



Vesa Viljanen

Kyberfyysisten järjestelmien mallintaminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (YAMK)

Älykäs teollisuus

Opinnäytetyö

20.5.2021

Tiivistelmä

Tekijä: Vesa Viljanen
Otsikko: Kyberfyysisten järjestelmien mallintaminen
Sivumäärä: 106 sivua + 0 liitettä
Aika: 20.5.2021

Tutkinto: Insinööri (YAMK)
Tutkinto-ohjelma: Älykäs teollisuus
Ammatillinen pääaine:
Ohjaajat: Yliopettaja Erkki Räsänen
Yliopettaja Jarno Varteva

Kyberfyysisten järjestelmien (CPS) ja niiden toiminnallisuuksien dynamiikan mallintamiseen ja simulointiin liittyvät menetelmät, prosessit ja analyysit ovat tämän tutkimuksen kohteena. Tutkimuksessa selvitetään kyberfyysisen järjestelmän määritelmää ja luodaan sille yksinkertaistetut reunaehdot, joiden avulla kyseisten järjestelmien ominaispiirteet muuttuvat ymmärrettävämmiksi. Yksinkertaistamisen kautta kyetään luokittelemaan järjestelmiä ominaisuuksiensa puolesta kyberfyysisiksi ja tavoitellaan kasvanutta käsityskykyä toteuttaa erilaisia kyberfyysisiä järjestelmiä kuvaavia malleja ja hyödyntää niitä simulaatioissa. Tutkimus on läpileikkaus mallintamiseen liittyvistä osakokonaisuuksista, joka itsessään luo pohjaa jatkotutkimusten toteuttamiseksi ja täten ratkaisee mallintamiseen liittyviä käytännönhaasteita.

Kyberfyysinen järjestelmä on toiminnallinen kokonaisuus, joka muodostuu kybertoiminnallisuuksista, fyysisistä toiminnallisuuksista ja nämä läheisesti yhdistävästä rajapinnasta. Kyberfyysiset järjestelmät ovat tietokoneiden ja automaation keksimisen jälkeen tulleen nk. neljännen teollisen vallankumouksen keskeisin uudistus ja tulevaisuuden suuntaus (Teollisuus 4.0). Tutkimuksessa kyberfyysinen järjestelmä käsitellään viiden toisiinsa sidonnaisesti olevan ominaisuuden kautta, jotka ovat liike / aktuaatio (A), aistimus / sensaatio (S), kommunikaatio (C), ohjaus / älykkyys (I) ja energeettisyys (E). Järjestelmän määrittämisen lisäksi mallinnuksen kohteita ovat kybertoimintaympäristöt ja fysikaaliset toimintaympäristöt, sekä järjestelmien sisällä ja järjestelmien välillä tapahtuvat informaatiolliset palautesilmukat.

Tutkimuksen alustuksessa tarkastellaan tulevaisuusnäkökulmaa digitalisoituvassa maailmassa, jolla taustoitetaan tutkimuksen lähtökohtia. Toisessa osuudessa määritellään mitä on mallintaminen, miten mallinnuksiin voidaan suhtautua ja mitä osia kokemuspohjaisesti kehiteltyyn mallintamisen kokonaisuuteen kuuluu. Kolmannessa osuudessa on toteutettu nykytila-analyttinen rekonstruktio ja analyysi tukiasemaverkkojen luotettavuudesta, joka on katsottu tässä tutkimuksessa kyberominaisuuksien kannalta kriittisimmäksi mallintamisen tarpeen kohteeksi. Neljännessä osuudessa määritellään yksittäistä kyberfyysistä järjestelmää usealla eri tavalla, sekä tarkastellaan erilaisia tapoja mallintaa niitä rakenteellisuuksien ja toiminnallisuuksien tasoilla. Viidennessä osuudessa on toteutettu numeroitu dynamiikan mallintamisen prosessi, joka hyödyntää mallintamisen kokonaisuuden jaottelua. Dynamiikan mallintamiseen liittyy täydelliset järjestelmämallien ja ympäristöjen väliset simulaatiot, kuin HWIL-simulaatiot (hardware-in-the-loop), joiden avulla pyritään tuottamaan keinotekoisista dataa analysoitavaksi. Mallien, simulaatioiden ja analyysien toteuttamiseksi on luotu ohjelmistovälikäyttö ja arvioperusteinen ohjelmistojen hyödynnettävyydematriisi. Kuudennessa osuudessa on itsekriittisyyden ja käsitteiden tutkimisen tarpeen tueksi toteutettu kysely kyber-, ja kyberfyysisen järjestelmän käsitteiden tunnettavuudesta ja ymmärrettävyydestä.

Avainsanat: kyber, fyysinen, järjestelmä, CPS, mallinnus, malli

Abstract

Author: Vesa Viljanen
Title: Modeling of cyber-physical systems
Number of Pages: 106 pages + 0 appendices
Date: 20 May 2021

Degree: Master of Engineering
Degree Programme: Intelligent Technology
Professional Major:
Instructors: Erkki Räsänen, Principal Lecturer
Jarno Varteva, Principal Lecturer

Methods, processes and analyzes related to the modeling and simulation of the dynamics of cyber-physical systems (CPS) and their functionalities are the subject of this study. The study clarifies the definition of a cyber-physical system and creates simplified boundary conditions for it, which make the characteristics of these systems more understandable. Through simplification, it is possible to classify systems as cyber-physical in terms of their properties, and the aim is to have an increased understanding of the ability to implement various models describing cyber-physical systems and to utilize them in simulations. The study is a cross-section of the sub-entities related to modeling, which in itself creates a basis for the implementation of further studies and thus solves the technical practical challenges related to modeling.

A cyber-physical system is a functional entity consisting of cyber functionalities, physical functionalities, and an interface that closely connects them. Cyber-physical systems are the most important reform and future trend of the so-called Fourth Industrial Revolution (Industry 4.0) since the invention of computers and automation. In the study, the cyber-physical system is addressed through five interrelated attributes, which are movement / actuation (A), sensation (S), communication (C), control / intelligence (I), and energy (E). In addition to system definition, the objects of modeling include cyber operating environments and physical operating environments, as well as information feedback loops within and between systems.

The presentation of the study examines the future perspective in the digitalizing world, which sets the background for the research. The second part defines what modeling is, how modeling can be approached and what parts belong to an experience-based modeling entity. In the third part, a state-of-the-art analytical reconstruction and analysis of the reliability of base station networks has been carried out, which is considered in this study to be the most critical modeling need for cyber features. The fourth section defines a single cyber-physical system in several different ways, and examines different ways of modeling them at the levels of structures and functionalities. In the fifth part, a numbered dynamics modeling process is implemented, which utilizes the division of the modeling entity. Dynamic modeling involves complete simulations between system models and environments, rather than HWIL (hardware-in-the-loop) simulations, which aim to produce artificial data for analysis. In order to implement models, simulations and analyzes, a software study and an evaluation-based software utilization matrix have been created. In the sixth part, a survey on the familiarity and comprehensibility of the concepts of cyber and cyber-physical systems has been conducted in support of the need for self-criticism and the study of concepts.

Keywords: cyber, physical, system, CPS, modeling, model

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Tulevaisuus verkottuneessa maailmassa	1
1.2	Tutkimuksen lähtökohdat	7
1.3	Tutkimuksen kolme keskeisintä tavoitetta	11
1.4	Tutkimuksessa käytettävät käsitteet	11
1.5	Tutkimuksen lähestymistavat	15
1.6	Monimenetelmälliset tutkimusmenetelmät	16
1.7	Tutkimuksen rajaukset	17
2	Mallintaminen	18
2.1	Mallintamisen kokonaisuus	18
2.2	Rekonstruointi	22
2.3	Luova mallintaminen	22
2.4	Simulointi	24
2.5	Visualisointi	26
3	Nykytila-analyysi mallintamisen tarpeen kohteesta	27
3.1	Tukiasemaverkkojen luotettavuuden arviointi kartoittamalla	27
3.2	Kartoituksen tekninen toteutus	29
3.3	Mittaus	30
3.4	Rekonstruointi, visualisointi ja analyysi	30
3.5	Johtopäätökset	33
4	Kyberfyysinen järjestelmä (CPS)	36
4.1	Käsiteanalyysi	37
4.2	Lähdehakutulosten analysointi	39
4.3	Määritelmän abstrakti kuvaus	41
4.4	Yleinen määritelmä ja konkreettinen kuvaus	43
4.5	Älyn määritelmä (älykäs agentti)	48
4.6	ASCIE-malli	50
4.6.1	Käsitteet ja käsitekaavio	52

4.6.2	Aktuaattorit (A)	54
4.6.3	Sensorit (S)	55
4.6.4	Tiedonsiirtoyhteydet (C)	55
4.6.5	Ohjaukset / Älyt (I)	56
4.6.6	Energiat (E)	56
4.6.7	Järjestelmien sovittaminen ASCIE-malliin	57
4.6.8	ASCIE-mallin käytännön esimerkki	59
4.7	Standardien mukaiset vaihtoehdot ASCIE-mallille	60
5	Kyberfyysisten järjestelmien dynamiikan mallintaminen	62
5.1	Mallintamisen prosessin kuvaus	62
5.2	Käyttöön soveltuvia ohjelmia	64
5.3	Yksittäisen järjestelmän mallintaminen (1A)	66
5.3.1	UML-mallinnus (Unified Modeling Language)	67
5.3.2	Oliomallit ja toiminnalliset malliyksiköt (FMU)	69
5.3.3	3d-mallien hyödyntäminen	71
5.4	Skenaarion määrittely (1B, 1C)	72
5.4.1	Järjestelmien toiminnan mallinnus	73
5.4.2	Toimintaympäristöjen mallinnus	75
5.5	Dynamiikan laskenta (2A – 2C)	76
5.5.1	Kappaleiden mekaniikan laskentamallit	77
5.5.2	Aaltojen etenemisen, säteilyn ja kenttien laskentamallit	78
5.5.3	Informaation etenemisen laskentamallit	82
5.6	Visualisointi (3)	85
5.7	Datan prosessointi (4A – 4C)	86
5.7.1	Liikkeiden analysointi	87
5.7.2	Suorituskykyjen analysointi	88
5.7.3	Tilannekuvan analysointi	90
5.8	Tehokkuuden ja luotettavuuden arviointi (5A – 5C)	92
5.8.1	Toiminnan tehokkuus	93
5.8.2	Vikaantumistodennäköisyys	94
5.8.3	Tilannetietoisuus	95
5.9	Ohjelmien hyödynnettävyydsmatriisi	96
5.10	Dynamiikan mallintamisen yhteenveto	97
6	Kysely kyberalan tutkimuksesta ja kyberfyysisistä järjestelmistä	98
6.1	Kyselyn sisältö	98

6.2	Kyselyn tulokset	99
6.3	Kyselyn toteutus	101
6.4	Kyselyn johtopäätökset	102
6.5	Kyselyn yhteenveto	104
7	Yhteenveto	104
7.1	Yleisesti	104
7.2	Mallinnusmenetelmien hyödyntäminen käytännössä	105
7.3	Tutkimuksen onnistuminen	105
7.4	Jatkokehitettävää	106
	Lähteet	107

Lyhenteet

- 3D: Kolmiulotteisuus, esim. kolmiulotteinen malli (3d-malli).
- AI: Tekoäly (Artificial Intelligence).
- ASCIE: Tutkimuksessa määritelty yksinkertainen järjestelmämalli. Liike (A), aistimus (S), kommunikaatio (C), ohjaus/älykkyys (I) ja energieettisyys (E)
- CPS: Kyberfyysinen järjestelmä (Cyber-physical system).
- DT: Digitaalinen kaksonen (Digital Twin).
- FANET: Infrastruktuuriton mesh-topologinen ilma-alusten välinen verkko (Flying adhoc network).
- FMI: Toiminnallisten malliyksiköiden rajapinta (Functional Mock-up Interface).
- FMU: Toiminnallinen malliyksikkö (Functional Mock-up Unit).
- FOM: HLA arkkitehtuurin mukaiset mallit (Federate Object Model).
- HIL/HWIL: Kone osana simulaatiota (Hardware-in-the-loop).
- HITL: Ihminen osana simulaatiota (Human-in-the-loop).
- HLA: Simulaattoreita yhdistävä arkkitehtuuri (High Level Architecture).
- i5D: Viidennen ulottuvuuden operaatiot.
- IoT: Esineiden internet (Internet of Things).

