

Järjestelmämallintamisen nykytila sotilaskontekstissa

The state of systems modeling within military context today

Kone- ja materiaalitekniikan laitos, teknillinen tiedekunta

Kandidaatintutkielma

Henri Korpela

24.4.2026

Turku

Kandidaatintutkielma

Tutkinto-ohjelma, oppiaine: Konetekniikka

Tekijä: Henri Korpela

Otsikko: Järjestelmämallintamisen nykytila sotilaskontekstissa

Ohjaaja: Yliopistonlehtori Jani Heikkinen

Sivumäärä: 25 sivua

Päivämäärä: 24.4.2026

Tiivistelmä:

Suunniteltaessa laitetta tai järjestelmää nykyaikaiseen sodankäyntiin ja erityisesti tämän päivän muuttuvan maailman uhkkenaarioihin sitä täytyy tarkastella kokonaisuutena. Nykyaikainen sotilaskalusto on hienostunutta, verkottunutta ja järjestelmä on usein osa suurempaa kokonaisuutta. Järjestelmäteknikka ja systeemiajattelu keskittyvät mallintamaan sekä simuloimaan järjestelmää kokonaisuutena ja varmistamaan kokonaiskuvan säilymisen.

Tässä tutkielmassa tehdään kirjallisuuskatsaus järjestelmäteknikan kehityssuunnista ja käytöstä sotilasmaailmassa. Tutkielman tavoitteena on selvittää, mitä järjestelmäteknikasta sotilaskontekstissa on kirjoitettu kirjallisuudessa sekä mitä uusia järjestelmäteknikan menetelmiä ja sovelluksia löytyy sotilasmaailmasta.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella todettiin, että järjestelmäteknikasta käsitteenä ei löydy paljon mainintoja, mutta sen periaatteita ja menetelmiä käytetään paljon sotilasjärjestelmien monimutkaisuuden johdosta. Uusia järjestelmäteknikan kehityssuuntia ovat uhkamallinnus sekä tehtäväsuunnittelu. Kehitystä on tapahtunut mallipohjaisen järjestelmäteknikan sovelluksissa, kuten digitaalisissa kaksosissa. Lisäksi artikkeleita on tehty paljon taistelukentän hallinnasta ja joukko- sekä kalustologistiikasta. Muita aiheita kirjallisuudessa ovat resilienssimalli sekä tekoälyn käyttö sotilasjärjestelmissä.

Abstract:

Designing equipment intended for modern warfare especially in today's rapidly changing global threat landscape necessitates a holistic approach to system design. Modern military systems are characterized by their complexity, interconnectedness and their role within larger, complex architectures. Systems engineering and systems thinking focus on modeling and simulation of the system as a whole and emphasize the coherence and effectiveness across all levels of design.

This thesis explores the developments in the use of systems engineering methods within the military world. A state-of-the-art literature review is conducted and the results are analysed. The aim of this thesis is to find the state of the current literature about systems engineering within military context and what trends are emerging within the military field.

The literature review reveals that while explicit references within literature to systems engineering are relatively sparse, its foundational principles and methodologies are extensively employed to address the inherent complexity of military systems. Emerging trends in systems engineering include threat modeling and mission engineering. There has been development in model-based systems engineering, such as in digital twins. In addition, literature also encompasses a significant number of articles concerning troop and materiel deployment logistics. Other discussed subjects are the resilience model and utilization of artificial intelligence in military systems.

Avainsanat: järjestelmäteknikka, systeemiajattelu, sotilasjärjestelmät

Sisällysluettelo

1	Johdanto	5
1.1	Tutkimusmenetelmät	6
1.2	Järjestelmätekniikan taustaa ja määritelmiä	6
2	Uusimmat kehityssuunnat	9
2.1	Tehtäväsuunnittelu	9
2.2	Uhkamallintaminen	10
2.3	Järjestelmän mallintaminen	11
2.4	Digitaaliset kaksoset	12
3	Järjestelmätekniikan soveltaminen sotilaskäytössä	14
3.1	Puolustusteollisuuden erikoisuudet	14
3.2	Järjestelmämallinnus kalustonhallinnassa	15
3.3	Järjestelmätekniikka logistiikassa	16
3.4	Resilienssimalli	17
3.5	Älykkäät järjestelmät sotilaskäytössä	18
4	Tulokset ja pohdintaa	20
4.1	Järjestelmätekniikan kehityssuuntia sotilasmaailmassa	20
4.2	Järjestelmätekniikan menetelmien käyttö sotilasmaailmassa	20
4.3	Jatkotutkimus	21
	Johtopäätökset	23
	Lähteet	24

1 Johdanto

Vuosikymmenen vaihdos 2020-luvulle tapahtui suurten maailmantapahtumien alla ja kehityskulku on ollut siitä edelleen kohti suurempia muutoksia. Suuria muutoksia sotilasmaailman toimikentällä vallitsevaan tilaan viime vuosina ovat olleet muun muassa Ukrainan sota sekä niin sanotun Pax Americanan päättyminen ja siirtyminen kylmän sodan jälkeisen yksinapaisesta maailmanjärjestyksestä supervaltojen väliseen kilpailuun. Muuttuvaan maailman vaihtuviin uhkaskenaarioihin vastaamaan pyrkivät sotilastahot kohtaavat erityisesti nyt suunnittelun haasteita. Taistelukenttä muuttuu uusien teknologioiden mukana sekä hybridisodankäynnin epäsuorien uhkien ollessa yhä enemmän käytössä. Kauko-ohjatut ja itseajavat droonit, verkossa käytävä sodankäynti sekä fyysiset tai informaatioavaruuden rajatut täsmäiskut ovat hämärtäneet sodan ja rauhan rajaa.

Suunniteltaessa laitetta tai järjestelmää nykyaikaiseen sodankäyntiin ei riitä, että sille annetaan tekniset suunnittelukriteerit, vaan sitä täytyy tarkastella osana kokonaisuutta ja sen tehtävää organisaatiossa. Nykykalusto on yhä hienostuneempaa sekä järjestelmät toisiinsa ja globaalisti kytkeytyneitä. Esimerkiksi hävittäjälentokone koostuu lukuisista eri valmistajien osajärjestelmistä, kuten toimilaitteista ja sensoreista, joiden on toimittava yhdessä. Suunnittelevat sotilastahot sekä niihin monimutkaisesti liittyvä puolustusteollisuus koostuu osin irrallisista, osin toisiinsa kytkeytyneistä sekä niiden välillä liikkuvista toimijoista [1]. Lisäksi suunnittelun osaksi usein kuuluu monta muuta sidosryhmää, kuten siviilihallinto sekä laitteen valmistajan alihankkijat. Järjestelmätekniikka (engl. *Systems Engineering*, SE) keskittyy monimutkaisten kokonaisuuksien esittämiseen. Siinä otetaan huomioon järjestelmän suunnittelu, kehittäminen ja koko elinkaari eri toimijoiden tarpeiden suhteen. Sotilaskäytössä järjestelmille on ominaista vaativat laatu- sekä toimintavaatimukset. Kansalliselle puolustukselle kriittiseltä järjestelmältä vaaditaan virheetöntä suoritumista ja korkeaa suorituskykyä vaikeissakin olosuhteissa. Järjestelmätekniikka tarjoaa tavan suunnitella järjestelmä turvalliseksi ja yhteensopivaksi.

