdessä. Tuloksena on kestävämpi, joustavampi ja tehokkaampi teollinen tuotanto [21][22].

### **Systeemiajattelun hyödyt**

**Parempi monimutkaisuuden hallinta** – MBSE-menetelmät jäsentävät automaatiojärjestelmien malleja, mikä helpottaa laitteiston, ohjauslogiikan ja vaatimusten välisten riippuvuuksien hallintaa [18].

**Parannettu monitieteinen yhteistyö** – MBSE tukee ohjelmisto-, mekaniikka- ja sähköinsinöörien välistä viestintää yhteisen mallikielen avulla, mikä vähentää suunnitteluvirheitä ja väärinkäsityksiä eri alojen välillä.

**Virheiden varhainen tunnistaminen** – Simulointipohjaiset menetelmät yhdistettynä järjestelmämalleihin auttavat havaitsemaan suunnitteluvirheet ennen toteutusta, mikä vähentää kalliita myöhäisessä vaiheessa tehtäviä korjauksia [20].

**Skaalautuvuus ja modulaarisuus** – SoS-pohjaiset kehykset mahdollistavat hajautettujen automaatioalajärjestelmien integraation, mikä tukee modulaarisia ja mukautuvia suunnitteluratkaisuja [19].

**Ihmisen ja teknologian yhteistyö** – Systeemiajattelun avulla Teollisuus 5.0 toteutuu käytännössä. Ihminen nähdään erillisenä toimijana ja ihmisen ja teknologian rajapinnat toimivat saumattomasti [21][22].

### 3 Analyysi

Systeemiajattelun periaatteet ilmenevät monin tavoin kaikilla insinöörialoilla ja niiden soveltaminen tuottaa monenlaisia hyötyjä, mutta samalla kohdataan myös haasteita. Systeemiajattelun hyödyt, haasteet ja integraation taso vaihtelevat aloittain ja alojen välillä on suuriakin eroja. Tässä luvussa tarkastellaan, miten systeemiajattelu näkyy konetekniikassa, tietotekniikassa, ilmailu- ja avaruusteknologiassa sekä automaatioteknologiassa ja vertaillaan keskeisiä lähestymistapoja.

#### **MBSE ja monialainen integraatio**

Konetekniikassa on vahvasti esillä MBSE, jossa pyritään alusta asti huomioimaan koko järjestelmän elinkaari, osajärjestelmien riippuvuudet ja vaatimukset yhtenäisessä mallissa. Esimerkiksi autoteollisuudessa MBSE-metodeilla hallitaan ajoneuvojen kasvavaa kompleksisuutta sekä luodaan selkeä rakenteellinen malli osakokonaisuuksien vuorovaikutuksille ja näin hallitaan muutoksia järjestelmätasolla [2]. Mallintamalla järjestelmää kokonaisuutena voidaan karsia epäolennaista tietoa ja parantaa ymmärrystä monimutkaisista riippuvuuksista [2]. MBSE:n on todettu tuovan konkreettisia hyötyjä suunnitteluprosessiin ja sen avulla voidaan havaita potentiaalisia ongelmia jo varhain, mikä nopeuttaa suunnittelua ja vähentää myöhäisten korjausten tarvetta [10]. Lisäksi mallipohjainen lähestymistapa edistää modulaarisuutta. Selkeä malli osajärjestelmien rajapinnoista helpottaa järjestelmän osien vaihtamista tai rinnakkaista kehittämistä ilman, että koko järjestelmää tarvitsee suunnitella uudelleen [10]. Vastaavia periaatteita hyödynnetään myös ilmailu- ja avaruustekniikassa, jossa MBSE on avainasemassa uusien järjestelmien suunnittelussa [9]. Lentokoneiden ja avaruusjärjestelmien suunnittelussa MBSE auttaa hallitsemaan laajoja vaatimuksia ja varmistamaan eri insinöörialojen kuten mekaniikan, elektroniikan ja ohjelmistojen sujuvan yhteensovittamisen yhteisen mallin avulla [9][4]. Automaatioalalla MBSE puolestaan tukee teollisuusautomaation ohjelmistojen suunnittelua esimerkiksi mekatronisten laitteiden kehityksessä. Tietotekniikan alalla MBSE ei ole vielä laajalti käytössä. Ohjelmistokehityksessä mallinnus tapahtuu usein UML:n ja muiden ohjelmistokohtaisten menetelmien keinoin, mikä osaltaan selittää MBSE:n vähäistä yleistymistä siellä [15].