- LPWAN: Matalatehoinen laajan alueen verkko (Low Power Wide Area Network).
- LTE-M: Kapeakaistainen ja matalatehoinen 3GPP LPWAN -standardin mukainen IoT-yhteys (LTE-Machine Type Communication).
- LVC: Taksonomia erilaisille simulaatioille (Live, Virtual & Constructive).
- M2M: Tiedonsiirto suoraan koneesta koneeseen ilman infrastruktuuria (Machine to Machine).
- MANET: Infrastruktuuriton mesh-topologinen mobiiliverkko (Mobile adhoc network).
- NB-IoT: LTE-M yhteyksiä kapeakaistaisempi ja matalatehoinen 3GPP LPWAN -standardin mukainen IoT-yhteys (Narrowband IoT).
- OSI: Malli tietoliikenneverkkojen toiminnasta (Open Systems Interconnection Reference Model).
- PFD: Vikaantumistodennäköisyys (Probability of Failure on Demand).
- SDx/SDE: Toteuttaa ohjelmallisesti määriteltynä kaikki palvelun osat (Software-defined everything).
- TCP/IP: Transmission Control Protocol / Internet Protocol.
- UML: Kaavioiden piirtämiseen tarkoitettu kieli (Uniform Model Language).
- VANET: Infrastruktuuriton mesh-topologinen ajoneuvojen välinen verkko (Vehicular adhoc network).
- XaaS: X as a Service. Kuvaa jonkin asian tarjoamista palveluna.

1 Johdanto

1.1 Tulevaisuus verkottuneessa maailmassa

Digitalisaation kiihtyessä 2000 luvun alusta eteenpäin, perinteisten pöytätietokoneiden, kannettavien ja palvelimien rinnalle on muodostunut kattava kirjo erilaisia pieniä käsin pidettäviä järjestelmiä, joiden laskennallinen suorituskyky (Apple A13 Bionic prosessori) vastaa 2010 luvun alun PC-tietokoneiden Intel i7 prosessoreja (Notebookcheck.net 2020). Käsin pidettävien laitteiden lisäksi puettavien järjestelmien (mm. älyrannekkeet ja älysormukset) ja muihin laitteisiin, kuten ajoneuvoihin sulautettujen järjestelmien määrät ovat kasvaneet. Merkittävää kasvua tekevät myös älykkäät sisä- ja ulkotiloihin asennettavat esineiden internetin IoT ja IIoT-järjestelmät, joilla on niin kotien kuin teollisuuden automaatiojärjestelmiä uudistava vaikutus (NCTA 2020; Frangos 2017). Laskennallisen suorituskyvyn kasvu mikropiiriteknologian kehittyessä, signaalien käsittelyn ja akkujen kehitys on mahdollistanut näihin mukana kulkeviin laitteisiin ja sulautettuihin järjestelmiin erilaisten tiedonsiirtoyhteyksien kustannustehokkaan integroinnin.

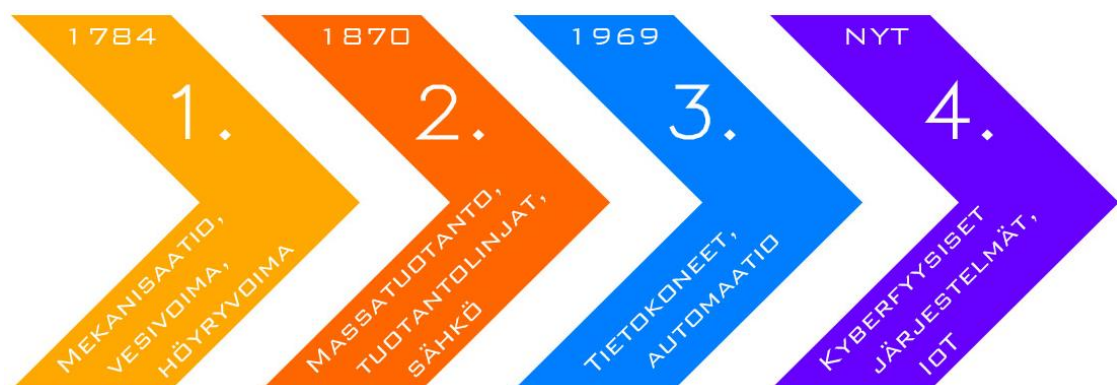
Mobiililaitteiden päivittäisen käytön pohjalta voi todeta mobiiliyhteyksien toimivuuden olevan tänä päivänä Suomessa varsin hyvä ainakin tiheimmin asutuilla alueilla (Elisa 2020). Kehitys matkapuhelinten tiedonsiirtoyhteyksien osalta on käynnistynyt 1990 luvulla GSM:n (2G) myötä ja se jatkuu edelleen, jossa juuri käyttöön astunutta 5G teknologiaa ja kapeakaistaisempia LPWAN-yhteyksiä, kuten LTE-M ja NB-IoT:tä voidaan pitää yhtenä kehityksen mittarina. 5G ja muut tulevaisuuden teknologiat mahdollistavat yhä useamman liikkuvan laitteen verkkoon liittymisen ja tiedonsiirtoyhteyksien nopeutumisen (Keskinen 2019, 17-33). Tulevaisuudessa älykkäät järjestelmät voivat kehittyä entistä monipuolisemmiksi, sillä erilaiset yhteydet mahdollistavat yhä kattavammin reaaliaikaisen informaation, kuten sensoreiden raakadatan siirtämisen kentältä pilvipalveluihin tai suoraan järjestelmästä toiseen M2M-tekniikoilla.

Suurien datamäärien vuoksi hajautetun reunalaskentatekniikan kysyntä on kasvanut, sillä kaiken sensori- ja ohjaustiedon siirtäminen useista eri lähteistä suoraan datakeskuksiin kuormittaisi nopeampia kaapeliyhteyksiäkin merkittävästi. Reunalaskennan tarkoitus on hajauttaa laskentaa ja parantaa tiedon saatavuutta lähemmäs tiedon tuottajaa ja tarvitsijaa (Keskinen 2019, 50-53). Teknisen kehityksen ja globaalien kulutuksen kasvun myötä on jouduttu pohtimaan vaihtoehtoisia kestävän kehityksen ratkaisuja, joka on yksi älykkäiden järjestelmien tärkeä soveltamisen kohde. Tulevaisuuden haasteet kohdistuvat mm. ekologisuuteen, liikkumiseen, toimintojen tehokkuuden parantamiseen ja laatuun, sekä energian ja ruuan tuotantoon. Samalla eri arvoverkostot nopeutuvat, monimutkaistuvat ja muuttuvat herkemmiä häiriöille, jolloin järjestelmien luotettavuusvaatimukset kasvavat ja turvallisuusympäristöt muuttuvat. (Bartodziej 2016, 1-2.)

Informaatiota kerätään ja siirretään entistä enemmän, nopeammin, tarkemmin ja kauemmas erilaisista älykkäistä järjestelmistä toiseen. Näin ollen vaatimukset infrastruktuurin ja palvelujen osalta kasvavat. Tulevaisuudessa informaatiomäärältään paisuvien tilannekuvien ja datamassojen hallintaan voidaan vastata kokonaisuudessaan ohjelmallisesti määritellyillä SDx/SDE ratkaisulla. Ohjelmallisesti määritellyt ratkaisut ovat suuntaus, jonka tavoitteena on integroida IT-palvelujen osia lähemmäs toisiaan, sekä avata rajapintoja mm. autonomisille prosesseille. Se kätkee sisälleen käytännössä kaikki tämän hetken IT-alan kehittyvät ohjelmistopohjaiset trendit, kuten infrastruktuurin ja sovellusten virtualisoinnin, pilvipalvelut (IaaS, PaaS, SaaS), automaation, tekoälyn (AI) ja monia muita. Suuntauksen tavoitteena on tehdä IT-palveluista entistä älykkäämpiä, dynaamisempia ja skaalautuvampia. Etenkin tekoälyyn perustuvalla autonomisuudella voidaan saavuttaa merkittäviä hyötyjä datamassojen käsittelyssä, jotka eivät muuten olisi mahdollisia. (Sdxcentral 2021; Bartodziej 2016, 75-78.)

Autonomisuudella tarkoitetaan järjestelmän itseohjautuvuutta, jolla korvataan ihmisen rajalliset kyvyt monimutkaisten prosessien käsittelyssä. Esimerkiksi erilaisten autonomisten ajoneuvojen kyydissä ei tarvitsisi olla ihmistä ohjaajana

vaan ajoneuvo ajaisi itsenäisesti matkustajat haluttuun kohteeseen tai monimutkaistuvat autonomiset tietoverkot osaavat valvoa ja ohjata entistä älykkäämmin itseään. Ajoneuvojen autonomisuus voi mahdollistaa esimerkiksi uudenlaiset julkisen liikenteen konseptit, liikenteen tarkemman valvonnan ja ohjaamisen, sekä parantaa liikenneturvallisuutta. Tällaiset järjestelmät edellyttävät myös tiedonsiirrolta uusia ratkaisuja, kuten MANET, VANET ja FANET -tyyppisiä ilman infrastruktuuria toimiva mesh-topologisia yhteyksiä, jossa järjestelmät voivat keskustella suoraan keskenään M2M-periaatteella (Tareque ym. 2015, 1-4). Kuvatut tekniset ratkaisut ovatkin hyvin riippuvaisia palveluntarjoajien kyvyistä perustaa keskitettyjä tilannekuvajärjestelmiä autonomisiin järjestelmiin perustuvien palvelujen toimivuuden takaamiseksi. Jatkovana trendinä ovat skaalautuvien palvelujen keskittäminen suuriin hybridipilvipalveluihin, joilla em. tilannekuvia kyetään koostamaan ja prosessoimaan. Tämän päivän informaatioteknologinen kehitys on ollut tietokoneen keksimisen jälkeen niin merkittävää, että sitä on alettu kutsua jo neljätenä teollisena vallankumouksena eli Teollisuus 4.0:na (Industry 4.0) (Keskinen 2019, 3; Bartodziej 2016, 32–34, 75-78).



Kuva 1. Teolliset vallankumoukset (Viljanen 2021).

Informaatiokeskeisen kehityksen eli digitalisaation myötä keskusteluihin ja sanojen etuliitteisiin on tullut mukaan aiempaa useammin sana kyber (eng. cyber). Kyber- käsite on lähtöisin jo 1940 luvulta matemaatikko Norbert Wienerin kirjasta *Cybernetics: or control and communication in the animal and the machine*, johon se on lainattu Kreikan kielen sanasta *kybereo*, joka tarkoittaa ohjaamista tai hallinnointia (TEPA 2021a). Kybernetiikka (cybernetics) on edelleen nimitys

kyseisen tieteen alalle. Kybernetiikassa tutkitaan järjestelmien säätö- ja viestintäteknikkaa, kuten erilaisia laitteita, jotka ovat kytkettynä tietokoneisiin, sekä tietokoneiden välisiä tietoverkkoja ja niissä tapahtuvaa tiedon hallintaa. Nykyään kyber- käsite mielletään helposti uhkana, kuten tietoverkoissa käytäväksi sodaksi ja siihen liittyvään tietoturvallisuuteen. Toinen mihin kyber- mielletään helposti, on cyberpunk-tyyli (Newitz 2013). Näin ollen kyber- käsitteen ja kybernetiikan tekninen ja filosofinen merkitys mahdollisuutena uhan sijaan saattaa unohtua, joka on kuitenkin hyvin keskeinen osa informaatiokeskeisen kehityksen seuraavia vaiheita. (Britannica 2014; 2021.)



Kuva 2. Verkottunut yhteiskunnallinen toimintaympäristö (Viljanen 2020).

Kuvassa 2 on havainnollistettu verkottunutta yhteiskunnallista toimintaympäristöä, jossa vaaleanpunaiset viivat kuvaavat tukiasemien ja niissä kiinni olevien päätelaitteiden välisiä linkkejä. Näiden linkkien määrän, yhteystyyppien ja kais-

tanleveysvaatimusten voidaan ennustaa kasvavan tulevaisuudessa langattomien laitteiden monipuolistuessa entisestään. Samalla yhä useamman järjestelmän tulisi olla langallisesti kuituverkossa tai paikallisessa langattomassa verkossa, jotta laajemman toiminta-alueen omaaville langattomille järjestelmille voidaan taata riittävästi käyttökelpoista kaistaa. Informaation digitalisointi, siirtäminen, hallinnointi ja suojaaminen muodostavat kyber-käsitteen olennaisimman merkityksen yhteiskunnan toiminnoille. Sen merkitys ja suojaamisen tarve yhteiskunnassa on noussut jo niin korkealle, että puolustusallalla maa, ilma, meri ja avaruus toimintaympäristöjen lisäksi informaatio- ja kyberoperaatioille on lisätty viidennen ulottuvuuden käsite i5d (Fifth Dimension Operations) (Wikipedia 2021b). Tätä niin kutsuttua operaatioiden viidettä ulottuvuutta eli käytännössä digitaalisen tiedonvaihdon ja -säilönän kaikkia merkityksellisiä osia voidaan kutsua abstraktina kokonaisuutena kyberavaruudeksi. Kyberavaruus koostuu kaikista verkoissa olevista asioista, kuten tiedonsiirtoon liittyvistä säännöistä. Esimerkiksi yhteyskäytännöistä eli protokollista (sis. IP-osoitteet). Hieman vastaavasti fyysikaalinen avaruus koostuu kaikista fyysisistä asioista, kuten luonnosta ja luonnonilmiöistä. (NIST 2021; MPKK 2014, 45; Mathworks 2021.)