1.1 Tutkimuskysymykset

Tutkimuskysymyksiä on kaksi:

- 1) Minkälaisia järjestelmätekniikan kehityssuuntia löytyy sotilasmaailmassa?
- 2) Minkälaisiin tarkoituksiin järjestelmätekniikan menetelmiä käytetään sotilasmaailmassa?

1.2 Tutkimusmenetelmät

Tässä tutkielmassa tehdään kirjallisuuskatsaus järjestelmätekniikan nykytilasta sotilasmaailmassa tai sotilaskäytössä sekä selvitetään, mitä järjestelmätekniikan sovelluksia on sotilasorganisaatioissa ja puolustusteollisuudessa. Aineistoa etsitään suomen ja englannin kielellä.

Aiheesta on vähän tutkimusta julkisesti saatavilla. Se on sotilasalan luonteen takia pirstaleista ja usein keskittynyt sen lähdeorganisaatioon. Tutkielman tavoite on parantaa kokonais kuvaa sotilasmaailmassa vallitsevasta järjestelmätekniikan nykytilasta sekä löytää teemoja ja lähitulevaisuuden kehityssuuntia julkaistussa kirjallisuudessa.

Tekoälyä käytettiin tiedonhaussa etsimään artikkeleja tietokannoista, tekemään yhteenvetoja ja etsimään termejä osassa lähdemateriaalista ennen artikkelin varsinaista lukemista. Tekstin kirjoittamiseen ei käytetty tekoälyä.

1.3 Järjestelmätekniikan taustaa ja määritelmiä

Tämä luku esittelee järjestelmämallinnuksen käsitteitä, historiaa sekä miten järjestelmätekniikkaa käytetään sotilasorganisaatioissa ja teollisuudessa.

Järjestelmätekniikalle ei ole vakiintunut yhtä hallitsevaa määritelmää tai termiä suomen kielellä, mutta INCOSE - "*The International Council on Systems Engineering*" määrittelee sen monitieteelliseksi lähestymistavaksi ja menetelmiksi onnistuneen järjestelmän toteutumisen mahdollistamiseksi [2]. NASA puolestaan määrittelee järjestelmätekniikan tarkemmin systemaattiseksi ja monialaiseksi lähestymistavaksi järjestelmän suunnitteluun, toteutukseen, tekniseen johtamiseen, käyttöön sekä

käytöstä poistamiseen. Järjestelmä määritellään yhdistelmänä tekijöistä, jotka toimivat yhdessä tuottaakseen toimintakyvyn ja tarpeen saavuttamiseksi [3].

Tässä tutkielmassa järjestelmätekniikka, järjestelmäsuunnittelu tai järjestelmämallinnus (engl. *Systems Engineering*, SE) määritellään menetelmänä ja insinööriyön alana, joka pyrkii mallintamaan sekä simuloimaan järjestelmää ja sen osia kokonaisuutena, varmistaen kokonaiskuvan säilymisen koko elinkaarella ja kaikkien asetettujen tavoitteiden saavuttamisen. Se pyrkii antamaan kokonaiskuvan kaikille sidosryhmille loppukäyttäjistä valmistajaan. Tässä kontekstissa systeemiajattelua (engl. *System Thinking*) käsitellään näiden menetelmien omaksumisena ja niiden pohjalta toimimisena. Tässä tutkielmassa keskitytään järjestelmätekniikkaan teknisenä insinööritieteiden menetelmänä laitesuunnittelussa ja tietotekniikassa.

Järjestelmätekniikassa on useita sivuhaaroja, jotka noudattavat yhteisiä periaatteita, mutta keskittyvät tiettyyn osa-alueeseen. Mallipohjainen järjestelmätekniikka (engl. *Model-Based Systems Engineering*, MBSE) keskittyy järjestelmän yhtenäisten mallien tekemiseen perinteisen dokumentaation sijaan [4]. MBSE:n mukana on kehittynyt alakohtaisia mallinnuskieliä, kuten SysML (*System Modeling Language*) [5].

Järjestelmien järjestelmä -tekniikka (engl. *System of Systems Engineering*, SoSE) jakaa järjestelmän itsenäisiin alijärjestelmiin ja keskittyy niiden välisiin rajapintoihin [4]. Eräs verrattain uusi suuntaus on tehtäväsuunnittelu (engl. *Mission Engineering*, ME), joka priorisoi järjestelmän tehtävää ja määrää järjestelmävaatimukset sen mukaan [4].

Järjestelmätekniikan käsitteistö ei ole vakiintunutta suomen kielellä. Siksi tutkielmassa käytettävät termit, niiden englanninkieliset vastineet ja niiden lyhenteet sekä lyhyt kuvaus on listattu taulukossa 1 selventämään käytettyä kieltä.

Taulukko 1: käytettyjen termien lyhenteet, termit englanniksi ja suomeksi sekä lyhyt kuvaus.

Lyhenne	Käsite englanniksi	Käsite suomeksi	Määritelmä
SE	<i>Systems Engineering</i>	Järjestelmäteknikka	Järjestelmän käsitteleminen kokonaisuutena ja sen osien yhteistoiminnan varmistaminen
	<i>Systems Thinking</i>	Systeemiajattelu	Järjestelmän mieltämien kokonaisuudeksi ja yhteyksien tarkastelu
MBSE	<i>Model Based Systems Engineering</i>	Mallipohjainen järjestelmäteknikka	Keskittyy toimimaan järjestelmän mallien pohjalta
SoS	<i>System of Systems</i>	Järjestelmien järjestelmä	Järjestelmä, joka koostuu useista osakokonaisuuksista
ME	<i>Mission Engineering</i>	Tehtäväsuunnittelu	Menetelmä, joka juontaa kaiken tehtävän suorittamisesta
DE	<i>Digital Engineering</i>	Digitaalitekniikka	Menetelmä, jossa suunnittelu tehdään digitaalisilla malleilla
	<i>Threat Modeling</i>	Uhkamallinnus	
XR	<i>Extended Reality</i>	laajennettu todellisuus	Kattaa virtuaalitodellisuuden (VR) ja täydennetyn todellisuuden (AR)
	<i>Digital Twins</i>	Digitaaliset kaksoiset	Menetelmä, jossa järjestelmästä tehdään virtuaalinen ”kaksonen”
	<i>Domain of Warfare</i>	Sodankäynnin toimintaympäristö	Jaetaan viiteen pääasialliseen: maa, meri, ilma, informaatio sekä avaruus
	<i>Agent, Actor</i>	Toimija	Toiminnallinen yksikkö: henkilö, ryhmä tai organisaatio
	<i>Stakeholder</i>	Sidosryhmä	Ympäristön muut toimijat, joiden kanssa toimija on vuorovaikutuksessa
RMF	<i>Risk-Management Framework</i>	Riskienhallintakehys	Käsitteellinen viitekehys riskienhallinnan toiminnan ohjaamiseen
	<i>Fleet Management</i>	Kalustonhallinta	Nykyisen ja tulevan kaluston, kuten hävittäjien elinkaaren hallinta
CBP	<i>Capability Based Planning</i>	Suorituskykypohjainen suunnittelu	
CZ	<i>Combat Zone</i>	Taistelualaue	

2 Uusimmat kehityssuunnat

Tämä luku käsittelee uusimpia systeemiajattelun trendejä ja tutkimuksen aloja sotilasmaailmassa. Järjestelmätekniiikan menetelmiä on kehitetty ja kokonaan uusia kehityssuuntia syntynyt. Tekniikka kehittyy vauhdilla, minkä ajureina ovat maailman muuttuvat konfliktit ja teknologiset mahdollistajat, kuten niin teollisuuden kuin sotilajärjestelmien robotisaatio ja verkottuminen. Entistä paremmat mallit, anturijärjestelmät ja laajennettu todellisuus (XR) mahdollistavat monimutkaisempien ja älykkäämpien järjestelmien rakentamisen.