SysML-pohjainen mallinnus on parantanut ja parantaa edelleen projektien läpinäkyvyyttä ja vähentänyt integraatio-ongelmia tuotantolinjojen yhteensopivuudessa [18]. Yhteistä eri aloille on, että mallipohjainen systeemiajattelu luo yhdenmukaisen kielen suunnittelijoille. Kun kaikki sidosryhmät käyttävät samaa mallia ja käsitteitä, väärinymmärrykset vähenevät ja monitieteinen yhteistyö tehostuu [15]. Haasteena MBSE:n laajassa käyttöönotossa on kuitenkin vaatimustenmukaisen mallinnuksen oppimiskäyrä ja tarve standardoida menetelmät. Tätä on pyritty ratkaisemaan kehittämällä yhteisiä standardeja, kuten VDI 2206, joka määrittelee menetelmät eri tekniikan alojen integroimiseksi yhteiseen viitekehykseen [12]. VDI 2206-standardin mukainen lähestymistapa on osoittautunut hyödylliseksi esimerkiksi mekatroniikassa, missä se varmistaa eri osa-alueiden yhteensopivuuden ja tukee monialaisen suunnittelun hallintaa [12]. Kokonaisuutena MBSE ja muut systeemisuunnittelun menetelmät osoittavat, että monimutkaisten järjestelmien kehittämisessä voidaan saavuttaa sekä parempaa suunnittelun laatua että lyhyempiä kehitysaikoja, kun kokonaisuus mallinnetaan järjestelmätasolla [10][11]. Esimerkiksi SBCE on konetekniikan piirissä kehitetty systeemiajatteluun pohjautuva prosessi, jossa tutkitaan laaja joukko ratkaisuja rinnakkain ja karsitaan vähitellen huonommat vaihtoehdot. Tämän on todettu lyhentävän tuotekehityksen läpimenoaikaa ja tuottavan optimaalisempia lopputuloksia monimutkaisissa suunnitteluongelmissa [11]. SBCE-menetelmän soveltaminen on havainnollistanut, että monimutkaisten mekatronisten järjestelmien osa-alueet voidaan integroida hallitusti ja innovatiivisesti, kun vaihtoehtoja arvioidaan systeemisesti alusta alkaen [11]. Nämä esimerkit osoittavat, että systeemiajatteluun nojaavat mallinnus- ja suunnittelumenetelmät ovat laajalti hyödyllisiä eri teollisuusalojen kehitysprojekteissa.

### **SoS ja kompleksisuuden hallinta**

Monilla aloilla yksittäiset tuotteet tai järjestelmät eivät enää toimi yksinään, vaan ne ovat osa SoS-kokonaisuutta. SoS-näkökulma on elintärkeä vaativilla aloilla, joissa tehdään suuria kokonaisuuksia kuten ilmailu- ja avaruusala sekä automaatioala. Ilmailuteollisuudessa esimerkiksi moderni lentokone tai satelliittijärjestelmä nähdään SoS-kokonaisuutena, jossa monet itsenäiset osajärjestelmät kuten mekaaniset rakenteet, elektroniikkajärjestelmät, ohjelmistot, miehistö ja tukijärjestelmät toimivat yhdessä. Tällaisessa ympäristössä systeemiajattelu auttaa tunnistamaan ominaisuuksia, jotka nousevat esiin vasta, kun kaikki osat toimivat kokonaisuutena. Tutkimukset ilmailun toimitusketjuista osoittavat, että riskejä voidaan hallita selkeästi paremmin SoS-lähestymistavalla kuin perinteisillä tavoilla. Kun koko

toimitusverkosto toimittajat, valmistajat sekä logistiset järjestelmät nähdään yhtenä systeeminä, voidaan riskien vaikutuksia arvioida laajemmin ja kehittää tehokkaampia hallintatoimenpiteitä [5].

Toimitusketjun näkeminen systeemien summana auttaa havainnoimaan niiden yhteentoimivuuden tärkeyttä ja yksittäisten muutosten vaikutusta muihin toimijoihin. Tämä vähentää osittaisoptimoinnin ongelmaa. Pelkkään yhteen osaan kohdistuvat ratkaisut voivat pahentaa toisaalla ilmeneviä riskejä, ellei koko järjestelmää ymmärretä [5]. Automaatioalalla puolestaan SoS-ajattelun tarve on korostunut teollisuus 5.0-ympäristöissä, joissa tehdaslaitteet, robotiikka, IoT-laitteet ja ihmisoperaattorit kytkeytyvät toisiinsa verkostoituneiksi kokonaisuuksiksi [19]. Perinteiset hierarkkiset automaatioarkkitehtuurit eivät enää riitä hallitsemaan nykyaikaisia järjestelmäverkostoja [19]. Järjestelmän osat on suunniteltava yhteistoimintaan alusta asti, huomioiden vaatimukset useilla abstraktiotasoilla. Tässä haasteena on yhteentoimivuuden varmistaminen eri valmistajien laitteiden välillä, luotettava tiedonsiirto organisaatorajojen ylitse sekä koko verkoston käyttäytymisen hallinta [19].