Informaatioteknologisten järjestelmien systeemitiedon käsittelyyn liittyy keskeisesti myös virtuaaliympäristöt. Virtuaaliympäristöt ovat kyberavaruuden taustalla olevaan informaatioulottuvuuteen ohjelmoimalla luotuja tiloja, joihin voidaan ladata, säilyttää ja käsitellä siellä olevaa tietoa. Virtuaaliympäristöjä ovat mm. verkkosivut ja muut käyttäjälle näkyvät palvelut. Virtuaaliympäristöt sijaitsevat informaationa tietoverkkojen laitteissa, keinotekoisien muistien sisällä ja loogisissa prosesseissa. Jotta ihminen voi saavuttaa ymmärryksen virtuaaliympäristöissä tapahtuvista asioista, tulee sen kyetä aistimaan niitä kognitiivisesti esimerkiksi älypuhelimien näytön kautta ja vaikuttamaan sinne kosketusominaisuuksien avulla. Tämä luo kumpaankin suuntaan stimuloivan aistikokemuksen eli palautesilmukan ihmisen ja koneen välille, jota voidaan kutsua käsitteellä human-in-the-loop (HITL). Vastaavasti koneiden välisten verkkojen kautta pyritään luomaan palautesilmukoihin perustuvaa tekoälyllistä tiedonvaihtoa koneiden välille. Näin virtuaaliympäristön sovellukset voivat toimia vuorovaikutteisesti fyysikaalisessa avaruudessa sijaitsevan toimintaympäristön fyysisten ilmiöiden ja

asioiden kanssa. Fysikaalisella toimintaympäristöllä tarkoitetaan jotain fyysistä ja rajallista tilaa, joka on jonkin toiminnan kannalta merkityksellistä. Esimerkiksi tietyllä alueella olevia ihmisiä, rajallista osaa luonnosta tai avaruudesta. Kuvassa 2 esitetty verkottunut yhteiskunnallinen toimintaympäristö on kuvitteellinen näkemys eräänlaisen fysikaalisen toimintaympäristön elementeistä.

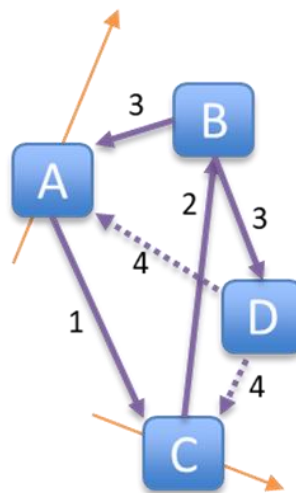
Toimintaympäristöjen ilmiöitä voidaan ymmärtää seuraamalla kattavasti erilaisien laitteisiin kiinnitettyjen sensorien avulla. Esimerkiksi lämpötila- ja kosteus-sensorein, akustisin sensorein, käyttölaittein (HID) tai minkä tahansa muun tallentimen tai kuvantavan laitteen avulla. Rajapintoja, joissa ihminen on kognitiivisesti kytköksissä järjestelmään, kutsutaan HMI:ksi (human machine interface) tai yleisesti I/O (input/output). I/O-laitetta voisi kutsua ns. rajapintalaitteeksi, jossa rajapinta muodostuu abstraktilla tavalla tarkasteltuna jonkin virtuaalimaailman tai kyberavaruuden ja fysikaalisen avaruuden väliin. Koska em. abstrakti rajapintalaitte on käsitteenä tuntematon ja epätarkka, käytetään sen sijaan tässä tutkimustyössä käsiteltävää kyberfyysistä järjestelmää (eng. CPS, Cyber-physical system). (Lee 2021; Mathworks 2021; Coronado Systems 2000, 6-8.)

Kyberfyysisten järjestelmien, kuten älylaitteiden, IoT-laitteiden, verkottuneiden sulautettujen järjestelmien, autonomisten järjestelmien ja muiden verkottuneiden ohjausjärjestelmien määrä on jatkuvassa kasvussa, joka tekee tulevaisuusnäkömystä kokonaisuutena katsoen varsin mielenkiintoisen. Voisi esittää kysymyksiä mihin kaikkiin jo keksittyihin järjestelmiin tullaan tulevien vuosien aikana integroimaan tietoverkkoja hyödyntäviä kyberominaisuuksia. Vaikka kysymys tältä osin onkin mielenkiintoinen, tutkimustyössä ei ole tarkoitus syventyä ajatukseen mihin kaikkeen näitä ominaisuuksia voidaan integroida, sillä naivistinen vastaus on kaikkeen. Kiinnostus käännetäänkin seuraaviin kysymyksiin:

- Mitä informaatiokeskeisestä kehityksestä seuraa teknisen suunnittelun näkökulmasta? (Luku 1)
- Mitä kehityksestä ja suunnittelusta tulisi ymmärtää? (Luvut 2, 3, 6, 7)
- Miten kehitykselle ominaisia ilmiöitä voidaan mallintaa? (Luvut 4, 5)

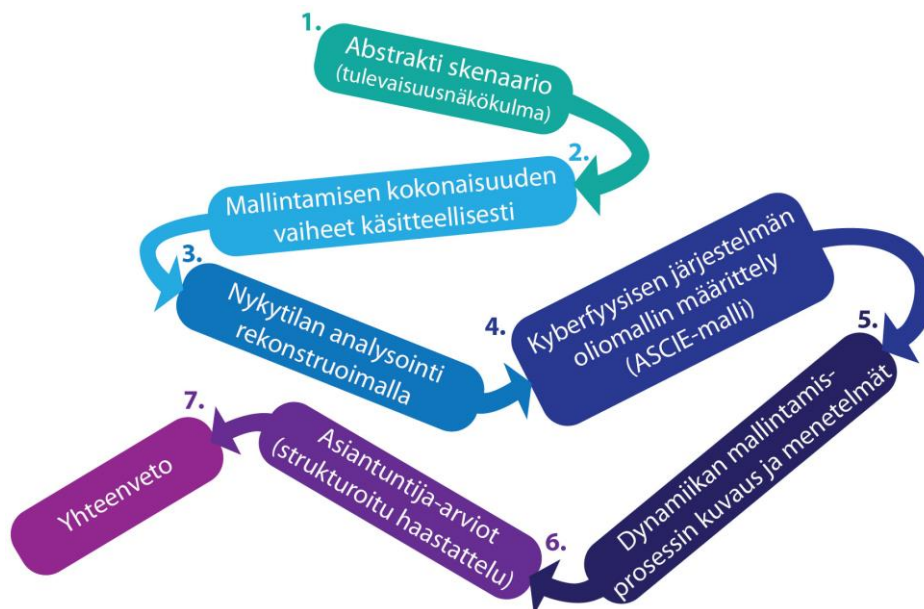
1.2 Tutkimuksen lähtökohdat

Tutkimuksen tavoite tieteellisesti kuvattuna, voidaan ajatella olevan keinojen selvittämistä dynaamisten hybridijärjestelmien vuorovaikutus- ja syy-seuraus-suhteiden ymmärtämiseksi. Dynaamisuudella tarkoitetaan ajallisesti muuttuvaa eli liikevoimallista. Hybridillä tarkoitetaan yhdistelmää. Luonnollisessa kontekstissa dynaamisia hybridijärjestelmiä ovat mm. langattomat kyberfyysiset järjestelmät, jotka kohtaavat toimintaympäristöissään jatkuvia muutoksia lähinnä omasta ja muiden liikkeestä tai ympäristönsä muutoksista johtuen. Kuvassa 3 on kuvattu ajatusta, jossa A ja C järjestelmät liikkuvat oranssien nuolien suuntiin. Muut nuolet kuvaavat A, B, C, ja D järjestelmien välisiä viestiliikenteitä numeroidussa järjestyksessä, jossa katkoviivaiset nuolet ovat epävarmoja yhteyksiä. Kuvan kautta esitetty kysymys kuuluu esimerkiksi, mitä kukin järjestelmä tietää toisistaan, mikäli yhteydet toimivat tai eivät toimi ja mikä tilannekuvan vaikutus on laajemman kokonaisuuden toiminnalle. Järjestelmien välisen tilannetietoisuuden mallinnus on yksi konkreettinen asia, johon tämän tutkimuksen avulla pyritään. (Sayama 2019, 25, 285; Zamani 2018; Heo & Varshney 2005, 83.)



Kuva 3. Tilannetietoisuuden haasteet (Viljanen 2021).

Tutkimuksen lähtökohdaksi asetettu ongelma pohjautuu kybernetiikan tutkimukseen, mutta käytännönläheisistä lähtökohdista. Tutkimuksessa on käytetty sovellettua tapaa käsitellä aihetta käsitteiden ymmärtämisen ja erilaisten prosessien kautta, joka tukisi yhtenäisen mallintamisprosessin toteuttamista. Mallintamisprosessin avulla on pyritty löytämään käyttökelpoisia menetelmiä ja ohjelmia. On myös tunnistettu, että kyseiseen käyttötärpeeseen soveltuvia mallinusohejelmia on ollut suhteellisen vähän tai ainakin vasta vähän aikaa (COSSIM 2015). Järjestelmien monimutkaistuminen ja eri tekniikoiden sujuva hyödyntäminen edellyttää laajojen kokonaisuuksien ymmärtämistä ja uuden oppimista, joka on yksi tutkimuksen lähtökohta. Tutkimustyön luvut ovat epämuodollisesti kuvattuna auki kuvassa 4.



Kuva 4. Tutkimuksen vaiheet epämuodollisesti (Viljanen 2021).

Kyberfyysisien järjestelmien mallintamisen keskeisimpiä haasteita on kyetä kuvaamaan järjestelmien välisten tiedonsiirtoyhteyksien ja muiden järjestelmän osien muutoksellisuuden vaikutuksia. Esimerkiksi miten yhteyksien puute tai muu järjestelmän osan toimimattomuus vaikuttaa tietovirtoihin ja toimintaympäristöistä muodostettujen tilannekuvien kokonaisuuteen, kuten jo kuvassa 3 on

kuvattu. Ongelmatilanteita voi muodostua niin fyysisen toimintaympäristön radiotaajuuksien etenemisessä, kuin kybertoimintaympäristössä esimerkiksi OSI-mallin seitsemässä eri vaiheessa. (ISO 1987; Pappas 2008.)

Ideaalitilanteessa kaikki järjestelmän osat toimisivat aina täydellisesti, mutta langatonta tiedonsiirtoa hyödyntäville järjestelmille on periaatteessa annettu mahdollisuus olla kiinteitä järjestelmiä epätäydellisempi, johtuen erityisesti langattomien yhteyksien häiriöherkkyydestä. Epätäydellisyydellä tarkoitetaan tässä tapauksessa reaaliaikajärjestelmänä joustamista nk. kovan ja pehmeän reaaliaikaisuuden välillä, sillä nopeita vikatilanteita ja niistä palautumisia voi tapahtua jatkuvasti. Tällä ei tarkoiteta niinkään laitteiden elinikään tai rikkoutumiseen vaikuttavia tekijöitä, vaan muita prosesseihin akuutisti vaikuttavia tekijöitä. Vikaantuvuutta ja reaaliaikaisuutta tutkitaan luotettavuuden mallintamisella. Vikaantumistodennäköisyyden (PFD) laskentaan on olemassa esimerkiksi turvallisuuskriittisten järjestelmien standardin IEC 61508 mukaiset laskukaavat, joiden avulla voidaan laskea turvallisuuden eheysarvoja (SIL). Luotettavuuden arvioinnin periaatteita voidaan soveltaa osin tässäkin tapauksessa. Järjestelmien luotettavuuden arvioinnin tukena voidaan hyödyntää kattavasti mallintamista, sekä laskennallisia simulaatioita ja stokastisia menetelmiä. (Tuominen 2000, 5; Smith & Simpson 2021, 89-105)

Konkreettisimpana lähtökohtana heti alusta alkaen on ollut luoda älykkään agentin (kts luku 4.5) kaltainen yksinkertainen strukturoitu järjestelmän oliomalli (ASCIE-malli, luku 4.6), joka mahdollistaisi laskennallisesti vuorovaikuttavan tietorakenteen järjestelmien osien ja toimintaympäristöjen välille (Sayama 2018, 16; Russel & Norvig 2004, 2). Näin järjestelmien ja ympäristöjen väliset laskennalliset toimenpiteet kyetään toteuttamaan. Mallin parametrejä voidaan muuttaa ja tarkastella sen jälkeen muutosten vaikutukset esimerkiksi stokastisten prosessien tuotteissa ja spatiaalisissa visualisoinneissa. Tämä mallintamisen ajatus perustuu hieman vastaavasti digitaalisten kaksosten (DT) luomiseen, vaikkakin niiden hyödyntämisen tavoitteena on enemmän synkronoida olemassa olevien järjestelmien ominaisuudet digitaaliseen malliin. Mikään ei kuitenkaan

teknisesti estä suunnitteluun tähtäävien mallien hyödyntämistä digitaalisina kaksoina tai toisinpäin, mikäli malli on laadullisesti käyttöön soveltuva. Lisäksi tekoälylliset sovellukset voisivat hyvinkin hyötyä eri käyttötarpeisiin suunnitelluista malleista.