Eräitä huomattavia järjestelmätekniiikan trendejä ovat olleet siirtymä mallipohjaiseen suunnitteluun ja dokumentaatioon (MBSE), tästä syntynyt digitaalitekniikka (DE) sekä älykkäiden järjestelmien ja automaation lisääntyminen. Tutkimusta sotilaskäyttöön löytyy huomattavasti siviilivastineita vähemmän, mutta tästäkin voidaan huomata yhtenevyyksiä.

2.1 Tehtäväsuunnittelu

Tehtäväsuunnittelu (engl. *Mission Engineering*, ME) on yksi järjestelmätekniiikan uusi kehityssuunta. Yhdysvaltain puolustusministeriö julkaisi vuonna 2020 tehtäväsuunnitteluoppaan ”*Department of Defence Mission Engineering Guide*” sekä vuonna 2023 laajennetun version 2.0, joka pyrkii asettamaan muodolliset periaatteet tälle uudelle mallille [6]. Tehtäväsuunnittelun voidaan sanoa olevan korkean tason holistinen menetelmä, jossa tarkastellaan osajärjestelmien vaikutuksia järjestelmälle annettuun operaatioon tai missioon eli tehtävään. Tehtäväsuunnittelu keskittyy yhden järjestelmän tai järjestelmien järjestelmän sijaan tarkastelemaan, miten osia muuttamalla voidaan saavuttaa eri lopputulos annetussa tehtävässä. Menetelmän tavoitteena on tehdä tehtävään kykenevä laite ajoissa ja kustannustehokkaasti yhdistämällä järjestelmätekniiikka järjestelmän tehtävävaatimukseen ja huomioimalla yhteensopivuuden vanhojen järjestelmien kanssa [4, 7, 8].

Tehtäväsuunnittelua ehdotetaan käytettävän suorituskyvyn tekijöiden hankintojen suunnitteluun tai resurssien optimaaliseen sijoitteluun. Tarkoituksena on löytää suorituskyvyn aukkoja ja oikea järjestelmä, joka parhaiten saavuttaa halutun tavoitteen

[6, 8]. Tehtäväsuunnittelua sovelletaan toistaiseksi lähinnä korkealla tasolla sotilas- ja siviilihallinnossa Yhdysvaltojen puolustusministeriössä [4, 6, 7, 8]. Sen käyttökohteita löytyy mm. logistiikan resurssienhallinnassa, uuden suorituskyvyn sulauttamisessa nykyiseen joukkoon sekä resurssien ja joukkojen tarpeiden suunnittelussa [8].

Tehtäväsuunnittelun sanotaan eroavan järjestelmätekniikasta sen laajuudessa, sen kattaessa laajemmin operaatio ja taktiset näkökulmat [4]. Tehtäväsuunnittelun voi kuitenkin sanoa vain hyödyntäneen järjestelmätekniikan menetelmiä uudessa viitekehyksessä. Toisaalta yhteisessä viitekehyksessä voi olla organisaatiolle tärkeää yhdenmukaisuutta. Tehtäväsuunnittelu syntyi selkeyttämään joukkojen suunnittelua epäsymmetrisen sodan aikakaudelle, missä tehtäväkuva järjestelmille muuttui alati ja varmistamaan järjestelmän toiminnan osana joukkoa [7].

2.2 Uhkamallintaminen

Nyky maailman sotilastoimijat ovat verkottuneita ja riippuvaisia verkkoon liitetyistä, toistensa kanssa kommunikoivista tietotekniikan järjestelmistä [9]. Osa järjestelmistä on ylikansallisia ja jakaa monen valtiollisen toimijan verkon [9]. Kuitenkin laajat ja jaetut yhteysverkot ovat alttiita kyberhyökkäyksille, missä murto yhden toimijan verkkoon antaa pääsyn yhteisiin jaettuihin tietoihin [9]. Laajojen kokonaisuuksien lisäksi teknologioiden kehityksessä laitteiden pieneminen on mahdollistanut mikrokokoiset älykkäät anturit ja esineiden internetin (IoT), jossa on myös huolehdittava tietoturvasta ja rakennettava järjestelmä vastustuskykyiseksi hyökkäyksille [10]. Esimerkiksi Yhdysvaltain puolustusministeriö on vaatinut kyberturvallisuuden käytäntöjen parantamista liittolaisiltaan [9].

Uhkamallinnus kuuluu osana Yhdysvaltain niin kutsuttuun riskienhallintakehykseen (*Risk Management Network*, RMF) [9]. Yhdysvaltojen liittolaisiin lukeutuvat Israel, Australia, Japani sekä Etelä-Korea ovatkin omaksuneet samankaltaisia kehyksiä parantaakseen kansallista kyberturvaansa. Haasteena tälle ovat kuitenkin usein puolustussektorin vanhentuneet käytänteet. Uhkamallintaminen on systemaattinen prosessi, joka keskittyy tunnistamaan ja lieventämään järjestelmän turvallisuusuhkia [9], [11].

Uhkamallintaminen koostuu viidestä askeleesta: 1. kohteen abstraktio yksinkertaistamalla järjestelmä turvallisuudelle relevanteiksi tekijöiksi, 2. uhantunnistus, 3. uhkaskenaarion arviointi, 4. riskien arviointi priorisoiden niiden vaikutusta ja todennäköisyyttä sekä 5. vastatoimien laatiminen ja toimeenpano. Viimeisimmät tekniikat uhkamallintamisessa ovat automaatio uhkamallien generoinnissa ja uhan tunnistamisessa sekä entistä kehittyneemmät analyysitekniikat. [9]

Puolustusala luo erityisiä vaatimuksia uhkamallinnukselle. Kansalliselle puolustukselle kriittisten järjestelmien on oltava toimintavarmoja ja edistyksellisiä. Valtava skaala, verkottuneisuus, poikkeuksellisen vakavat ja monitahoiset uhat sekä tiukat ohjesäännöt ovat keskeisiä sotilastietojärjestelmien ominaisuuksia siviilivastineisiin verrattaessa [9].

2.3 Järjestelmän mallintaminen

Järjestelmän mallintaminen mallipohjaisen järjestelmätekniikan (MBSE) menetelmillä on kasvavassa suosiossa uusien työkalujen sekä järjestelmien kompleksisuuden kasvaessa. Tässä luvussa käsitellään järjestelmän mallintamista yleisesti, luvussa 4.2 käsitellään järjestelmän mallinnusta erityisesti joukkojen- ja resurssienhallinnan näkökulmasta.

Pilemalm et al. [12] on tehnyt tutkimuksen mallipohjaisesta suunnittelusta Ruotsin Puolustusvoimissa. Tutkimuksessa todetaan mallipohjaisen suunnittelun auttaneen löytämään tarpeettomia järjestelmiä ja esittämään vaikutuksia organisaatioon, mutta tutkimuksessa tarkasteltujen projektien todetaan kärsivän epä johdonmukaisesta terminologiasta, jaettujen mallien ja viitekehysten puutteesta sekä huonosta kommunikaatiosta sidosryhmien ja erityisesti korkeamman johdon kanssa. Valmisteleavan työn puute ilmeni ongelmien synnyttäjäksi, lisäksi sidosryhmien puutteellinen osallistuminen ja tieto johti väärin järjestelmävaatimuksiin. Selkeiden tavoitteiden, johdon tuki kaikissa vaiheissa ja riittävien resurssien todetaan olevan onnistumisen ehtoja mallipohjaisen suunnittelun implementoinnissa.