Systeemiajattelu tarjoaa työkaluja näihin haasteisiin standardoimalla rajapintoja ja määrittelemällä selkeät yhteistoimintamallit järjestelmien välille [12][19]. SoS-lähestymistavassa hallittavuus vaikeutuu järjestelmäkoon sekä hajautettavuuden kasvaessa, rajapintojen hallintaan kehitetyistä standardeista huolimatta. Tästä syystä kokonaisvaltainen mallintaminen ja simulointi on tärkeää myös SoS-kontekstissa. Automaatioalalla onkin yhdistetty MBSE-menetelmiä simulointiin ja erikoisalohtaiseen mallinnukseen juuri monimutkaisten tehdasjärjestelmien kehittämisessä, jotta järjestelmän käyttäytyminen saadaan testattua järjestelmätasolla jo suunnitteluvaiheessa [20]. SoS-näkökulman keskeinen etu kaikilla aloilla on, että se pakottaa huomioimaan rajapinnat ja riippuvuudet. Jokainen järjestelmän osa on suunniteltava tietoisena siitä ympäristöstä, jossa se toimii. Tämä vähentää integraatio-ongelmia ja parantaa järjestelmän skaalautuvuutta ja joustavuutta, kun muutoksia voidaan tehdä yhteen osaan ilman että koko systeemi hajoaa [19][4]. SoS-ajattelun haasteet puolestaan liittyvät projektien koordinointiin ja vastuunjakoon. Monijärjestelmäympäristössä tarvitaan selkeää vastuunjakoja siitä, kuka hallitsee mitäkin osa-aluetta ja miten kokonaisuutta valvotaan. Nämä havainnot osoittavat, että systeemiajattelun SoS-ulottuvuus on yhdistävä tekijä useille insinöörialoille ja se on keino hallita modernien järjestelmien verkottunutta luonnetta ja varmistaa, että osista rakentuu toimiva, optimaalinen kokonaisuus.

## **Turvallisuus**

Digitaalinen turvallisuus on nykypäivän insinööriyön osa-alue, jossa systeemiajattelun tarve on tullut erityisen näkyväksi. Perinteisesti kyberturvallisuus on saatettu nähdä yksittäisten teknisten suojauskeinojen kokoelmana kuten palomuurit, salaukset ja käyttöoikeudet, mutta moderneissa uhkakuvissa tämä ei enää riitä, tarvitaan kokonaisvaltaista kyberturvallisuusstrategiaa [13]. Systeemiajattelun avulla tekniset, organisatoriset ja inhimilliset tekijät yhdistetään yhdeksi, jolloin kokonaisvaltainen turvallisuus on helpommin saavutettavissa. Tällainen lähestymistapa lisää resilienssiä yrityksen haavoittuvissa järjestelmissä [13]. Järjestelmät kestävät paremmin uusia ja odottamattomiakin uhkia, kun suojaus on rakennettu kerroksittain ja toisiaan tukevista elementeistä. Systeemiajattelun hyödyt on havaittu myös digitaalisen transformaation hallinnassa laajemmin. Organisaatioiden siirtyessä kohti yhä digitaalisempia toimintatapoja riskit ja uhat monimutkaistuvat nopeasti. Monimutkaisiin ongelmiin tarvitaan nykyistä parempia ratkaisuja, joita voidaan systeemiajattelun avulla saavuttaa [7]. Tämä periaate ei rajoitu ainoastaan tietotekniisiin järjestelmiin, systeemiajattelua hyödynnetään yhä enemmän myös perinteisessä turvallisuustekniikassa ja riskienhallinnassa eri teollisuusaloilla.

## **CST ja sisäänrakennettu systeemiajattelu**

Monimutkaisten järjestelmien suunnittelu ja hallinta edellyttävät usein laajojen asiantuntijaryhmien yhteistyötä. CST viittaa siihen, miten tiimit yhdessä muodostavat ja jakavat systeemisen ymmärryksen käsillä olevasta ongelmasta. Erityisesti ilmailu- ja avaruusteknologian hankkeissa, joissa projektit ovat suuria ja useita tieteenaloja kattavia, CST on kriittinen menestystekijä [16]. Tiimin onnistumista monimutkaisessa projektissa määrittävät tiedon avoin liikkuvuus ja ryhmän avoimuus. Tällä tavoin tiimi pääsee helpommin yhteisymmärrykseen tilanteesta ja näin tehdyt ratkaisut ovat keskimäärin parempia. Päätöksenteon parantuessa virheiden todennäköisyys pienenee, koska kukin tiimin jäsen ymmärtää paremmin, miten oma osa-alue liittyy kokonaisuuteen. Tämä liittyy läheisesti myös hiljaisen tiedon siirtoon. Kokeneilla insinööreillä on usein vuosien aikana kertynyt paljon yksityiskohtaista tietoa järjestelmien toiminnasta, mitä ei välttämättä ole dokumenteissa esitetty. CST:n keinoin kuten työkierron ja yhteisten mallinnustyökalujen avulla organisaatiot voivat tuoda hiljaista tietoa yhteiseen käyttöön.