Mallintamisen tutkimuksen tavoitteena on tuottaa tutkimusyhteisöille ja kehittäjille tietoa jatkotutkittavuuden perustaksi, sekä kerätä uusia tapoja käsitellä älykkäiden ratkaisujen kehittyvää maailmaa. Älykkäät ratkaisut muodostavat uuden tyyppisiä kokonaisuuksia, jotka vaativat entistä monimutkaisempaa suunnittelua ja analyysijä. Tutkimustyö perustuu lähtökohdassa kuvatun mallintamishaasteen lisäksi kirjoittajan filosofiseen ajatteluun ja asiayhteyksien innovatiiviseen yhdistämiseen, sekä muuhun opittuun tietopohjaan, jota on täydennetty vuosien aikana monenlaisen osaamisen kartuttamisella. Keskeisimmät tässä työssä hyödynnetyt osaamisalueet ovat mallinnus, ohjelmointi ja tietoliikennetekniikka. Innovoinnin esimerkkinä tutkimuksessa on luotu mallintamisen kokonaisuuden määritelmä, ASCIE-malli ja kyberfyysisten järjestelmien dynamiikan mallintamisen prosessi. Tutkimus summaa asioita mallintamisen ympäriltä yhdeksi prosessinomaiseksi kokonaisuudeksi. Tutkimuksessa hyödynnetään erilaisia lähteitä aiheen ympäriltä ja myös lähteitä, jotka ovat aiheeseen verrannollisesti sovellettavissa. Lisäksi työssä pyritään ajatusmaailman avartamiseen, jossa kyber- käsitettä käsitellään mahdollisimman vähän tietoturvallisuuden liittyvänä asiana tai yleisesti arkikielellä tietokonehommina. Tietoturvallisuuden poisjättäminen on tietoinen valinta, jotta asiasisältö painottuu sen sijaan mahdollisimman paljon teknisiin mahdollisuuksiin. Tietoturvallisuus on kuitenkin tunnistettu keskeisenä haasteena, jotta kyseisiä järjestelmiä voidaan hyödyntää turvallisesti. Tämän vuoksi kyber- ja kyberfyysisen järjestelmän käsitteitä avataan käsitteiden määrittelyn ja visuaalisen tarkastelun kautta. Analogia kyberfyysisen järjestelmän osalta löytyy myös koneen ja ihmisen väliltä, kuten Norbert Wiener on jo aikoinaan kirjoittanut kirjassaan Cybernetics. Laaja-alaisen sovellettavuuden ja mallintamisen haastavuuden vuoksi tutkimustyön aihe on valittu.

1.3 Tutkimuksen kolme keskeisintä tavoitetta

Kyberfyysisten järjestelmien mallintamisella voidaan toteuttaa erilaisia järjestelmiä ja niiden välisiä kytkentöjä virtuaalisesti ja tarkastella yksittäisten osien, kuin kokonaisuuden toimintaa. Tuottaa laadullista ja määrällistä dataa keinotekoisesti. Esimerkiksi jo paljon aiemmin kuin järjestelmästä on olemassa fyysinen versio.



Kuva 5. Tutkimuksen kolme keskeisintä tavoitetta (Viljanen 2021).

1.4 Tutkimuksessa käytettävät käsitteet

3d-malli on 3d-mallinnusohjelmalla toteutettu tietorakenteellinen kuvaus jonkin asian tai kappaleen geometrisista muodoista ja muotojen luokittelusta. Käytetään usein järjestelmän tai ympäristön fyysisten osien kuvaamiseen. (Wikipedia 2021f.)

ASCIE-malli on tässä tutkimuksessa määritelty malli, jossa on kuvattu aktuaattorit, sensorit, kommunikaatio, ohjaus/äly ja energia yhdeksi käsittemalliksi.

Digitaalinen kaksonen on virtuaalinen malli, joka peilautuu tarkasti fyysiseen objektiinsa (järjestelmään) reaaliaikaisesti (IBM 2021).

Dynaaminen tarkoittaa ajallisesti muuttuvaa eli liikevoimallista (Suomisanakirja 2021).

Esineiden internet (IoT). Tarkoittaa erilaisia verkottuneita järjestelmiä, jotka vaihtavat sensoritietoja muiden järjestelmien kanssa jonkin verkon (yleensä Internetin) yli (Internet of Things). Teollisuuden IoT (IIoT, Industry IoT).

Fysikaalinen avaruus on kaikki ympärillä oleva avaruus, joka koostuu aineesta, energiasta ja luonnonlaeista (Wikipedia 2021e).

Fysikaalinen toimintaympäristö on fysikaalisessa avaruudessa olevat konkreettisemmin ja rajallisemmin määriteltävät ympäristöt ja niissä tapahtuvat asiat, joilla on tutkittavan toiminnan kannalta jokin merkitys (Tilastokeskus 2021).

Fyysinen tarkoittaa kaikkea ympäröivää luontoa ja luonnonlakeja (Kielitoimiston sanakirja 2021).

Hybridi on usean asian yhdistelmä (Wikisanakirja 2021).

Informaatio koostuu lähettäjän osalta sanoman sisältävästä tiedosta, joka välitetään viestinä, kuten puheena, tekstinä tai koodauksena informaatioteknologiseen järjestelmään. Vastaanottajalla se muuttuu havaitsemisen kautta ymmärrykseksi. (Kilkki 2019, 2-14.)

Informaatioympäristö on abstrakti tila, joka koostuu kaikesta saatavilla olevasta informaatiosta. Mikäli informaatioympäristön ominaisuuksia ymmärretään, voidaan sen avulla muodostaa tilannekuvia. Kybertoimintaympäristössä hallinoidaan informaation kerättävyyttä ja saatavuutta. (FINTO 2021; Kuusisto 2005, 3.)

Järjestelmä eli toiminnallinen kokonaisuus (TEPA 2021d).

Kyber- käsite tulee kreikan kielen sanasta *kybereo*, joka tarkoittaa ohjaamista tai hallinnointia. Käsite pitää sisällään tietoverkot ja niissä liikkuvan informaation. (TEPA 2021a.)

Kyberavaruus on tietokoneista ja tietoverkoista muodostuva keinotekoinen avaruus, jonka keskeisimmät piirteet ovat verkko-osoitteet ja -topologia, tiedon siirtonopeudet, oikeudet ja salauskäytännöt, sekä verkossa liikkuva informaatio (NIST 2021; TEPA 2021b).

Kyberfyysinen järjestelmä on toiminnallinen kokonaisuus, joka muodostuu kybertoiminnallisuuksista, fyysisistä toiminnallisuuksista ja nämä läheisesti yhdistävästä rajapinnasta (Bartodziej 2016, 52–57).

Kybernetiikka on järjestelmien säätö- ja viestintäteknikkaa tutkiva tieteenala (Jin 2018, 197-198).

Kybertoimintaympäristö tarkoittaa käytännössä samaa kuin kyberavaruus, mutta kuvaa sitä konkreettisempänä, rajallisempänä ja tunnettuna ympäristönä, jolla on toiminnan kannalta jokin merkitys (TEPA 2021b; Rizzon 2016, 22; MPKK 2014, 45).

Luova mallintaminen on tässä tutkimuksessa määritelty käsite, joka täsmentää ihmisen luovan osallisuuden mallien toteuttamisessa. Voidaan kutsua myös konstruktiivisena mallintamisena.

Mallinnus (malli) on tapa kuvata asia muuten kuin asialla itsellään (Wikipedia 2021d).

Mallintamisen kokonaisuus on tässä tutkimuksessa määritelty käsite, joka sisältää rekonstruoinnin, luovan mallintamisen, simuloinnin ja visualisoinnin, sekä analyyttisen palautesilmukan, jonka kautta vaikutetaan mm. luovaan mallinnukseen.

Oliomalli on tietokoneohjelmoinnin avulla toteutettu tietorakenne, joka voidaan käsittää eräänlaisena objektin kuvauksena. Oliomallin tietorakenne määritellään ensin, jonka jälkeen sen avulla voidaan luoda useita erillisiä virtuaalisia toimijoita, jotka pohjaavat rakenteensa kuvattuun oliomalliin (Laine 1996; Oracle 2021).

OSI-malli on standardi, joka määrittää seitsemän vaiheisen mallin mukaan, miten tietoliikenneverkot toimivat. Lyhenne tulee sanoista Open Systems Interconnection Reference Model (ISO 1987).

Palautesilmukka tarkoittaa erilaisissa prosesseissa, kuten ohjausjärjestelmissä syy-seuraussuhdetta, jossa järjestelmän sisään tulevalla informaatiolla vaikutetaan ulos lähtevään informaatioon. (Wikipedia 2021a).

Rekonstruktio on jäljitelmä tai päätelmä jostain tapahtuneesta asiasta (Wikipedia 2021c).

Simulaatio on keino arvioida tapahtumien ja ilmiöiden kehitystä laskennallisesti (Tiihonen 2010, 2).

Suorituskyky on sama kuin hyötysuhde tai tuotantokyky. Käytetään myös kuvaamaan jotain tiettyä teknistä ominaisuutta, jonka tarkoituksena on tuottaa jokin keskeinen tai vertailtava hyöty. (TEPA 2021c.)

Tilannekuva on tiettyä tilannetta esittävä kuva tai kuvaus. Eräänlainen rajallinen ja historiaan pohjautuva peilikuva todellisuuskäsityksestä (Kuusisto 2005, 6).

Toiminnallinen malliyksikkö on esimerkiksi Modelica ohjelmointikielellä toteutettu FMU (Functional mock-up unit), jolla kuvataan järjestelmän looginen rakenne ja komponentit dynamiikan simuloimiseksi. (Modelica 2021, 7.)

UML-malli pohjautuu graafiseen mallinnuskieleen, jolla voidaan kuvata esimerkiksi järjestelmän rakennetta, käyttäytymistä tai vuorovaikutusta. UML tulee sanoista Unified Modeling Language.

Vikaantumistodennäköisyys (PFD) on yleisesti järjestelmän luotettavuutta kuvaava todennäköisyysarvo. Käytetään arvioimaan esimerkiksi kriittisen järjestelmän rikkoutumisen todennäköisyyttä tietyn aikavälin aikana sen eri komponenteille. (Smith & Simpson 2021, 89-105.)

Virtuaaliympäristö on tietokoneiden informaatioympäristöissä sijaitsevat ohjelmoimalla toteutetut keinotekoiset ympäristöt (virtuaalimaailmat), jossa voi muokata ja liikkua tietokoneohjelmien avulla. Esimerkiksi pilvipalvelut, nettisivut, tuotannonohjausjärjestelmät, nettipelit, jne. voivat muodostaa virtuaalisia toiminnallisia ympäristöjä. (DoD 2011, 159.)

Visualisointi on keino esittää jokin asia näkyvänä. Esimerkiksi rekonstruktio, mallinnus tai simulaatio kuvina. Kuvan luomista digitaalisen tiedon pohjalta laskennallisesti kutsutaan renderoinniksi. (DoD 2011, 159.)

Älykäs agentti on (teko)älyllistä toimijaa (agenttia) kuvaava käsite, joka määrittelee toimijan rakenteen ja luokittelee sille älyllisen käyttäytymisen (Russel & Norvig 2004, 2, 19).

1.5 Tutkimuksen lähestymistavat

Tutkimustyö on lähestymistavaltaan monimenetelmäisyystutkimus, joka on sekoitus erilaisia laadullisia ja määrällisiä tutkimusmenetelmiä. Sisältäen elementtejä toimintatutkimuksesta, tapaustutkimuksesta, käsitetutkimuksesta, kokeellisesta tutkimuksesta ja survey-tutkimuksesta, sekä kyse on osin myös uuden innovaation tuottamisesta. (JYU 2014.)