Tutkimuksessa uusien tekniikoiden käytön odotettiin selkeyttävän, vähentävän redundanssia ja ohjaavan järjestelmää vastaamaan paremmin tarpeisiin, mutta

vaikutuksia ei tutkimuksen valmistumiseen mennessä oltu ehditty nähdä viivästysten ja implementoinnin haasteiden takia. Tutkimuksessa todetaan tiedonkeräyksen ja suunnittelukriteereiden asettamisen sekä uusien työskentelytapojen olevan suurempi haaste kuin itse tekninen mallinnustyökalujen käyttö. Tutkimus osoittaa, että vaikka mallipohjainen suunnittelu tarjoaa teoreettisia etuja, käytännön toimeenpanossa kohdataan organisaation toiminnan ja järjestelmän suunnittelun haasteita. Suurimmat haasteet kuitenkin osoittautuivat samoiksi kuin kaikessa suunnittelutyössä. [12]

Mainitsemisen arvoista on puhua ilmailuteollisuudesta, missä siviili- ja puolustusteollisuus on tiiviisti kytköksissä. Alalla turvallisuus, lentokelpoisuus ja dokumentaatio ovat prioriteetteja. Elakramine et al. [13] ehdottaa MBSE pohjaista SysML mallinnuskieltä käytettäväksi lentokoneiden kunnossapidossa ja toteaa nykyisten vallitsevien käytänteiden olevan vanhanaikaisia, sirpaleisia sekä virhealttiita.

Yksi erityisesti pinnalla oleva aihe juuri nyt ovat miehittämättömät lennokit eli dronit (engl. UAV – ”*unmanned aerial vehicle*”). Droniteknologia on rajusti kasvava ja kehittyvä ala, joka kattaa monia niin vakiintuneita siviili- ja sotilaslaittevalmistajia, kuten kiinalainen DJI tai yhdysvaltalainen General Atomics, mutta myös suuren määrän täysin uusia valmistajia, jotka pyrkivät vakiinnuttamaan asemansa toimikentällä. Górski et al. [14] tutkimuksessa todetaan tarve metodologialle järjestelmän toimivuuden ja turvallisuuden testaukseen ja todentamiseen, mihin MBSE tekniikat, kuten tilakoneet voisivat tarjota hyvän ratkaisun. Kauko-ohjauksen todetaan vaativan korkean tason vaatimusten sisällyttämistä kaikissa suunnittelun vaiheissa sekä järjestelmä-arkkitehtuurin mallintamiseen käytettävän UML, SysML, FSM ja EFSM kieliä [14].

2.4 Digitaaliset kaksoset

Digitaaliset kaksoset ovat yhä suosituimpi, kehittyvä menetelmä mallintaa dynaamisesti suuria kokonaisjärjestelmiä. Luomalla virtuaalinen replika, ”kaksonen”, voidaan järjestelmän useiden antureiden antamaa tilannekuvaa valvoa ajantasaisesti, skenaarioita voidaan simuloida ja järjestelmää optimoida virtuaalisesti. Digitaalisia kaksosia luonnehtii korkea tarkkuus, reaaliaikaisuus ja suuri datamäärä [15].

Digitaalisen kaksosen toiminta perustuu fyysisiin järjestelmiin, virtuaalisiin järjestelmiin ja kommunikaatorajapintaan niiden välillä. Kaksisuuntainen tietoliikenne erottaa ne

niin kutsutuista ”digitaalisista varjoista”, millä tietoliikenne on vain tosimaailmasta mallille. ISO 23247 yhdenmukaistaa digitaalisten kaksosten metodiikan ja sitä kehitetään edelleen tavoitteena kattaa tulevaisuudessa koko digitaalisten kaksosten metodiikka [16]. Digitaalisten kaksosten kehitys on mahdollistunut viime vuosina erityisesti esineiden internetin (IoT), sulautettujen antureiden, algoritmien ja koneoppimisen, simulaatiojärjestelmien, tietoverkkotekniikan sekä laajennetun todellisuuden – XR teknologioiden nopean kehityksen myötä [15].

Sotilasmaailman näkökulmasta digitaaliset kaksoset voidaan jakaa kolmella tavalla. Ensimmäinen on jakamalla ne temaattisesti toimintaympäristön (maa, meri, avaruus, informaatio) mukaan, jolloin saadaan usein myös looginen jako organisaatiossa. Toinen tapa on jakamalla sovelluskohteet humanistiseen, resursseihin ja ympäristö kategorioihin saavutetaan tosielämässä käytännöllisempi monitoimialainen jako. Kolmas tapa on hierarkkisesti järjestelmien järjestelmä -jaolla, missä digitaaliset kaksoset alkaen pienimmästä yksiköstä voidaan liittää suurempiin ja monimutkaisempiin kokonaisuuksiin. [15]

Digitaalisten kaksosten sovelluksia on jo käytössä ja suunnitteilla useita. Ympäristöä mallintavia digitaalisia kaksosia on suunnitteilla sotilaslaitosten, kuten tukikohtien ja satamien ennakoivaan huoltoon ja liikenteenvalvontaan. Esimerkkejä teollisuudessa löytyy simulointi- ja XR-työkaluista operaattorien kouluttamiseen, meriteollisuudesta esimerkiksi Fincantieri FCX30 ennakoivan huollon parissa, maakalustossa LNDS-Arcuus NumCo -rynnäkkövaunuprojektissa, lentoteollisuudessa Lockheed Martinin F-35-hävittäjän rakenteiden valvonnassa ja ennakoivan huollon seurannassa, kalustonhallinnassa sekä avaruusteollisuudessa satelliittien valvonnassa ja avaruusmission suunnittelussa [15]. Lisäksi taistelunjohtoon ja joukkojenhallintaan on kehitteillä työkaluja, niistä tarkemmin luvussa 4.2. Informaatioavaruuden sovelluksia ovat uhkien simulointi ja uhkiin vastaamisharjoittelu [15]. Digitaalisilla kaksosilla on suuri potentiaali sotilaskäytössä, mutta tiedon turvallinen käsittely ja integrointi muihin tietojärjestelmiin on väistämättä vaikeampaa kuin siviilikäytössä. Haasteiksi niille voidaan tunnistaa yhtenäisen terminologian ja standardien puute, turvallinen datankäsittely, vielä kehitysasteella olevat teknologiat sekä osaavan henkilöstön puute ja kustannukset [15].

3 Järjestelmätekniiikan soveltaminen sotilaskäytössä

Järjestelmän suunnitteleminen sotilaskäyttöön luo omia haasteita. Monimutkaisia järjestelmiä voidaan ymmärtää paremmin järjestelmätekniiikan metodiikalla kuin perinteisillä deterministisillä tekniikoilla [1]. Järjestelmätekniiikan käytöstä on haastavaa tehdä kokonaisvaltaista tutkimusta sotilasalan salaisen luonteen takia ja siksi tieto eri toimijoiden käytänteistä on usein sirpaloitunutta.