NASA:n avaruusohjelmissa on pyritty tilanteisiin, joissa järjestelmäinsinöörit harjoittivat systeemiajattelua sitä erikseen ajattelematta eli organisaation kulttuuri oli muovautunut sellaiseksi, että kokonaisuus huomioitiin aina, vaikkei sitä erikseen korostettu [17]. Tällainen sisäänrakennettu systeemiajattelu on kaksiteräinen miekka, toisaalta se osoittaa, että kokemus ja oikeat toimintatavat voivat juurtua organisaatioon, mutta toisaalta vaarana on, että ilman selkeää määrittelyä osa systeemiajattelun elementeistä voi jäädä kokonaan pois tai vain muutamien työntekijöiden varaan. Tietointensiivisillä ja turvallisuuskriittisillä aloilla on yhä tärkeämpää normalisoida ja perehdyttää työntekijöitä CST-käytäntöihin. Tästä esimerkkinä toimii projektien alussa yhteisten käsitteiden ja rajapintojen määrittely. Kun eri alojen insinöörit ymmärtävät toisiaan ja puhuvat samoilla termeillä, he voivat siirtää oppeja ja parhaita käytäntöjä helpommin alalta toiselle [1]. Tämä näkyy jo käytännössä siinä, että monet yritykset pyrkivät muodostamaan monialaisia kehitystiimejä. Autonvalmistaja saattaa palkata ohjelmistoasiantuntijoita ja tietoturva-arkkitehteja osaksi tuotekehitystä, jolloin systeeminen näkökulma laajenee perinteisen mekaanisen suunnittelun ulkopuolelle. Yhteistoiminnallisuus lisää systeemiajattelun vaikuttavuutta eikä se ole vain yksilön kyky, vaan kollektiivinen ominaisuus, joka syntyy organisaation rakenteista ja toimintakulttuurista [16][6].

### **Käytäntöjen siirrettävyys alojen välillä**

Eri insinöörialoilla kehitetyt systeemiajattelun periaatteet ovat pohjimmiltaan samankaltaisia, vaikka painotukset vaihtelevat ja erojakin löytyy. Esimerkiksi konetekniikan puolella käytetyt MBSE ja SBCE ovat saaneet vastineita ohjelmistoalalla, esimerkiksi UML-mallinnuksien kuten SysML muodossa [15]. Automaatioteknologiassa samat opit näkyvät esimerkiksi standardoituina rajapintoina [18][12]. Vaikka ohjelmistojen kehitysprosessi eroaa fyysisten tuotteiden suunnittelusta, molemmissa tapauksissa hierarkkinen järjestelmäajattelu auttaa pitämään kokonaisuuden hallittavana ja parantamaan lopputuloksen laatua [15]. Toisaalta tietotekniikan puolella omaksuttu systeemidynamiikka ja jatkuva riskien arviointi ovat yleistyneet myös teollisuudessa. Teollisten toimitusketjujen hallinnassa käytetään samoja periaatteita skenaarioanalyysissä kuin IT-projekteissa [7][3]. Haasteena eri alojen yhdistämisessä on löytää yhteinen pohja, tähän ratkaisuna on kehitetty yhteistä kieltä eri alojen välille [1]. Standardit ja viitemallit, kuten SysML ja turvallisuusstandardit auttavat toimimaan rajapinnoissa. Teollisuus 5.0 -visio on konkreettinen esimerkki alojen lähentymisestä. Siinä yhdistyvät automaation, konetekniikan, tekoälyn ja käyttäjäkokemuksen näkökulmat yhdeksi

kokonaisuudeksi, jossa ihminen on keskiössä teknologiaympäristössä [21]. Teollisuus 5.0:ssa ajatuksena on, että tehdasjärjestelmät eivät ole vain automatisoituja prosesseja, vaan ne integroidaan ihmisoperaattoreihin arvolähtöisesti ja kestävästi. Tämä on puhdas systeemiajattelun ilmentymä, jossa huomioidaan sekä tekniset että sosiaaliset osat yhdessä [21].

Tämän toteutus käytännössä nojaa eri alojen yhteentoimivuuteen. Automaatioteknologiat, tietotekniikan data-analytiikka ja käyttöliittymät sekä organisaatiopsykologia tuodaan yhteen. Näiden eri alojen osien yhteentoimiminen edellyttää juuri kompleksisten järjestelmien integraatiota yli perinteisten aluerajojen. Systeemiajattelun kannalta kehityssuunta on lupaava, eri alojen käytännöt eivät juuri ole ristiriidassa keskenään, vaan pikemminkin täydentävät toisiaan. Vaikka sovellusalueet ovat keskenään erilaisia niin toimivat ne lähes samoilla periaatteilla, kuten monialaisten tiimien yhteistyöllä sekä kokonaisuuden mallintamisella. Näillä periaatteilla päästään parempaan lopputulokseen kuin vanhoilla tavoilla päästäisiin. Alojen välisessä vertailussa voidaan nähdä, että siellä missä yksi ala kohtaa haasteen, toisella alalla saattaa olla jo kehitetty menetelmä sen ratkaisemiseen. Systeemiajattelun laaja-alainen omaksuminen siis mahdollistaa parhaiden käytäntöjen lainaamisen esimerkiksi ilmailuteollisuuden järjestelmäturvallisuuden oppeja voidaan hyödyntää automaation kyberturvallisuudessa tai ohjelmistokehityksen ketteriä hallintamalleja voidaan rikastaa systeemisellä pitkän tähtäimen suunnittelulla tuotantotekniikassa. Analyysin perusteella eri insinöörialojen systeemiajattelun käytännöt ovat yhä enenevässä määrin yhdistettävissä yhtenäisten työkalujen, standardien ja koulutuksen ansiosta. Jatkossa rajat eri insinöörialojen välillä hämärtynevät entisestään, ja systeemiajattelu toimii yhteisenä kehikkona, jonka puitteissa kaikki nämä alat voivat kommunikoida ja kehittyä yhdessä. [1] [8]