Tutkimuksesta toimintatutkimuksen tekee se, että tutkimus on laadittu nykyaikaisten mallinnusmenetelmien käyttöönottamiseksi, joka on tässä tapauksessa tunnistettu geneerisen liiketoiminnan ydinalueeksi. Tutkimuksen lähtökohdan keskeisimmän tavoitteen eli mallinnusongelman ratkomiseen on toteutettu tapaustutkimusta kyberfyysisistä järjestelmistä koostuvan abstraktin tulevaisuusskenaarion osien mallintamiseksi ja uuden teknologian kehittämiseksi. Käsitetutkimuksena on toteutettu käsitteiden merkitysten ymmärtämistä perehtymällä eri lähteissä ilmenneisiin asioihin ja kuvaamalla näiden merkityksiä osana kokonaisuutta. Kokeelliseksi tutkimukseksi on toteutettu mittaussjärjestely ja sen hyö-

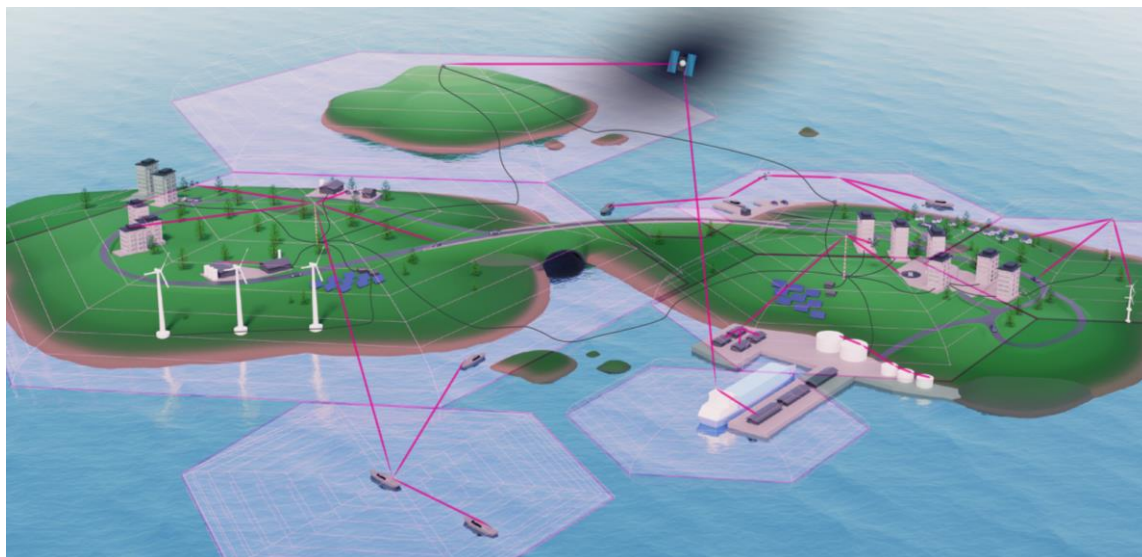
dyntäminen kvantitatiivisen tiedon keruulle. Aiheen itsekriittisyyden vahventamiseksi ja yleisen tietotason kartoittamiseksi on toteutettu alan asiantuntijoille suunnattu survey-tutkimus strukturoidun kyselyn muodossa.

Käsitteiden ja ilmiöiden ymmärtämiseksi on hyödynnetty prosessianalyysin periaatteita luomalla mallintamisen kokonaisuutta kuvaavia kaavioita ja käyttämällä runsaasti aikaa pohdintaan ja eksperimentointiin. Aiheen itsekriittisen tarkastelun ja hyödynnettävyyden arvioinnin vuoksi on myös haastateltu muita nk. kyberalan ja alan ulkopuolisia tutkijoita. Tutkimuksessa on selvitetty erilaisten sähköisesti löytyneiden julkaisujen kautta, millaisia keinoja kyberfyysisten järjestelmien tai dynaamisten hybridijärjestelmien mallintamiseen on jo olemassa. Tutkimuksessa on pyritty tuottamaan käsitteellisesti yhdenmukaista tutkimustekstiä, joka tukisi ymmärrettävyyttä ja tieteellisen keskustelun käymistä aiheen ympäriltä.

1.6 Monimenetelmälliset tutkimusmenetelmät

Tutkimustyössä järjestelmän määritelmää tarkastellaan systeemiteoreettisen tutkimuksen tavoin erilaisten UML-kaavioiden, sekä käytännönläheisemmin spatiaalisen ja kolmiulotteisen mallintamisen, sekä visualisoinnin kautta. Spatiaalista mallinnusta ja visualisointia on toteutettu Java-ohjelmoinnilla, QGIS paikkatieto-, Blender 3d-mallinnus- ja Adobe kuvankäsittelyohjelmilla tätä tutkimustyötä varten. Systemianalyysille tyypilliseen tapaan käsitteiden, sekä järjestelmien ominaisuuksien ja toiminnallisuuksien jaottelussa käytetään käsitekaavioita ja käsiteanalyysiä. Järjestelmiä kuvaavien luokkakaavioiden lisäksi on toteutettu toimintakaavioita, joiden avulla kuvataan järjestelmien toimintoja. Kaavioita apuna käyttäen on muodostettu perustaa kyberfyysisen järjestelmän tietomallin eli oliomallin luomiseksi, jota voidaan hyödyntää spatiaalisessa mallintamisessa ja visualisoinnissa. Tutkimusmenetelmänä on käytetty UML-kaavioita, sekä ohjelmointia kyberfyysisten järjestelmien oliorakenteiden kuvaamiseksi, sekä ohjelmoinnin avulla tapahtuvaa visualisointia. Nykytila-analyysiä varten on toteutettu kokeellisesti empiiristä mittaustoimintaa, joka on rekonstruoitu paikka-

tiedoksi. Havainnekuivissa on hyödynnetty 3d-mallintamisen keinoja. Muissa tutkimuksen osissa, kuten kyselyssä, on hyödynnetty tiedonkeruun laadullisia ja määrällisiä tutkimusmenetelmiä.



Kuva 6. Kiinteät kaapeliverkot, langattomat soluverkot ja adhoc-verkot (Viljanen 2021).

1.7 Tutkimuksen rajaukset

Kyberfyysisten järjestelmien kyberominaisuuksien kaikkein pienimmät tekniset yksityiskohdat, kuten syventyminen laitteiden tarkempaan toimintalogiikkaan, komponentteihin, IP-osoitteisiin, bittitason operaatioihin ja algoritmeihin on rajattu tässä tutkimuksessa kokonaan pois. Tämä mahdollistaa keskittymisen dynaamisten järjestelmien yksinkertaistettuun mallintamisen konseptiin ja visualisointiin. Järjestelmien välisen informaation oletetaan liikkuvan aina kun fyysisen liikimääräisesti mahdollistaa. Tutkimuksessa ei ole kuitenkaan tarkoitus jättää rajauksen ulkopuolelle jääviltä ominaisuuksilta rajapintoja pois, vaan nimenomaan päinvastoin. Dynamiikan mallintaminen ja simulointi vastaa peliteorian piirteitä ja pelien kehittämisessä tarvittavaa ohjelmointitekniistä osaamista. Tutkimuksesta on rajattu pois kyberturvallisuuden laajempi käsittely. Tutkimukseen on jätetty rajapintoja informaatioulottuvuuden syventämiseksi ja kyberulottuvuuksien laajempaan käsittelyyn. Rajauksella on pyritty luomaan läpileikkaus

järjestelmien mallintamisesta, jonka tavoitteena on ollut kasvattaa osaamista laaja-alaisesti ja luoda konteksti uuden kehittämislle ja siksi liiallinen syventyminen yksittäisiin osiin on rajattu pois.

2 Mallintaminen

2.1 Mallintamisen kokonaisuus

Samoin kuin laitteiden kehitys, myös erilaisten suunnitteluohjelmistojen saatavuus on parantunut ja niiden käyttö on yleistynyt jo 1980-luvulta alkaneen digitalisaation tuotteena. 2000-luvun aikana ohjelmistojen käytettävyyden on parantunut merkittävästi käyttöliittymiä kehittämällä. Oppimismateriaalia ja esimerkkejä mallintamisen käyttökohteista on entistä enemmän saatavilla mm. Internetin kautta. Näin ollen tietokonepohjaiset mallinnusmenetelmät tavoittavat yhä useamman ammattilaiseksi tähtäävän ja muun yleisön. Yleistyminen on johtanut siihen, että mallintamisesta saatetaan puhua hyvin laaja-alaisesti ja jopa hieman markkinoinnillisesti. Tämä aiheuttaa toisinaan useita näkökantoja sille, mikä luokitellaan mallintamiseksi tai "oikeaksi" mallintamiseksi. Yleisesti ottaen mallintamisella tarkoitetaan jonkin asian kuvaamista muulla tavoin kuin sillä itsellään ja se osaltaan tekee mallintamisen käsitteestä lavean. Mallinnuksesta puhuttaessa kyseessä voi olla laskennallisesti generoitu tai simuloitu, käsin luotu, kuvattu tai muuten nauhoitettu tuotos.

Kirjoittajan omaan kokemukseen perustuen mallintamiskäsitteen käyttö liian la-
veasti voi muuttaa kaikkien mallintamiseen liittyvää suhtautumista puoleen ja
toiseen. Toisaalta kuulijan kannalta voi olla helpompi puhua mallintamisesta yh-
dellä käsitteellä yleisesti. Mallintamiseen liittyy usein vahvasti visuaalisuus,
jonka vuoksi ne saatetaan kokea nk. hypen kautta, joka on myös monesti syy
sille miksi mallinnukset herättävät yleisössä suurta mielenkiintoa ja ajatuksia.
Visuaaliseen esitystapaan, tulosten vaikeaan käytettävyyteen tai tulosten epä-
varmuuksiin saatetaan myöhemmin pettyä, jolloin yleisesti kaikkien mallintami-
seen suhtautuminen voi muuttua herkästi epäluuloisen kriittiseksi. Vähentääk-

seen mallintamiseen liittyviä epäluuloja on olemassa myös laatua ja yhteensopivuuksia ohjaavia standardeja, kuten IEEE 1012 (Software verification and validation), IEEE 1516-2010 (High Level Architecture) ja muita standardeja tietokoneohjelmien, mallien ja simulaatioiden validoimiseksi ja hyväksymiseksi. Useimmiten mallinnusten hyöty osataan kuitenkin nähdä tulosten tulkitsemiseen harjaantuessa, sekä mallintamisen tuottaman ymmärryksellisen lisäarvon kautta. Laadukasta visuaalisuutta arvostetaan tulosten ymmärrettävyyden ja tavoitavuuden kautta.



Kuva 7. Tietokonemallinnusta esittävä havainnekuva (Viljanen 2020).

Brittiläistä tilastotieteilijää George E. P. Box (1976) lainaten ”kaikki mallit ovat väärässä, mutta jotkut ovat käyttökelpoisia” pitää tässä hyvin paikkansa. Epäluotettavimmat tulokset saavutetaan tyypillisesti laskennallisten menetelmien kautta ja tämä johtuu siitä, että ihmisen kyvyt ovat rajallisia toteuttamaan monimutkaisten laskentaprosessien lähtöasetelmia, valitsemaan juuri oikeita menetelmiä ja vielä tulkitsemaan niiden laskennallisia tuloksia oikein. Toisaalta monimutkaisten ongelmatilanteiden ratkonta on myös keskeisin syy sille, miksi laskennallisia menetelmiä ylipäänsä käytetään. Esimerkkinä yleisössä pettymystä herättäneistä mallinnuksista ovat olleet mm. THL:n koronaviruksen epidemiamallinnusten toteuttaminen vuosien 2020 – 2021 aikana ja näiden tulosten tulkintaan ja tiedottamiseen liittyvät haasteet. Epidemiamallien stokastiset prosessit ovat kuitenkin tutkimuksellisesti hyvin vakuuttavia ja hyödyllisiä, joihin kir-

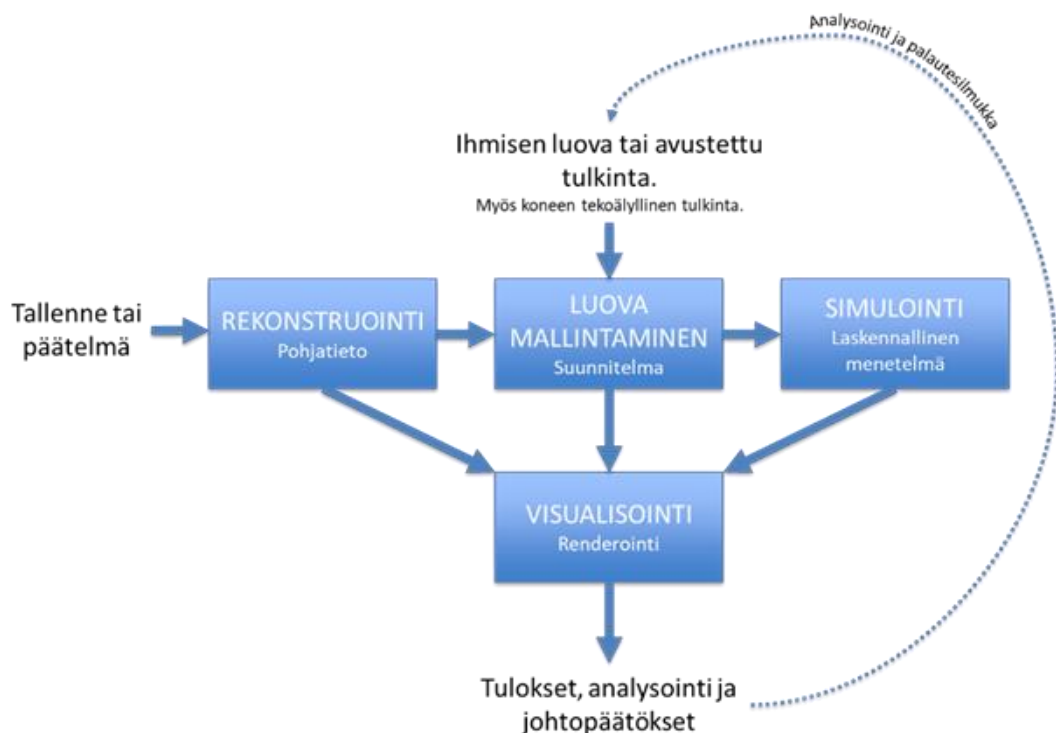
joittaja on perehtynyt 20.4.2020 THL:n järjestämässä webinaarissa. Toinen epävarmuuksia sisältävä mallintamisen kohde on vuosittaisiin hurrikaanikausiin liittyvät hurrikaanien etenemismallit. Hurrikaanien kehittymiseen ja etenemiseen voidaan hyödyntää tulosten vertailtavuuden vuoksi useita eri malleja ja näin ollen saavuttaa mahdollisesti luotettavampi tulos. Erilaisiin hurrikaanien ennusteisiin kirjoittaja perehtyi seuratessaan vuoden 2017 Atlantin hurrikaani kauden tapahtumia. Nämä kumpikin mallinnustapaus eivät perustu teknisten järjestelmien mallintamiseen, mutta perustuvat kuitenkin vastaavasti tiedostettuun lähtöasetelmaan ja tulevien tapahtumien selvittämiseen. Tulosten tulkinnessa pitää siis olla aina varovaisuutta ja kriittisyyttä.