3.1 Puolustusteollisuuden erikoisuudet

Puolustusteollisuus koostuu suuresta joukosta eri toimijoista, jotka toimivat toistensa ja sidosryhmiensä kanssa monimutkaisessa yhteistyössä. Teollisuudenalaan kohdistuu poikkeuksellisen paljon valtiotason ohjausta materiaalin ja informaation arkaluonteisuuden vuoksi. Puolustusteollisuutta voidaan luonnehtia monimutkaiseksi, toisiinsa liitetyksi järjestelmäksi, missä ihmiset, huipputekniset laitteet, alustat ja tietojärjestelmät kanssakäyvät dynaamisesti. [1] Tärkeimmät tavoitteet puolustusteollisuuden tuotteille on synnyttää ja ylläpitää valmiutta sekä operatiivista saatavuutta [1]. Käytännössä tämä tarkoittaa parempien järjestelmien kehittämistä ja vanhojen ylläpitämistä tasolla ja määrissä, mitkä voidaan todeta riittäväksi.

Kansalliselle puolustukselle oleellisten järjestelmien on toimittava takuuvarmasti. Tämä on yksi syy, miksi puolustusteollisuuden tuotteille on tyypillistä siviilivastineisiin verrattuna suuret kustannukset. Vaikka tuote olisi saatavilla kaupallisesti, sille usein asetetaan erityisvaatimuksia tietoturva- tai yhteensopivuussyistä. Esimerkiksi toimitusketjujen jäljitettävyyden on korostunut viime vuosina. Useat valtiolliset toimijat ovat asettaneet ehtoja, vientirajoitteita sekä kieltäneet tiettyjen maiden tuotteet puolustusteollisuudessaan ja sotilasorganisaatioissa käytettäville laitteille ja niiden osille, kuten Euroopan Unionin kaksikäyttöisten tarvikkeiden rajoitukset 2021/821 [17].

Puolustusteollisuuden monimutkaisuus johtuu kahdesta päätekijästä: osaavan henkilöstön kouluttamisesta sekä kulujen, aikataulujen ja riskitekijöiden hallinnasta järjestelmän elinkaaren aikana [1]. Özdemir et al. [1] toteaa alati kasvavan kompleksisuuden kasvattavan haasteita päätöksentekoon puolustusteollisuudessa ja järjestelmätekniiikan menetelmien tarjoavan mahdollisen ratkaisun.

Järjestelmätekniikan organisaatiokeskeisillä menetelmillä, kuten VSM – ”*Viable Systems Model*” sekä SD – järjestelmädynamiikka -tekniikoilla voidaan mallintaa yhteyksiä ja tasoja organisaatiossa ja sen sidosryhmissä [1].

3.2 Järjestelmämallinnus kalustonhallinnassa

Joukkojen ja kalustonhallinta kattaa kaiken järjestelmien hankkimisesta niiden tehokkaaseen käyttöön ja sijoitteluun toimialueella. Se on monimutkainen tehtävä, joka vaatii hyvää kokonaiskuvan hahmottamista.

Koivisto et al. [18] on tehnyt kattavan tutkimuksen puolustushankintojen kyvykkyyssopjaiseen suunnitteluun (engl. *capability-based planning*, CBP) systeemiajattelun näkökulmasta. Kyvykkyyssopjainen suunnittelu CBP pyrkii kehittämään sotilaallista suorituskykyä laaja-alaisesti eikä aikaisempien mallien tavalla, mitkä keskittyvät tiettyihin uhkiin tai vastustajiin. Tutkimus toteaa tämän menetelmän olevan laajasti käytössä NATO-jäsenmaissa, mutta sen tulkinnoissa ja sovelluksissa olevan eroja [18]. Tutkimuksessa esitetään sarja yhdessä toimivia malleja kokonaiskuvan luomiseksi sekä menetelmän käytön yhtenäistämiseksi.

Tutkimuksessa esitellään kolme mallia suorituskyvyn suunnitteluun yhdistämällä systeemiajattelu nykyisiin CBP-malleihin. Ensimmäinen esitelty malli on kontekstimalli, joka perustuu ympäristön tekijöiden kuten vihollisten, muiden omien järjestelmien, sääolojen tai maasto-olosuhteiden ja järjestelmän väliseen kanssakäymiseen. Toinen on korkean tason tietomalli, jossa on listattu keskeisimmät käsitteet ja niiden yhteydet. Sen tehtävänä on yhdistää todellisen maailman tekijät, kuten joukkoyksiköt suunnitteluelementteihin. Kolmas malli on UML-luokkakaavio, jossa materiaaliressurit ja niiden vuorovaikutukset voidaan määritellä ja ne voivat muuttua dynaamisesti. Tutkimuksessa todetaan esitettyjen mallien sopivan mallinnukseen tarvittavan suorituskyvyn määrittelyvaiheesta, yksikön suunnitteluun ja toteutusvaiheeseen [18].

Hausken et al. [19] esittelee uuden matemaattisen mallin mallintaa sodankäyntiä kahden yhdeksästä kalustotyypistä koostuvan joukon välillä. Malli soveltaa Lanchasterin lakien perusteella mallia suhteelliseen ja epäsuhtaiseen taisteluun (engl. *aimed and unaimed combat*) huomioiden vaihteleva tappionopeus (engl. *variable kill*

rate) taistelutempon ja materiaalin kulutuksen mukaan. Malli käyttää yhdeksää kalustoluokkaa, jotka ovat vuorovaikutuksessa vihollisen kalustoon, kuten lentokoneet ja helikopterit ovat haavoittuvaisia ilmapuolustukselle sekä muille ilma-aluksille. Malli tarjoaa yleistävän viitekehyksen heterogeenisten joukkojen mallintamiseen.

Mittal et al. [20] tutkii artikkelissa tapausesimerkein sotilasjärjestelmien haasteita sopeutua nopeasti muuttuviin uhkiin ja uusiin teknologioihin. Artikkelitoteaa perinteisten tuotannon etenemissuunnitelmien (engl. *Roadmapping*) riittämättömäksi sotilassovelluksiin ja niiden jättävän taistelukentän muuttuvan luonteen ja vastustajien sopeutumisen huomiotta suunnitteluvaiheessa. Tämän ratkaisemiseksi ehdotetaan suunnitteluvaiheen sotaharjoituksia ja simulointia, jotta saadaan kerättyä tietoa mahdollisesta vastustajan vastatoimista järjestelmälle.

3.3 Järjestelmätekniikka logistiikassa

Sodankäynti vaatii suuren määrän eri aseita ja asejärjestelmiä. Niiden ylläpito ja hallinta on suuri haaste, joka vaatii osaavaa tukiorganisaatiota sekä oikea-aikaista täydennystä ja huoltoa. Eri asetyyppien, kaluston sekä täydennystarvikkeiden yhteensopivuuden ja sijoittamisen hallitsemiseksi vaaditaan huomattavia resursseja sekä taitoa. Fedorovich et al. [21] tutkii artikkelissaan ampumatarvikkeiden logistiikkaketjuja toimittajalta taistelualueelle ja niiden prosessien mallintamista sekä osaavan henkilöstön koulutusta käyttämään tehokkaasti näitä resursseja. Artikkelitunnistaa useita puutteellisesti kirjallisuudessa käsiteltyjä tekijöitä, kuten monesta lähteestä pienissä erissä tulevat tarvikkeet, logistiikkakeskusten etäisyys rintamalle sekä vaihtelevan kuljetuskaluston vaikutus toimitusketjuun ja pyrkii tarjoamaan toimitusketjun malleja, jotka ottavat nämä huomioon.