### **Systeemiajattelu päätöksenteon tukena**

Systeemiajattelussa päätöksenteko perustuu koko järjestelmän kattavaan ymmärrykseen, mikä auttaa tunnistamaan piileviä riippuvuuksia ja palautekytkentöjä [14]. Laaja näkökulma vähentää myös osittaisoptimoinnin riskiä. Eli päätöksentekijät voivat välttää ratkaisuja, jotka hyödyttävät yhtä osaa mutta heikentäisivät kokonaisuuden toimintaa [5]. Insinöörialoilla, joilla hyödynnetään MBSE- ja SoS-lähestymistapoja, päätöksentekoon saadaan systemaattisuutta ja ennakoitavuutta. Mallinnetut kokonaisuudet paljastavat muutosten vaikutukset eri osa-alueisiin jo varhaisessa vaiheessa, mikä tukee parempia suunnitteluratkaisuja [10][11]. Esimerkiksi monimutkaisten tuotteiden kehityksessä MBSE tarjoaa jäljitettävyyden ja näkyvyyden, jonka

ansiosta suunnittelupäätökset voidaan tehdä tietoon perustuen eikä pelkkien oletusten varassa [15]. Samoin SoS-näkökulma on parantanut päätöksentekoa vaativissa järjestelmäkokonaisuuksissa, esimerkiksi ilmailuteollisuuden toimitusketjuissa riskienhallinta on tehostunut, kun päätökset perustuvat koko verkoston yhteiseen tilannekuvaan [5].

Monitieteisissä projekteissa yhteinen systeeminen ajattelutapa on keskeinen. Eri alojen asiantuntijoiden jakaessa yhtenäisen käsityksen kokonaisuudesta, he pystyvät tekemään parempia päätöksiä kokonaisuuden kannalta [16]. CST-ajattelu eli tiimin ja organisaation tasolla jaettu systeeminen ymmärrys parantaa päätösten laatua monialaisissa hankkeissa [16].

Käytännössä tämä näkyy muun muassa siinä, että ongelmiin löydetään nopeammin hyviä ratkaisuja ja vältetään päällekkäiset sekä keskenään ristiriitaiset toimenpiteet. Systeemiajattelun omaksuneet tiimit huomaavat helpommin myös vaikutukset käyttäjiin, mikä johtaa kestävämpiin ratkaisuihin [14][3]. Kokonaisvaltainen päätöksenteko, jota systeemiajattelu tukee, yhdistää edellä käsitellyt näkökulmat. MBSE antaa strukturoitua tietopohjaa päätöksille, SoS-ajattelu varmistaa laajemman kontekstin huomioimisen, ja CST korostaa tiimien ja organisaatioiden sisäistä yhteisymmärrystä. Näiden avulla päätöksenteosta tulee läpinäkyvämpää, perustellumpaa ja paremmin eri sidosryhmien tarpeet huomioivaa, mikä parantaa sekä teknisiä lopputuloksia että projektien onnistumista [5][7][14][16].