Mallintaminen voidaan nähdä jakautuvan myös kahteen pääosaan, jotka ovat kuvaileva mallintaminen ja sääntöpohjainen mallintaminen. Kuvailevalla mallintamisella pyritään hakemaan vastaus kysymykseen, miltä jokin näyttää. Sääntöpohjaisella mallintamisella taas kysymykseen, kuinka jokin tulee käyttäytymään. (Sayama 2019, 16.)

Mallintamisen kokonaisuuden määritelmä pohjautuu kirjoittajan omaan pitkälliseen kokemukseen mallintamisesta ja simuloinnista. Periaate on vastaava lähes poikkeuksetta kaikissa 3d-mallinnusohjelmissa, joita kirjoittaja on itse käyttänyt. Käytännössä ensin luodaan objekteja eli mallinnetaan ja määritellään malleille parametrejä. Toiseksi luodaan näyttämö ja mallinnetaan ympäristö. Luomistyö näiden kummankin osalta voi perustua omiin ajatuksiin tai pohjatietoon. Näiden lisäksi voidaan animoida liikkeitä ja simuloida erilaisia asioita, kuten fysiikkaa. Laskennallinen tulos saadaan ulos numeerisina arvoina ja renderoinnin kautta visualisoituna. Vastaavasti mallintamisen kokonaisuuden periaate on kuvattu prosessina myös väkijoukkojen liikettä tutkivassa tutkimuksessa, jossa asia on määritelty teoreettiseen pohjatietoon, malleihin ja simulaatioon (Klüpfel 2009, 214).

Mallintamisen kokonaisuuden määritelmä tukee keskeisesti tutkimuksen lähtötilanteessa kuvatun haasteen strukturoitua ratkontaa. Mallintamisen kokonaisuuden kaikkein perustavin vaihe mallien teoreettiseksi pohjaksi on tallenteiden ja

päätelmien rekonstruoiminen pohjatiedoksi, joka on hyvin tyypillistä lähes kaikenlaisessa mallintamisessa. Seuraava vaihe on suunnittelu eli nk. luovan mallintamisen vaihe, jossa ihmisen rooli on toteuttaa erilaisia tietorakenteellisia malleja pohjatietoon ja ajatuksiin perustuen. Luovan mallintamisen pohjalta luotuja malleja kyetään hyödyntämään laskennallisissa simuloinneissa, mikäli malli on rakennettu vastaamaan simulaation vaatimuksia. Hajautetuissa simulaatioissa käytettävien mallien luomiseksi on olemassa myös standardeja, kuten IEEE 1516-2010 (HLA) mukaiset FOM-mallit ja Modelica mukaiset FMU-mallit (Modelica 2021, 7; IEEE 2010). Laskennalliset menetelmät ovat usein hyvin riippuvaisia ihmisen taidoista esimerkiksi oliomallien luomisen tai laskentakäyttöön soveltuvien 3d-mallien luomisessa. Kirjoittajalle täsmällisimmin mallintamista edustaa luovan mallintamisen vaihe, vaikka kaikki muutkin vaiheet sen ympärillä ovat yhtä tärkeitä ja edustavat niitä samoja tavoitteita, joihin mallintamisella pyritään. Mallintamisen kokonaisuuden vaiheet ja niiden väliset suhteet ovat koostetut seuraavassa kuvassa 8 ja käsitelty luvuissa 2.2-2.5.



Kuva 8. Mallintamisen kokonaisuuden kuvaus (Viljanen 2021).

2.2 Rekonstruointi

Rekonstruoinnin tarkoituksena on tuottaa teoreettista pohjatietoa. Käytännössä rekonstruoitaessa jotain, muodostetaan mahdollisimman totuuden mukainen käsitys jostain olemassa olevasta tai olleesta asiasta, kuten yksittäisestä kohteesta tai tapahtumasta. Tapahtumiin liittyy tyypillisesti myös ajan käsite, jolloin kyseessä voi myös olla nauhoite tai sen kaltainen tuotos. Rekonstruointia varten käytetään erilaisia kuvantavia, kartoittavia ja nauhoittavia laitteita jo tapahtuman aikana tai kohteesta tapahtuneen jälkeen. Rekonstruointia voidaan toteuttaa myös päättelöllä ja analysoinnin keinoin. Rekonstruktion kohteena voi olla erilaiset fyysikaalisen ulottuvuuden, kuin kyberulottuvuuden ympäristöt, prosessit, asiat ja ilmiöt. NykYTEknologiaa käyttäen rekonstruktiot kyetään toteuttamaan digitalisoimalla analogisia ilmiöitä, joita voidaan käsitellä myöhemmin tietokoneen avulla. Digitaalisen rekonstruktion tarkastelu on mahdollista tietokoneen avulla luodun visualisoinnin kautta, mutta se tuottaa myös tärkeää pohjatietoa kaikelle mallintamiselle jatkossa. Rekonstruoinnin pohjalta kyetään jatkajalostamaan malleja eri tarpeisiin ja sellaisenaan analysoitavaksi tiedoksi. Digitaalisen rekonstruktion esittämistapoja voidaan muuttaa helposti visualisoinnin keinoin, jolloin rekonstruktiosta itsestään saadaan enemmän irti. Rekonstruoinnin voi nähdä kuuluvan yhdeksi mallintamisen kokonaisuuden keinoksi, sillä sen tuloksena voidaan saavuttaa malli.

2.3 Luova mallintaminen

Kuten jo aiemmin kohdassa 2.1, *mallintamisella tarkoitetaan jonkin asian kuvaa- mista muulla tavoin kuin sillä itsellään*. Malli on siis jonkinlaisen järjestelmällisen tekemisen, kuten suunnitelman tuotteena syntynyt nähtävissä oleva asia. Mallintamisen avulla voidaan luoda koealustana toimiva malli, johon voidaan kohdistaa vapaammin tutkimuksellisia toimenpiteitä kuin itse tutkimuksen kohteena olevaan asiaan. Vapaudella tarkoitetaan esimerkiksi tutkittavuuden helpottamista, esitettävyyttä, mallin monistettavuutta ja kustannustehokkuuden parantamista digitaalisin keinoin. Varsinaisen tutkimuksen kohteena olevan asian vahingoittamisesta ei tarvitse olla huolissaan, kun siitä luodaan malli. Suunnittelun

apu ja kustannusten vähentäminen perustelevat mallintamisen hyödyllisyyttä. Tyypillisesti malli on fyysisesti pienempään kokoon puristettu yksinkertaistus, kuten pienoismalli tai tietokoneella toteutettu kolmiulotteinen tai tietorakenteellinen kuvaus jostain asiasta. Virtuaalista mallia voidaan tarkastella tietokoneohjelmalla ja siitä voidaan tuottaa informatiivisia kuvia. Malleja käytetään pääsääntöisesti suunnittelun ja tutkimuksen välineenä. Myös digitaalisten kaksosmallien hyödyntäminen on yleistymässä. Digitaalinen kaksonen luodaan reaaliaikaisuuteen kykeneväksi järjestelmämalliksi, jonka tarkoitus on toimia peilikuvana jollekin olemassa olevalle fyysiselle asialle. Nykyään mallintamisella tarkoitetaan ennemmin tietokoneella toteutettuja malleja, kuin pienoismallien luomista. Virtuaalinen tietokonemalli muodostetaan käyttämällä kyseisen asian mallintamiseen soveltuvaa suunnitteluohjelmistoa tai ohjelmointikieltä. Tässä tutkimuksessa mallintamisella ja mallilla tarkoitetaan yksinomaan tietokoneella toteutettua mallia. Malleja voidaan luokitella mm. konkreettisiin tai abstrakteihin malleihin, deterministisiin tai stokastisiin malleihin, analyyttisiin tai numeerisiin malleihin ja jatkuviin tai diskreetteihin malleihin (Tiihonen 2010, 3).

Mallintamista voidaan toteuttaa useilla erilaisilla ammattilaistason suunnitteluohjelmistoilla, kuin myös perinteisillä tietojenkäsittelyohjelmilla. Ammattilaistason suunnitteluohjelmistoilla kyetään mallintamaan kolmiulotteisia kappaleita, paikatietoon liittyviä asioita, käyttäytymistä, prosesseja, toiminnallisuuksia, järjestelmiä ja monia muita asioita. Tyypillisesti valmiin mallin tarkastelu on mahdollista suunnitteluohjelmistossa itsessään, joka edes auttaa keskeisesti mallin luomistyössä. Mallintamisen tavoite on tavallaan aina tutkimuksellinen, mutta sen avulla on kyetty tekemään paljon viihteellisiä sovelluksia ja näistä hyvänä esimerkkinä ovat tietokonepelit ja animaatiot. Tietokonepelit ja elokuvateollisuus edistävätkin nykyään monen mallintamiseen liittyvän asian kehitystä laajan kysyntänsä vuoksi. Uusimmissa tuotannoissa mallintaminen ja mallien reaaliaikainen käyttö viedään laskennallisen suorituskyvyn näkökulmasta äärirajoille.

Mallintamisen hyödyillä saavutetaan ymmärrystä asioiden rakenteista ja kaikista niistä säännöistä ja mekanismeista, jotka kyseiseen asiaan liittyy. Mallia voidaan tarkastella visualisoimalla sitä eri tavoin, joka edes auttaa mallinnetun

asian hahmottamisessa. Mallintamiselle tyypillistä on ihmisen välittömämpi ja luovempi osallisuus luomistyöhön verrattuna esimerkiksi rekonstruktioon tai simulointiin. Näin ollen ihmisen intuitioon ja kokemuspohjaiseen analyyttisyyteen perustuvaa mallintamista kutsutaan tämän tutkimuksen mallintamisen kokonaisuuden määritelmässä luovaksi mallintamiseksi.

2.4 Simulointi

Simulointi tarkoittaa yleensä laskennallista prosessia, jonka avulla pyritään jäljittelemään jokin asia, kuten tapahtumien kulku tai järjestelmien suorituskyvyllisiä arvoja mallien avulla. Simulaation valmisteluun tarvitaan erilaisia malleja, kuten tuloksen tarkasteltavat ominaisuudet, syötteet ja itse toiminnallinen malli (Tiihonen 2010, 2).

Simulaation avulla saavutetaan laskennalliseen arvioon perustuva vastaus alkuasetelmassa asetettuun kysymykseen. Esimerkiksi ”miten tämä tulee liikku- maan” voi liittyä järjestelmän mekaniikan selvittämiseen, ”miten tämä tulee kes- tämään” voi liittyä järjestelmän osien lujuuksien selvittämiseen tai ”miten tämä tulee virtaamaan” voi liittyä järjestelmän aerodynaamisiin ominaisuuksiin. Vas- tauksen laatuun ja luotettavuuteen vaikuttaa keskeisesti mallit, lähtöpisteessä annetut syötteet, käytetyt menetelmät, sekä laskennan tarkkuus ja kesto eli kaikkiaan koko simulaation valmistelu. Simulaatio perustuu usein matemaatti- sista laskutoimituksista ja logiikoista muodostettuihin algoritmeihin, niiden ite- raatiokierroksiin ja tulosten keskiarvoihin.