Artikkelissa ehdotetaan uuden asejärjestelmän käyttöönottoon kolmiosaista viitekehystä, jonka tekijöinä on: matemaattinen malli aseiden, varaosien ja ampumatarvikkeiden toimittajien valinnan optimointiin, logistiikkaketjun simulaatiomalli sekä avaintaitoihin (kompetensseihin) perustuva koulutusmalli. Esiitetty malli on systemaattinen esitys käytännön sovelluksiin.

Gang Ding et al. esittelee järjestelmien järjestelmä -menetelmän (SoS) kaluston kunnossapidon simulointimallin sekä mallin simulaation tehokkuuden arviointiin. Tutkimuksessa painotetaan kokonaisvaltaisen mallin tärkeyttä monimutkaisten sotilasjärjestelmien kuten lentokoneiden kunnossapidossa. Kunnossapidon simulaatiomallissa otetaan huomioon ja mallinnetaan dynaamisesti kunnossapidon tehtäviä kuten huoltoa, täydennyksiä ja viankorjauksia tarpeen mukaan. Tutkimuksessa tehdään myös simulaation arviointimalli, joka arvioi kunnossapidon tehokkuutta. [22]

Resurssien niukkuus taistelukentällä vaatii priorisointia ja saatavilla olevan kaluston jakaminen vaatii strategista suunnittelua. Fedorovich et. al [23] toisessa tutkimuksessa keskittyy strategiseen aseiden sijoitteluun taistelualueilla. McConnell et al. [24] esittelee suunnittelutyökalun sotaretken logistiikkaverkon ylläpitämiseen. Malli on stokastinen kehys, joka huomioi epävarmuuden ja mallintaa uhkia, tehden siitä joustavamman tosimaailmaan.

3.4 Resilienssimalli

Epävakaan maailmanpolitiikan johdosta yhteiskunnan resilienssistä eli kyvystä vastustaa sokkeja järjestelmään ja palautua niistä on tullut puhuttu aihe. Hodicky et al. [25] esittää artikkelissaan tavan parantaa organisaation resilienssin arviointia sisällyttämällä massadataa eli raakaa datavirtaa useasta lähteestä ja koneoppimisalgoritmeja järjestelmän dynaamiseen malliin. Tutkimus jatkaa aiempaa NATO:n kokonaisvaltaisen resilienssin mallia, joka käyttää dynaamista järjestelmän mallinnusta resilienssin arvioinnissa [26]. Artikkelissa esitellään uusi malli, ”*Joint Operations Area Resilience Model*”, joka käyttää massadataa useasta lähteestä, kuten tietokannoista tai sosiaalisesta mediasta ennustamaan sokkiparametrejä, kuten sokin suuruutta ja kestoja. Mallin tarkoitus on tehdä työkalu johtajille ja päättäjille, jonka avulla voidaan arvioida tehdä valistuneita päätöksiä. Artikkelissa esitetään web-pohjainen simulaatio-ohjelma, joka automaattisesti kerää dataa strategisista sokeista, kuten sähkökatkoista ja koneoppimisen avulla tekee sisääntuloarvoja, joita voidaan käyttää dynaamisessa järjestelmämallissa reaaliaikaisesti [25].

3.5 Älykkäät järjestelmät sotilaskäytössä

Kehittyneet algoritmit, koneoppiminen sekä tekoälymallit ovat mahdollistaneet älykkäiden järjestelmien rakentamisen. Tekoäly on ollut viime vuosina näistä puhutuimpia aiheita. Puolustusosalalla vaikuttaa olevan voimakas tahtotila sisällyttää tekoälyä järjestelmiin. Esimerkiksi Yhdysvaltain puolustusministeriö sijoittaa miljardeja tekoälyn kehitykseen puolustusjärjestelmissä [27]. Tekoäly valtaa alaa teollisuudessa ja viihteessä, kuluttajalle näkyvimpänä muotonaan suuret kielimallit.

Koneoppimisen ja tekoälymallien avulla järjestelmästä voidaan tehdä oppiva ja joustavampi [27]. Järjestelmätekniikan näkökulmasta voidaan sanoa, että älykkäät järjestelmät yhtäältä lisäävät kompleksisuutta ja vaativat huolellista integraatiota järjestelmään, mutta toisaalta tarjoavat joustavuutta ja automaatiota. Sotilaskäytössä älykkäillä järjestelmillä on potentiaalisia käyttökohteita matalan tason antureista aina korkean tason massadatan valvontaan [27]. Käyttökohteita on esimerkiksi jo aiemmin mainituissa IoT-sovelluksissa, älykkäissä antureissa, automaatiossa ja tiedonkäsittelyssä. Sodankäynnissä älykkäitä järjestelmiä on nähty esimerkiksi drooneissa automaattisena kohteenhakuna sekä autonomisena tehtävän suorittamisena [27]. Tulevia käyttökohteita tekoälylle voisi olla kyberavaruuden tarkkailussa ja kuvasyötteen valvonnassa sekä datankäsittelyssä [27].

Sotilaskäyttö on silti haastava ympäristö älykkäille järjestelmille. Järjestelmien verkottuneisuus luo haavoittuvuuden elektroniselle sodankäynnille ja kyberriskuille. Lisääntynyt autonomia on nostanut esiin eettisiä kysymyksiä ihmisen tekemien päätösten vähentyessä. Autonomisten asejärjestelmien käytössä on toimintaan vaikuttavia kysymyksiä. Epävarma, arvaamaton toiminta ja vastuunkanto ihmishenkien riistosta ovat ominaisuuksia, jotka tekevät tekoälystä huonosti sopivan sodankäyntiin. Sotilasjärjestelmät voivat vastata ihmishengistä ja niiden tulisi olla paitsi toimintavarmoja, niin myös ihmisen päätäntävällässä.

Moniagenttijärjestelmät ovat useista tekoälymalleista koostuvia yhdessä toimivia verkkoja, jotka pyrkivät ratkaisemaan niille asetettuja tehtäviä. Carvalho et al. tutkimuksessa käsitellään tekoälypohjaisten moniagenttijärjestelmien (engl. Multi-Agent Systems, MAS) käyttöä komento- ja ohjausrakenteiden (engl. Command and

Control, C2) mallintamiseen sotilaskäytössä [28]. Tutkimuksessa vertailtiin erilaisia taistelukentän verkkoympäristöemulaattoreita ja niiden sopivuutta simulaatiolle. Verkkoympäristöissä pyrittiin simuloimaan usean agenttimallin yhteistoiminnalla toimivia komento- ja ohjausjärjestelmiä. Tutkimuksessa onnistuttiin simuloimaan moniagenttijärjestelmää, ja esitetyjä menetelmiä voidaan hyödyntää esimerkiksi parvirobotiikassa (engl. *swarm robotics*) [28].

4 Tulokset ja pohdintaa

Tämä luku käsittelee tutkielman pohdintaa aiheesta sekä yhtenevyyksiä ja eroavaisuuksia materiaalissa. Kirjallisuutta järjestelmän mallintamisesta sotilaskontekstissa löytyi suhteellisen paljon ja sisällöltään laaja-alaisesti. Lisäksi on huomionarvoista, kuinka useasta eri instituutiosta ja maasta artikkeleja on julkaistu. Erityisesti taistelukentän logistiikkaan liittyvistä aiheista löytyi suhteellisen laaja määrä artikkeleita.