## 4 Johtopäätökset

Tämän tutkielman keskeisenä johtopäätöksenä on, että systeemiajattelu on muodostunut välttämättömäksi lähestymistavaksi modernilla insinöör kentällä. Kirjallisuuskatsauksen ja analyysin perusteella on selvää, että riippumatta erityisalasta kokonaisvaltainen systeeminen tarkastelu parantaa monimutkaisten järjestelmien hallintaa ja lopputulosten laadukkuutta. Kaiken kaikkiaan systeemiajattelua hyödynnetään nykyisin laajasti eri insinöörialoilla vaihtelevissa muodoissa, esimerkiksi konetekniikan mallipohjaisessa suunnittelussa, ohjelmistokehityksen projektinhallinnassa sekä kyberturvallisuuden kokonaisvaltaisessa riskienhallinnassa [2][3][13]. Systeemiajattelun hyödyt konkretisoituvat useilla tavoilla, se auttaa hallitsemaan kompleksisuutta ja ennakoimaan ongelmia jo suunnittelun alkuvaiheessa [10][11], mahdollistaa erillisten osajärjestelmien saumattoman integraation [2][19], sekä tukee päätöksentekoa paljastamalla piileviä riippuvuuksia ja palautemekanismeja [14]. Monitieteisessä insinööriyössä systeemiajattelu toimii liimana, joka yhdistää eri alojen näkemykset yhtenäiseksi kokonaiskuvaksi [4][5]. Esimerkiksi MBSE:n soveltaminen on tuonut järjestelmällisyyttä ja jäljitettävyyttä tuotteiden suunnitteluun [15] ja toisaalta SoS-ajattelu on parantanut kokonaisarkkitehtuurien skaalautuvuutta ilmailussa sekä automaatiossa [5][19]. Systeemiajattelun tuottamat hyödyt eivät rajoitu pelkästään teknisiin mittareihin, vaan ne ilmenevät myös organisaatioiden toiminnassa. Projektien onnistuminen helpottuu ja riskienhallinta tehostuu, kun ongelmat ymmärretään laajemmin [3][7]. Lisäksi kyberturvallisuudessa systeemiajattelun lähestymistapa on osoittautunut ainoaksi realistiseksi tavaksi vastata nykyisiin uhkiin. Yksittäiset suojaustoimet eivät riitä, jos kokonaisjärjestelmässä on heikkoja lenkkejä [13]. Keskeisimmät systeemiajattelun hyödyt ovat kompleksisuuden parempi hallinta, osajärjestelmien tehokkaampi integraatio sekä päätöksenteon tuki, kun taas suurimmat haasteet liittyvät organisaatiokulttuurin muutokseen, systeemiajattelun mittaamisen ja kouluttamisen vaikeuteen sekä laaja-alaisten mallinnusprosessien hallintaan [1][6][12].

Systeemiajattelun edut tulevat yhdessä sen tuomien haasteiden kanssa. Yksi keskeinen haaste on kulttuurin ja ajattelutavan muutos yrityksissä. Perinteisesti insinöörinkoulutus ja -organisaatiot ovat erikoistuneet kapeisiin osa-alueisiin. Kokonaisvaltaisen lähestymistavan kokonaisvaltainen omaksuminen vaatii tästä syystä nykyisten rakenteiden osittaista purkamista. Eri aloille tarvitaan lisää yhteistä kieltä ja käsitteistöä, jotta eri alojen asiantuntijat ymmärtävät toisiaan [1]. Tutkimukset osoittavat, että vaikka systeemiajattelun tärkeys tunnustetaan laajasti, sen arviointi ja opettaminen voi olla hankalaa. Tarvitaan uusia tapoja mallintaa ja mitata

insinöörien systeemiajattelutaitoja, jotta niitä voidaan kehittää tietoisesti [6]. Toinen haaste on mallintamisen ja analyysin kasvava monimutkaisuus. Kun koko järjestelmä otetaan huomioon, mallit voivat muuttua jopa liian laajoiksi. Tämä edellyttää kehittyneitä työkaluja kuten simulointiohjelmistoja mikä voi hidastaa projektin alkuvaihetta. Myös vastuunjaon pitää systeemiajattelussa muuttua nykyisestä. Jokaisen tiimin jäsenen on nähtävä oman roolinsa yli, mikä voi olla haastavaa ilman oikeaa koulutusta ja johtamista. Voidaan kuitenkin sanoa, että nämä haasteet ovat ratkaistavissa johdonmukaisella panostuksella koulutukseen, standardointiin ja organisaatiokulttuurin kehittämiseen. Useat alan standardit ja viitekehykset, kuten SysML ja VDI 2206, ovat jo luoneet pohjaa yhteiselle ymmärrykselle ja yliopistoissa järjestelmäinsinöörien koulutusohjelmat ovat yleistymässä, mikä valmistaa uusia insinöörejä systeemiseen ajattelutapaan [1][8].

Yritykset voivat tulevaisuudessa hyödyntää systeemiajattelua strategisessa suunnittelussaan ja organisaation kehittämisessä kokonaisvaltaisena lähestymistapana. Sen avulla voidaan erityisesti tukea organisaation resilienssin ja ketteryyden parantamista muuttuvassa liiketoimintaympäristössä [7][13]. Systeemiajattelun omaksumisen kautta eri toiminnot ja osaamisalueet voidaan integroida osaksi yhtenäistä toimintamallia, mikä edistää integraatiota ja edistää toimintojen yhteistoimintaa. Samalla käyttöönotto edellyttää organisaatiolta rakenteellisia muutoksia, kuten poikkitieteellisten tiimien muodostaminen, järjestelmällisten koulutusohjelmien tekeminen ja yhteisen käsitteistön luominen. Systeemiajattelun vahvistaminen voi muuttaa yrityskulttuuria siten, että avoin viestintä ja yhteinen ajattelutapa korostuvat yli perinteisten yksikkörajojen [1][6][16]. Myös projektinhallinnassa systeemiajattelun näkökulma edistää moniammatillisuutta ja kokonaisuuksien huomioimista, mikä parantaa päätösten laatua ja projektien onnistumista [3][17].