Simulaattorista riippuen simulaatio voidaan pysäyttää välillä, jolloin simulaation välitarkastelu ja sen kulkuun vaikuttavien muutosten toteuttaminen kesken si- muloinnin voivat olla mahdollisia. Usein myös pysäytettyä simulaatiota voidaan jatkaa heti tai myöhemmin, mikäli simulointiin varattuja laskennallisia resursseja on tarve vapauttaa muuhun käyttöön. Tietokonepelit ovat reaaliaikaisia simu- laattoreita, mutta niiden tavoitteena on enemmän viihde kuin tieteellinen tark- kuus. Tietokonepeleissä ei useinkaan tarkastella tarkkoja prosesseja tai lasken- nallisia ilmiöitä vaan itse viiheellisen pelitilanteen kehittymistä, kuten pelaajien

ratkaisuja, osaamista ja pelitilanteen lopputulosta. Vaatimukset ovat kuitenkin kasvaneet eSports -lajien myötä, joten odottaa saattaa, että myös tietokonepelien laskennallisilta prosesseilta edellytetään entistä läpikotaisempaa tarkastelua ja läpinäkyvyyttä. Tietokonepelien tekniikassa onkin paljon potentiaalia myös tieteellisten asioiden ratkomiseksi, kuten tässä tutkimustyössä kuvatun ongelman ratkointaan. Tätä tietokonepelien potentiaalia onkin hyödynnetty jo pitkään koulutussimulaattoreissa, kuten lentosimulaattoreissa.

Erityisesti koulutukselliset simulaattorit voidaan luokitella LVC-luokituksen (Live, Virtual, Constructive) mukaisesti kolmeen eri kategoriaan. Luokittelusta ongelmallisen tekee selvien rajausten puute, joka tarkoittaa sitä, että tyypillisesti kaikista simulaattoreista löytyy vähintään pieni määrä jokaista kategoriaa. Live -simulaattoreilla tarkoitetaan simulaattoreita, joissa edellytetään oikeiden ihmisten osallisuutta oikeiden järjestelmien käyttäjänä. Virtual eli virtuaaliset simulaattorit tarkoittavat simulaattoreita, joissa edellytetään oikeiden ihmisten osallisuutta simuloitujen järjestelmien käyttäjänä. Constructive eli konstruktiviset simulaattorit tarkoittavat simulaattoreita, joissa ns. simuloitujen ihmiset käyttävät simuloituja järjestelmiä. Tässä tutkimuksessa simulointia tarkastellaan pääasiassa konstruktivistien ja ilmiöiden ja prosessien ratkointaan liittyvien laskennallisten simulaattoreiden kautta, joissa ihmisen osuus on lähinnä valmistella mallit. LVC-luokittelu on peräisin US DoD:n mallinnus ja simulointi sanakirjasta. (DoD 2011, 119.)

Tyypillisesti simulaatiossa pyritään katsomaan tulevaisuuteen, mutta käänteissimulaatiossa pyritään simuloimaan ajallisesti taaksepäin kohti arvioitua lähtöpistettä, jonka voi tulkita itseasiassa olevan laskennallista rekonstruointia. Mallintamisen kokonaisuuden määritelmässä simulointi täydentää rekonstruointia ja luo vaa mallintamista.

2.5 Visualisointi

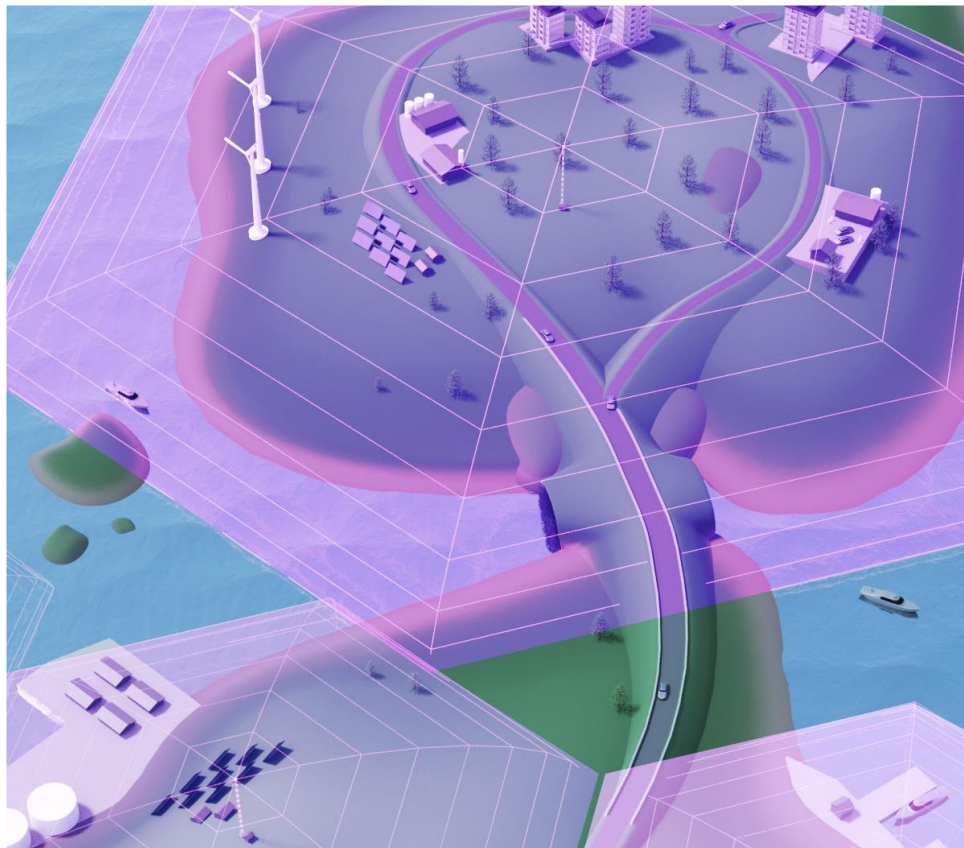
Visualisointi tarkoittaa jonkin keinotekoisien asian tai tilanteen tekemistä näkyväksi. Esimerkiksi rekonstruktion, mallinnuksen tai simuloinnin avulla saadun tuloksen esittämistä renderoidun kuvan, kuten graafisen kuvaajan tai spatiaalisen kuvantamisen keinoin. Visualisoinnissa vaikutetaan erityisesti esitystapaan, jolla mallinnuksen sisältämä informaatio halutaan esittää. Esitystavalla vaikutetaan mallinnuksen ymmärrettävyyteen. Visualisoitavaa informaatiota voidaan syöttää visualisointiputken (visualization pipeline) läpi prosessoimalla, suodattamalla, koordinaatisto muunnoksilla ja lopulta renderoimalla geometriat pikselikuviksi tietokoneen ruudulle. (DoD 2011, 159.)

Esitystapojen harkinnan varaisella käytöllä ja hienosäätämällä vaikutetaan informaation mahdollisimman tehokkaaseen ymmärtämiseen, joka tuottaa mallintamiselle usein sen keskeisen lisäarvon. Tulosten läpinäkyvyyteen ja ymmärrettävyyteen perustuvaa visualisointia voidaan kutsua tutkimuksen kannalta hyväksi ja tarkoituksen mukaiseksi. Huonoimmillaan tarkkaan harkittu visualisointi mahdollistaa informaation manipuloinnin tai jopa vääristämisen, mutta se ei ole tutkimuksen teon eettisten periaatteiden kannalta oikea tavoite. Osaamattomasti toteutettu visualisointi yhdistelee näitä kaikkia visualisoinnin piirteitä sekavasti, jolloin lopputuloksena on jotain, joka jättää katsojan epävarmaksi. Voikin ajatella periaatteen menevän laskukaavan mukaan näin: asia (tutkimus) x esitystapa (visualisointi) = ymmärrys (hyöty). Jean Cocteauta lainaten ”taide on tiedettä tehtynä selväksi”.

Visualisoinnin konkreettisiin piirteisiin kuuluu projektoiden, värien ja muotojen tehokas ja harkinnanvarainen käyttö. Tyypillisesti suurimpana haasteena on sovittaa laaja kokonaisuus samaan kuvaan niin, että kuvan luettavuus säilyy ja asioiden väliset yhteydet ovat siitä hahmotettavissa. Haasteena voi olla myös tuottaa riittävän kestävä visualisoinnin ulkoasu siten, että ulkoasun tyyli pätee hyvin laajasti eri tilanteissa eikä muutu jatkuvasti. Muuttumaton tyyli edesauttaa tulosten vertailukelpoista tarkastelua myöhemmin. Hyvän visualisoinnin ominaispiirteinä on myös keksiä kokonaan uusia esitystapoja, eikä vain määritellä

primitiivisten muotojen värejä tai viivojen tyylejä. Usein tieteellisten mallinnusten luottamusta herättävissä esityksissä parhaiten toimii selkeän graafinen ja ehkä jopa naivistinen (yksinkertainen, vilpitön, luonnollinen) tyyliuuntaus (JYU 2010). Visualisointiin liittyy myös keskeisesti rajapinta ihmisen ja mallinnuksen väliseen palautesilmukkaan, jossa visualisoitua tuotosta tarkastelemalla ja arvioimalla muutetaan jotain mallinnuksen kokonaisuuden osaa.

3 Nykytila-analyysi mallintamisen tarpeen kohteesta



Kuva 9. Kuvituskuva tukiasemaverkkojen soluista (Viljanen 2021).

3.1 Tukiasemaverkkojen luotettavuuden arviointi kartoittamalla

Tutkimuksen edetessä kävi selväksi, että mobiiliyhteystekniikan luotettavuudesta tulisi toteuttaa vähintään periaatteellinen ja suuntaa antava nykytila-ana-

lyysi, joka tukisi käsitystä kyberfyysisten järjestelmien mallintamisen hyödyntämisen kohteesta. Matkapuhelinverkon maantieteellisen kattavuuden ja reaaliaikaisen toimivuuden perusteluna on tullut käytettyä aiemmin omaa intuitiivista kokemusta ja eri operaattoreiden kuuluvuuskarttojen perusteella tehtyjä havaintoja. Nämä eivät kuitenkaan kerro kaikkea matkapuhelinverkon tai muun siihen verrannollisen tukiasemaverkon todellisesta luotettavuudesta. Mobiiliyhteyksien linkkien muutoksia on mahdoton nähdä ilman havainnollistavia visualisoinnin keinoja ja kuuluvuuden mittausta. Linkkien muutoksilla tarkoitetaan matkapuhelinverkkojen tapauksessa käytännössä sitä, mihin tukiasemaan mikäkin laite on sijainnista, asennosta tai muusta syystä riippuen yhteydessä.

Langattomien järjestelmien kuuluvuuteen viittaavien epävarmuustekijöiden vuoksi tutkimuksen nykytila-analyysiksi on toteutettu rekonstruoiva mobiilitukiasemien kartoitus, jonka avulla on saavutettu ymmärrystä mobiiliyhteyksien linkkimastojen tiheyksistä ja miten yhteyslinkki muodostuu yksilöidysti aina tiettyyn tukiasemaan. Kartoituksessa on hyödynnetty vanhaa 3G liittymää johtuen saatavilla olleista mittausjärjestelyistä ja verkon oletetusta hyvästä kattavuudesta, jolloin liittyä ei myöskään täydennä kuuluvuuttaan satunnaisesti 4G:n tai 5G:n kanssa. 3G (UMTS) käyttää Suomessa 900Mhz ja 2100Mhz taajuusalueita. 900Mhz taajuusalueita käytetään harvempaan asutuilla alueilla ja 2100Mhz taajuusalueita taajamissa. Matalamman 900Mhz taajuusalueen etuna saavutetaan pidempi kantama ja enemmän häiriösietoisuutta, kun taas 2100Mhz taajuusalueet mahdollistavat suuremman tiedonsiirtokapasiteetin. 3G verkkoa ollaan ajamassa lähivuosina alas ja taajuudet otetaan uudempien tekniikoiden käyttöön, jolloin mittauksilokset ovat itseasiassa jokseenkin kelvollisia taajuudet haltuun ottavien 4G, 5G ja IoT-yhteystekniikoiden osalta. (Uusiteknologia.fi 2021.)

Kattavuuden kartoituksen ohessa on ollut luonnollista selvittää paljon muutakin teoriaa, josta on ollut merkittävää hyötyä kyberfyysisten järjestelmien mallintamisen tarpeiden ymmärtämiseksi. Nykytila-analyysissä on kartoitettu ainoastaan OSI-mallin ensimmäistä tasoa eli fyysisen rajapinnan kuuluvuutta, joten todellista informaation siirtymistä (tiedonsiirtonopeus, viiveet) ei ole tässä tutkittu.