4.1 Järjestelmätekniiikan kehityssuuntia sotilasmaailmassa

Järjestelmätekniiikan uusia kehityssuuntia sotilaskäytössä ovat uhkamallinnus sekä tehtäväsuunnittelu, jotka molemmat keskittyvät korkean tason suunnitteluun ja johtamiseen. Uhkamallinnus on käytössä tietotekniikan sovelluksissa ja se on tärkeä työkalu kehittämään alati kasvavista tietoverkoista turvallisempia ja vastustuskykyisempiä. Tehtäväsuunnittelu on ensisijaisesti tarkoitettu käytettäväksi kaluston käytön suunnittelussa. Sen tavoite on löytää sopivin järjestelmä vastaamaan organisaation tarpeisiin ja toimimaan yhdessä muiden käytettävien järjestelmien kanssa, vaikka uhkaympäristö muuttuisi ja järjestelmän tehtäväkuva olisi erilainen.

Monessa artikkelissa korostetaan henkilöstön osaamisen tärkeyttä. Uusien menetelmien onnistuneeseen käyttöönottoon on oleellista organisaation osien halu omaksua uutta ja toimia yhdessä. Tänä päivänä erilaisia mallinnusmenetelmiä on saatavilla valtaisa määrä ja järjestelmien kompleksisuus kasvaa. Siksi suunnittelijan työssä korostuu taito valita sopivin työkalu.

4.2 Järjestelmätekniiikan menetelmien käyttö sotilasmaailmassa

Järjestelmätekniiikan käytöstä ei ole tehty kokonaisvaltaista tutkimusta sotilaskäytössä. Julkisesti saatavilla olevan tutkimuksen määrä sekä laajuus on suppeaa. Tutkielman tiedonhaussa löydettiin irtonaisia artikkeleita erinäisistä aiheista. Lisäksi kirjallisuudessa esitettyjen menetelmien käytöstä eikä niiden toimivuudesta tyypillisesti kerrota organisaation ulkopuolelle. Järjestelmätekniiikkaa ei käsitteenä mainita useassa lähteessä, mutta sen piirteitä ja menetelmiä on havaittavissa kaikkialla.

Syynä tiedon puutteeseen saattaa olla käsiteltävien järjestelmien tilan ja toiminnan salaisuus sekä organisaatioiden motiivit pitää käytössä olevat menetelmät salassa. Organisaatiolle on edullisempaa olla jakamatta tietoa käytetyistä menetelmistä, kuin julkistaa toimintatavat. Jos esimerkiksi organisaatiossa on käytössä vanhentuneita menettelyjä, kannattaa se salata, jotteivat sidosryhmät tai kilpailijat saa tietää tästä puutteesta tai pahimmillaan haavoittuvuudesta. Toisaalta, jos käytetyistä menetelmistä jaettaisiin avoimemmin tietoa, esimerkiksi käytettyjen mallien toimivuudesta käytännössä, voitaisiin järjestelmän kehitys avata tiedeyhteisölle, mikä olisi eduksi myös lähdeorganisaatiolle. Tämä on johtanut siihen, että saatavilla olevasta julkistetusta materiaalista voidaan nähdä trendi, missä ainoastaan onnistumiset julkistetaan. Jos projekti epäonnistuu tai käytetyt menetelmät eivät täytä odotuksia, ei epäonnistumisista tiedoteta organisaation ulkopuolelle.

Mallipohjaisista järjestelmätekniikan (MBSE) sovelluksista löytyi paljon tutkimuksia, erityisesti autonomisista järjestelmistä ja ilmailuteollisuudesta. Lisäksi digitaalisista kaksosista sotilaskäytössä löytyi kattavasti materiaalia. Taistelukentän hallinnasta ja joukkologistiikasta löytyi useita tuoreita teoksia. Myös tehtäväsuunnittelun voidaan sanoa käyttävän MBSE-tekniikoita.

Yhteiskunnan resilienssi on ollut esillä viime vuosina ja ylikansalliset toimijat kuten NATO tehneet tutkimusta aiheesta. Järjestelmään kohdistuvia sokkeja voidaan kuvata ja ennakoita uuden resilienssimallin avulla, mikä voi auttaa päättäjiä tekemään valistuneita päätöksiä.

Puolustusteollisuuden tahtotila on sisällyttää tekoälyä sotilasjärjestelmiin. Tekoälystä sotilasmaailmassa ja järjestelmätekniikassa löytyi useita artikkeleita, mutta useassa ei ollut varteenotettavaa sanomaa. Toistaiseksi älykkäiden järjestelmien määrä lisääntyy, mutta tekoälyn sovelluskohteet ovat rajattuja ja kohdistettuja tiettyihin toimintoihin, kuten dronin autonomiseen lentoon.

4.3 Jatkotutkimus

Tutkielman kirjallisuuskatsaus osoitti tarpeen määrälliselle ja laadulliselle tutkimukselle järjestelmätekniikan käytöstä sotilasaloilla. Jos käytössä olevista

menetelmistä saataisiin enemmän tietoa, voitaisiin tehtävää tutkimusta kohdentaa näiden menetelmien kehittämiseen ja parantamiseen. Tällä hetkellä kirjallisuudessa on tyypillistä esitellä malli ja mahdollinen esimerkki sen käytöstä, mutta jatkokehitys ja mallin käytännön soveltuvuus jäävät tuntemattomiksi.

Johtopäätökset

Tässä tutkielmassa tehtiin kirjallisuuskatsaus järjestelmäsuunnitteluun ja systeemiajatteluun sotilasmaailmassa, sen sovelluksiin, käyttöön sekä uusiin tutkimuksiin, joita aiheesta löytyy.

Nykyaikaisten sotilasjärjestelmien kompleksisuuden ja verkottuneisuuden takia järjestelmäteknikka on välttämätön työkalu varmistamaan järjestelmän toimivuus ja yhteensopivuus. Sotilasjärjestelmät voivat olla hyvin monimutkaisia ja yhteen liitettyjä, mutta silti niiltä vaaditaan toimintavarmuutta. Kirjallisuuskatsauksen ja analyysin tuloksena järjestelmäteknikan soveltaminen sotilasmaailmassa on sen erikoisuuksista huolimatta mahdollista ja suotavaa sekä, että siitä löytyy sovelluksia monialaisesti ja laitetasolta aina korkean tason johtamiseen.

Uusia järjestelmäteknikan kehityssuuntia sotilasmaailmassa ovat uhkamallinnus sekä tehtäväsuunnittelu, jotka molemmat keskittyvät korkean tason suunnitteluun ja johtamiseen. Järjestelmäteknikan menetelmiä käytetään laajasti, mutta vailla yhtenäistä viitekehystä tai toimintatapamallia. Mallipohjainen suunnittelu valtaa alaa myös sotilasmaailmassa.

Järjestelmäteknikan uusia tutkimuskohteita on useita. MBSE-sovelluksia on tehty kaikissa toimintaympäristöissä ja uusia teoreettisia malleja on esitetty mm. ilmailualalla. Taistelukentän hallinnasta ja joukkologistiikasta löytyi useita uusia teoksia, jotka käsittelevät logistiikkaketjuja sodan ja rauhan aikana. Muita uusia aiheita kirjallisuudessa ovat resilienssimalli, jolla voidaan mitata järjestelmän sietokykyä ja palautumista kriiseistä sekä tekoälyn käyttö ja sovellukset sotilasjärjestelmissä.