## 5 Yhteenveto

Systeemiajattelun käyttö edistää merkittävästi monimutkaisten järjestelmien suunnittelua, integraatiota ja päätöksentekoa eri insinöörialoilla, sillä sen avulla moninaiset tekniset ja eitekniset tekijät voidaan huomioida yhtenä kokonaisuutena, mikä johtaa parempiin ja kestävämpiin ratkaisuihin [4][14]. Systeemiajattelun merkitys tulee korostumaan entisestään teknologian kehittyessä. Maailma on siirtymässä kohti yhä integroituneempia järjestelmiä, kuten teollisuus 5.0. Tällaiset kehitysaskleet tuovat ihmiset, tekoälyn, robotiikan ja kestävä kehityksen tavoitteet yhteen, mikä vaatii ennen näkemätöntä kokonaisvaltaista ymmärrystä järjestelmistä [21][22]. Samoin esimerkiksi kriittisen infrastruktuurin suojele ja ilmastonmuutoksen torjunta ovat haasteita, jotka edellyttävät teknisten, taloudellisten ja sosiaalisten järjestelmien yhteensovittamista eli toisin sanoen kokonaisvaltaista systeemiajattelua.

On odotettavissa, että insinöörien rooli laajenee entistä enemmän systeemien hallinnoijiksi. Heidän on hallittava monialaisia kokonaisuuksia ja pystyttävä kommunikoimaan eri sidosryhmien kanssa kokonaisvaltaisella tasolla. Systeemiajattelu tarjoaa tähän työkalut sekä oikean asennoitumisen. Tulevaisuudessa menestyvät ne organisaatiot ja insinööritiimit, jotka kykenevät oppimaan nopeasti eri alojen parhaita käytäntöjä ja soveltamaan niitä omissa projekteissaan. Juuri sitä varten systeemiajattelu luo puitteet. Systeemiajattelu ei myöskään ole vain teoreettinen käsite, vaan tapa ajatella asioita laajassa mittakaavassa. Sen avulla insinöörialat pystyvät yhdessä vastaamaan 2000-luvun monimutkaisiin haasteisiin tehokkaammin, kestävämmiin ja innovatiivisemmin kuin aikaisemmin. Systeemiajattelun jatkuva kehittäminen ja integrointi insinöörien työkalupakkiin on siten kriittistä sekä nykyisten että tulevien sukupolvien insinöörien onnistumiselle. Jatkossa lisätutkimusta voitaisiin kohdistaa siihen, miten erilaisia systeemiajattelun suuntauksia voidaan hyödyntää eri aloilla sekä miten systeemiajattelua voisi hyödyntää vielä nykyistä enemmän.