Lähteet

- [1] M. H. Özdemir ja G. Özkan, ”Understanding Defense Industry: A Systems Thinking Perspective”, *PERCEPTIONS*, vol. 26, nro 2, s. 241–258, tammi 2022.
- [2] ”SEBoK”. Viitattu: 15. helmikuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: [https://sebokwiki.org/wiki/Guide_to_the_Systems_Engineering_Body_of_Knowledge_\(SEBoK\)](https://sebokwiki.org/wiki/Guide_to_the_Systems_Engineering_Body_of_Knowledge_(SEBoK))
- [3] ”SEH 2.0 Fundamentals of Systems Engineering - NASA”. Viitattu: 9. helmikuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.nasa.gov/reference/2-0-fundamentals-of-systems-engineering/>
- [4] C. Kennedy ja M. Efatmaneshnik, ”The Evolution of Mission Engineering Within the Military Context”, teoksessa *2024 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*, loka 2024, s. 1–8. doi: 10.1109/ISSE63315.2024.10741155.
- [5] ”SysML FAQ: What is SysML?”, SysML.org. Viitattu: 23. helmikuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <https://sysml.org/sysml-faq/sysml-faq/what-is-sysml.html>
- [6] ”Mission Engineering – ASW(MC)”. Viitattu: 20. helmikuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <https://ac.cto.mil/mission-engineering/>
- [7] Robert, ”Mission Engineering: A Technical Perspective”, International Test and Evaluation Association. Viitattu: 9. helmikuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <https://itea.org/journals/volume-45-3/mission-engineering/>
- [8] I. M. Ali, E. Suprun, H. H. Turan, E. Aly, U. Turhan, ja S. Elsayah, ”Advanced mission engineering approach for diverse applications in the defense domain”, *Journal of Defense Modeling & Simulation*, s. 15485129251375495, loka 2025, doi: 10.1177/15485129251375495.
- [9] H. Cho ja S. Kim, ”Threat Modeling for the Defense Industry: Past, Present, and Future”, *IEEE Access*, vol. 13, s. 53276–53304, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3550337.
- [10] J. B. F. Sequeiros, F. T. Chimuco, M. G. Samaila, M. M. Freire, ja P. R. M. Inácio, ”Attack and System Modeling Applied to IoT, Cloud, and Mobile Ecosystems: Embedding Security by Design”, *ACM Comput. Surv.*, vol. 53, nro 2, s. 25:1–25:32, maaliskuu 2020, doi: 10.1145/3376123.
- [11] ”Threat Modeling | OWASP Foundation”. Viitattu: 21. helmikuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: https://owasp.org/www-community/Threat_Modeling
- [12] S. Pilemalm, N. Hallberg, M. Sparf, ja T. Niclason, ”Practical experiences of model-based development: Case studies from the Swedish Armed Forces”, *Systems engineering*, vol. 15, nro 4, s. 407–421, 2012, doi: 10.1002/sys.21203.
- [13] F. Elakramine, R. Jaradat, N. Ullah Ibne Hossain, M. Banghart, C. Kerr, ja S. El Amrani, ”Applying Systems Modeling Language in an Aviation Maintenance System”, *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 69, nro 6, s. 4006–4018, joulukuu 2022, doi: 10.1109/TEM.2021.3089438.
- [14] T. Górski ja W. Stecz, ”A Method for Modeling and Testing Near-Real-Time System Scenarios”, *Appl. Sci.*, vol. 14, nro 5, 2024, doi: 10.3390/app14052023.
- [15] M. Giberna ym., ”On Digital Twins in Defence: Overview and Applications”, 7. elokuuta 2025, *arXiv*: arXiv:2508.05717. doi: 10.48550/arXiv.2508.05717.
- [16] ”ISO 23247-1:2021”, ISO. Viitattu: 22. helmikuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.iso.org/standard/75066.html>
- [17] *Regulation (EU) 2021/821 of the European Parliament and of the Council of 20 May 2021 setting up a Union regime for the control of exports, brokering, technical assistance, transit and transfer of dual-use items (recast)*, vol. 206. 2021. Viitattu: 28. helmikuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <http://data.europa.eu/eli/reg/2021/821/oj>
- [18] J. Koivisto, R. Ritala, ja M. Vilkkö, ”Conceptual model for capability planning in a military context – A systems thinking approach”, *Systems Engineering*, vol. 25, nro 5, s. 457–474, 2022, doi: 10.1002/sys.21624.
- [19] K. Hausken ja J. F. Moxnes, ”Modeling warfare between different kinds of military equipment”, *Ann Oper Res*, vol. 357, nro 2–3, s. 1003–1019, helmikuu 2026, doi: 10.1007/s10479-025-06840-0.
- [20] V. Mittal ja A. Davidson, ”Combining Wargaming With Modeling and Simulation to Project Future Military Technology Requirements”, *IEEE Trans. Eng. Manage.*, vol. 68, nro 4, s. 1195–1207, elokuu 2021, doi: 10.1109/TEM.2020.3017459.

- [21] O. Fedorovich, I. Chepkov, M. Lukhanin, Y. Pronchakov, K. Rybka, ja Y. Leshchenko, "Modeling of supply logistics and training of military personnel for the successful use of weapons in a combat area", *Radioelectronic and Computer Systems*, nro 3, s. 33–46, syys 2022, doi: 10.32620/reks.2022.3.03.
- [22] G. Ding, L. Cui, F. Zhang, C. Shi, X. Wang, ja X. Tai, "Simulation Evaluation and Case Study Verification of Equipment System of Systems Support Effectiveness", *Systems-Basel*, vol. 13, nro 2, s. 77, helmi 2025, doi: 10.3390/systems13020077.
- [23] O. Fedorovich, M. Lukhanin, O. Prokhorov, O. Slomchynskiy, O. Hubka, ja Y. Leshchenko, "Simulation of arms distribution strategies by combat zones to create military parity of forces", *reks*, nro 4, s. 209–220, joulu 2023, doi: 10.32620/reks.2023.4.15.
- [24] B. M. McConnell *ym.*, "Assessing uncertainty and risk in an expeditionary military logistics network", *Journal of Defense Modeling & Simulation*, vol. 18, nro 2, s. 135–156, huhti 2021, doi: 10.1177/1548512919860595.
- [25] J. Hodický, G. Ozkan, H. Ozdemir, M. Inal, J. Drozd, ja P. Stodola, "Big Data and Machine Learning Techniques to Parametrize Strategic Shocks for Resilience Measurement", teoksessa *Modelling and Simulation for Autonomous Systems*, J. Mazal, A. Fagiolini, P. Vašík, A. Bruzzone, S. Pickl, P. Stodola, V. Neumann, ja P. Loučka, Toim., Cham: Springer Nature Switzerland, 2026, s. 227–241. doi: 10.1007/978-3-031-99732-7_15.
- [26] J. Hodický, G. Özkan, H. Özdemir, P. Stodola, J. Drozd, ja W. Buck, "Analytic Hierarchy Process (AHP)-Based Aggregation Mechanism for Resilience Measurement: NATO Aggregated Resilience Decision Support Model", *Entropy*, vol. 22, nro 9, s. 1037, syys 2020, doi: 10.3390/e22091037.
- [27] A. B. Rashid, A. K. Kausik, A. Al Hassan Sunny, ja M. H. Bappy, "Artificial Intelligence in the Military: An Overview of the Capabilities, Applications, and Challenges", *International Journal of Intelligent Systems*, vol. 2023, nro 1, s. 8676366, tammi 2023, doi: 10.1155/2023/8676366.
- [28] L. Filipe Batista Silva de Carvalho *ym.*, "Multi-agent systems modeling of command and control systems: a metrics-driven approach to simulator evaluation and co-simulation", *J. Simul.*, 2025, doi: 10.1080/17477778.2025.2584542.