## 6 Lähteet

- [1] N. P. Whitehead, W. T. Scherer, ja M. C. Smith, "Systems Thinking About Systems Thinking A Proposal for a Common Language", *IEEE Syst. J.*, vsk. 9, nro 4, ss. 1117–1128, joulu 2015, doi: 10.1109/JSYST.2014.2332494.
- [2] R. Maschotta, M. Hammer, T. Jungebloud, M. Khan, ja A. Zimmermann, "Model-Driven Aspect-Specific Systems Engineering in the Automotive Domain", teoksessa *2021 IEEE International Conference on Recent Advances in Systems Science and Engineering (RASSE)*, Shanghai, China: IEEE, joulu 2021, ss. 1–8. doi: 10.1109/RASSE53195.2021.9686946.
- [3] Z. M. Mitrovic, A. M. Rakicevic, D. C. Petrovic, M. M. Mihic, J. D. Rakicevic, ja E. T. Jelusic, "Systems Thinking in Software Projects-an Artificial Neural Network Approach", *IEEE Access*, vsk. 8, ss. 213619–213635, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3040169..
- [4] M. Schöberl, A. Fischer, ja J. Fottner, "System-level Thinking as Key to Construction Site Automation", teoksessa *2024 IEEE International Systems Conference (SysCon)*, Montreal, QC, Canada: IEEE, huhti 2024, ss. 1–6. doi: 10.1109/SysCon61195.2024.10553599.
- [5] A. Ghadge, S. Dani, ja R. Kalawsky, "A framework for managing risks in the aerospace supply chain using systems thinking", teoksessa *2010 5th International Conference on System of Systems Engineering*, Loughborough, United Kingdom: IEEE, kesä 2010, ss. 1–6. doi: 10.1109/SYSOSE.2010.5544082.
- [6] R. S. Hirschprung, S. Kordova, M. Klein, ja O. Maimon, "Representation and Assessment of Systems Thinking Competencies Through Soft Logic", *IEEE Access*, vsk. 11, ss. 141547–141558, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3342131.
- [7] D. Manzini, R. Oosthuizen, ja H. K. Chikwanda, "A Resilience Framework for Digital Transformation in the Banking Sector: A Systems Thinking Approach", teoksessa *2022 IEEE 28th International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC) & 31st International Association For Management of Technology (IAMOT) Joint Conference*, Nancy, France: IEEE, kesä 2022, ss. 1–10. doi: 10.1109/ICE/ITMC-IAMOT55089.2022.10033305.
- [8] N. U. I. Hossain, V. L. Dayarathna, M. Nagahi, ja R. Jaradat, "Systems Thinking: A Review and Bibliometric Analysis", *Systems*, vsk. 8, nro 3, s. 23, heinä 2020, doi: 10.3390/systems8030023.
- [9] W. Wenyue, H. Junjie, M. Yinxuan, Jinjie, ja L. Zhiang, "Application and development of MBSE in aerospace", *J. Phys. Conf. Ser.*, vsk. 2235, nro 1, s. 012021, touko 2022, doi: 10.1088/1742-6596/2235/1/012021.
- [10] A. Albers, N. Bursac, H. Scherer, C. Birk, J. Powelske, ja S. Muschik, "Model-based systems engineering in modular design", *Des. Sci.*, vsk. 5, s. e17, 2019, doi: 10.1017/dsj.2019.15.
- [11] R. Ammar, M. Hammadi, J.-Y. Choley, M. Barkallah, ja J. Louati, "Mechatronic system design with manufacturing constraints using set-based concurrent engineering", teoksessa *2018 Annual IEEE International Systems Conference (SysCon)*, Vancouver, BC: IEEE, huhti 2018, ss. 1–7. doi: 10.1109/SYSCON.2018.8369513.
- [12] K. Gamage, J. K. Arachchige, S. Siriwardhana, A. L. Kulasekera, ja P. Dassanayake, "Systems Engineering-Based Approach for the Development of a Strawberry Harvesting Robot", teoksessa *2023 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon)*, Moratuwa, Sri Lanka: IEEE, marras 2023, ss. 586–591. doi: 10.1109/MERCon60487.2023.10355526.
- [13] N. K. Narang, "Mentor's Musings on Systems Thinking & Standardization Imperatives for Making the Critical Infrastructure Cyber Secure & Resilient", *IEEE Internet Things Mag.*, vsk. 7, nro 6, ss. 4–8, marras 2024, doi: 10.1109/MIOT.2024.10737173.
- [14] A. Dutta, "Managing IT with systems thinking", *Computer*, vsk. 36, nro 3, ss. 96–97, maaliskuu 2003, doi: 10.1109/MC.2003.1185228.
- [15] A. Tomer, "Applying system thinking to model-based software engineering", teoksessa *Proceedings of the 2012 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, Marrakech, Morocco: IEEE, huhti 2012, ss. 1–10. doi: 10.1109/EDUCON.2012.6201185.
- [16] C. T. Lamb ja D. H. Rhodes, "Collaborative systems thinking: Uncovering the rules", *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.*, vsk. 25, nro 11, ss. 4–10, marras 2010, doi: 10.1109/MAES.2010.5638799.

- [17]M. Bohn-Meyer, S. Kilp, ja P. Chun, ”Doing systems engineering without thinking about it at NASA Dryden flight research center”, teoksessa *2005 IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, MT, USA: IEEE, 2005, ss. 4350–4365. doi: 10.1109/AERO.2005.1559741.
- [18]B. Vogel-Heuser, D. Schütz, T. Frank, ja C. Legat, ”Model-driven engineering of Manufacturing Automation Software Projects – A SysML-based approach”, *Mechatronics*, vsk. 24, nro 7, ss. 883–897, loka 2014, doi: 10.1016/j.mechatronics.2014.05.003.
- [19]A. W. Colombo, S. Karnouskos, ja T. Bangemann, ”A system of systems view on collaborative industrial automation”, teoksessa *2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Cape Town: IEEE, helmi 2013, ss. 1968–1975. doi: 10.1109/ICIT.2013.6505980.
- [20]I. Scheeren ja C. E. Pereira, ”Combining Model-Based Systems Engineering, Simulation and Domain Engineering in the Development of Industrial Automation Systems: Industrial Case Study”, teoksessa *2014 IEEE 17th International Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing*, Reno, NV, USA: IEEE, kesä 2014, ss. 40–47. doi: 10.1109/ISORC.2014.64.
- [21]L. Vlacic *ym.*, ”Automation 5.0: The Key to Systems Intelligence and Industry 5.0”, *IEEECAA J. Autom. Sin.*, vsk. 11, nro 8, ss. 1723–1727, elo 2024, doi: 10.1109/JAS.2024.124635.
- [22]P. J. Amirkhizi, S. Pedrammehr, S. Pakzad, Z. Asady, A. Arogonlo, ja H. Asadi, ”Emerging Synergies: Industry 5.0 Integration of Complex Systems”, teoksessa *2024 IEEE International Systems Conference (SysCon)*, Montreal, QC, Canada: IEEE, huhti 2024, ss. 1–8. doi: 10.1109/SysCon61195.2024.10553432.