Mobiiliyhteyksien radioteknologian toimivuus fysikaalisessa avaruudessa on kriittinen rajapinta liikkuvien kyberfyysisten järjestelmien toiminnalle. Liikkuvien järjestelmien perässä ei ole käytännöllistä kuljettaa kaapelia ja pelkkien kiinteiden kaapeliyhteyksien päässä olevilla järjestelmillä ei saavuteta kustannustehokkaasti esimerkiksi riittävän kattavaa sensoriverkkoa, joka tuottaisi yksityiskohtaista tilannekuvaa dynaamisesti hajaantuneesta fysikaalisesta toimintaympäristöstä. Mittaamiseen käytetty matkapuhelin on samalla eräänlainen esimerkki kompaktista kyberfyysisestä järjestelmästä. Nykyajan matkapuhelin ilman nopeita datayhteyksiä ei mahdollistaisi mm. paikannukseen ja paikkatietoon perustuvia palveluita, joihin on jo nykyään totuttu.

3.2 Kartoituksen tekninen toteutus

Kartoitusta varten vanhaan Samsung S3 matkapuhelimeen on ladattu ilmainen mittaussovellus, jonka avulla tukiaseman kuuluvuuden ja puhelimen paikkatiedon tallentaminen onnistuu sekunnin välein. Matkapuhelimessa käytettiin erään Suomen isoimpien matkapuhelinoperaattoreiden liittymään kuuluvaa 3G SIM-korttia. Tallennuksen käynnistettyä sovellus aloittaa tallentamaan tiedot SQL tietokannaksi, joka on hyvin nopea ja pieneen kokoon optimoitu formaatti. SQL tietokannan purkamiseen voi käyttää SQLite ohjelmaa tai käyttää tietokantaa suoraan datalähteenä. SQLite ohjelmalla voidaan tuottaa esimerkiksi CSV tiedostoja, jonka jälkeen niiden avaaminen onnistuu Excelillä tai tekstieditorilla. Erottelumerkkien ja pilkkujen käsittelyn jälkeen CSV tiedosto on ajettu vielä tätä käyttöä varten Java-ohjelmoidun käsittelijän läpi, joka rakentaa alkupisteen ja loppupisteen välille tasaiset sekunnin välit. Tasaiset välit mahdollistavat toisella GPS tallentimella kerättävien paikkatietojen synkronoinnin tukiasemadatan kanssa Excelissä. Tämän jälkeen käsitelty CSV tiedosto ladataan QGIS paikkatieto-ohjelmistoon. QGIS ohjelmistossa paikkatieto voidaan rekonstruoida karttapohjalle, jota voidaan erikseen täydentää kattavasti muilla paikkatietoaineistoilla. QGIS ohjelmisto vaatii hieman perehtymistä, mutta visualisointia on loppujen lopuksi helppo säätää mieleiseksi. QGIS toimii tässä tapauksessa rekonstruktion ja visualisoinnin työkaluna, sekä Excel tilastoinnin työkaluna. Analyysit ovat toteutetut edellä mainittuja ohjelmia hyödyntäen.

3.3 Mittaus

Mittaukset ovat toteutettu 2020 joulukuun ja 2021 tammikuun aikana henkilöautolla ajamalla erilaisia reittejä mittauksen tallennuksen ollessa samalla käynnissä. Mittaussovellus ei vaadi ajon aikana erityistä tarkastelua tai säätämistä, mutta ohjelman voi avata sillä hetkellä olevat ja tallentuvat kuuluvuustiedot. Ohjelman käyttö tallennuksen aikana ei vaikuta mittaustuloksiin. Mittauksia on toteutettu Kehä I sisäpuolelta, sen varrelta ja pohjoiseen suuntautuvien valtateiden varrelta, sekä Etelä-Suomen harvempaan asutuilla alueilla, jolloin erityisesti tukiasemien harvempi väli ja maaston vaikutuksesta johtuva vaihtuvuus on saatu hyvin erottumaan. Näin on saatu konkreettisempi käsitys, millaisia tukiasemien solutiheyksiä eri alueilla on. Mittauskartoitusta ei ole toteutettu tarkasti laajoilta alueilta, eikä nimetyksi minkään tietyn matkapuhelinoperaattorin kyvystä, vaan tallennus on ollut sattumanvaraisesti käynnissä liikuttaessa tiealueita pitkin. Tutkimustyössä ei jaeta tai ole jaettu kuuluvuustietoja vaan sen avulla on ainoastaan koostettu likimääräinen analyysi mobiilitukiasemien luotettavuuden nykytilasta.

3.4 Rekonstruointi, visualisointi ja analyysi

Mittausdatan sisältämä kulkureitti (GPS), solutunniste (CID) ja tehotaso (RSSI) on ladattu ja rekonstruoitu QGIS ohjelmaan mahdollisimman selkeäksi kartaksi, jotta analyysin teko on ollut mahdollista. Rekonstruktioita visualisoimalla on saatu muutokset havainnollisesti näkyviin. Visualisointi mahdollistaa analyysin silmäilemällä ja mittailemalla etäisyyksiä paikkatieto-ohjelmassa. Analyysin perusteella on muodostettu 6 erilaista havaintokokonaisuutta, jotka ovat esitelty seuraavaksi.

Havainto 1 (solukoko ja solun vaihtuvuus):

- Matkapuhelinverkon tukiasemien (3G) tiheys (solukoko) vaihtelee asutustiheyden ja liikenneväylien mukaan.
- Kehä I sisäpuolella ja sen tasalla tukiaseman vaihtuvuus voi olla n. 200-750m ja Kehä III kohti tultaessa välit ovat n. 1km. Kehä III ulospäin kuljettaessa välit ovat pääväylien varrella n. 3km, joka vaikuttaa

olevan melko tyypillinen tukiaseman vaihtuvuuden väli. Tämä tarkoittaa sitä, että liikennenopeuksien mukaan ajettaessa radiolinkki vaihtuu keskimäärin 15-30 sekunnin välein. Pääväylien ulkopuolella (Etelä-Suomen alueella) tukiasemien solun säde on tyypillisesti 3km, jolla voidaan vielä taata sopivasti päällekkäistä kuuluvuutta toiset 3km. Katveettomalla alueella tukiaseman varmentamaton kantama voi olla 6km tai ylikin.

- Haja-asutusalueilla kuuluvuutta riittää usein parhaimmillaan vähän yli 6 km päähän. Tämä tosin on varmasti riippuvainen lähettimen tehosta, antennista ja suuntauksesta.
- Tukiaseman vaihto ja kaistan kapasiteetin käyttö on hyvin nopeaa ja älykästä, sillä mobiililaitteen toiminta on vaihtokohdissa lähes katkeamatonta.
- Kuvassa 10 väri erottelee solutunnisteet (CID) ja paksuus kertoo vastaanotetun tehotason (RSSI) arvon.

Havainto 2 (maaston katveet):

- Maaston muodot ja metsät vaikuttavat merkittävästi tukiasemien kuuluvuuksiin, eikä signaalit heijastele katveiden taakse luonnon kohteista välttämättä siinä määrin kuin voisi olettaa.
- Harvemmin asutuilla alueilla tukiasemaväli on suurempi, joten maaston katveiden negatiivinen vaikutus korostuu entisestään.
- Tukiasemilla on luonnollisesti päällekkäisyyksiä, jolloin kuuluvuus juuri tiettyyn tukiasemaan voi johtua enemmän maaston muodoista, kuin etäisyydestä.

Havainto 3 (suunnitelmallisuus):

- Erilaisista avoimista paikkatietolähteistä kerätyillä tukiasemien paikkatiedoilla voidaan muodostaa solukartta Voronoi-kuvaajalla, joka kertoo havainnollisesti mihin kuuluvuuksien rajat asettuvat teoreettisesti. Kuvaaja ja käytäntö ovat jossain määrin täsmäviä. Todellisudessa kuuluvuuksien tarkempi suunnittelu on todennäköisemmin toteutettu esim. Longley-Rice menetelmällä, kuin Voronoi-kuvaajalla. (Sun ym. 2018, 10.)
- Taajuusalueet ovat toteutetut siten, että vierekkäiset tukiasemat eivät sotke kuuluvuuksia ja jäävät kauempien kantamien taakse. Tämä on matkapuhelinverkon suunnittelun peruseriaatteita.
- Mittauksissa ja mallinuksissa erottuu tukiasemien järjestelmällinen suunnittelu, jolla on pyritty takaamaan mahdollisimman moitteeton kuuluvuus katveisissakin maastoissa.
- Tiedonsiirtokapasiteetin kasvattaminen 5G:llä on aiempaa isompi haaste katveisilla ja laajoilla haja-asutusalueilla.

Havainto 4 (yhteyden ja paikannuksen luotettavuus):

- Yhteyden luotettavuutta on arvioitu tilastoimalla 3G:n kuuluvuutta ja GPS paikannuksen toimivuutta eri mittauksen ajalta.
- Taulukon 1, 3G:n kuuluvuusprosentti on laskettu tallennetun paikkatietoaineiston kaikkien yli -95dBm olleiden otantojen määrä jaettuna kaikilla otannoilla.

Taulukko 1. Yhteyden luotettavuuden arviointi.

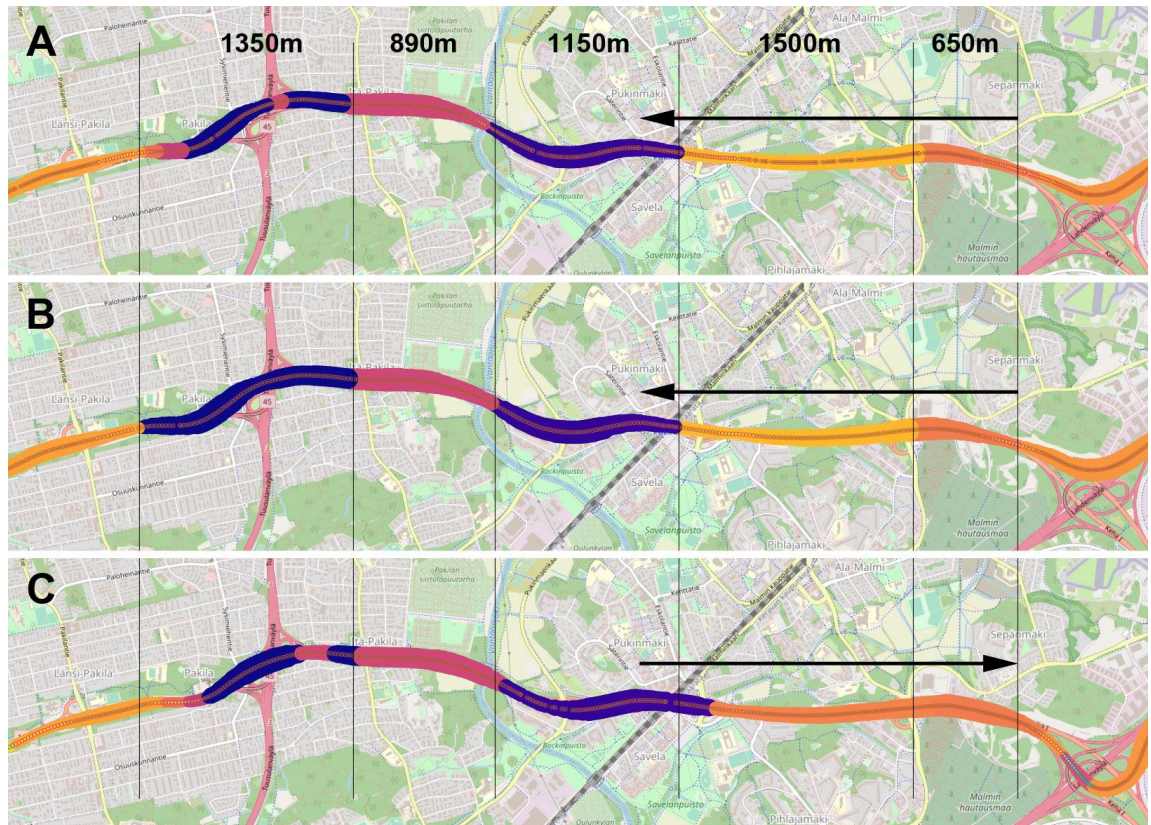
	Mittaus 1	Mittaus 2	Mittaus 3	Mittaus 4	Mittaus 5	Keskiarvo	Mediaani
Mittausalue Matkan pituus Matkan kesto	Haja-asutus Matka alle 50km Kesto n. tunnin	Kaupunki + haja-asutus Matka yli 50km Kesto n. 1,5 tuntia	Kaupunki + haja-asutus Matka yli 50km Kesto n. 1,5 tuntia	Kaupunki Matka alle 50km Kesto tunnin	Kaupunki Matka alle 50km Kesto 0,5 tuntia		
3G:n kuuluvuus yli -95dBm koko matkasta	90,5 %	93,4 %	98,9 %	99,7 %	97,6 %	96,0 %	97,6 %
Pisin jakso <-95dBm (s)	67,0	140,0	47,0	12,0	41,0	61,4	47,0
GPS toimivuus koko matkasta	83,6 %	98,3 %	96,6 %	90,6 %	84,2 %	90,7 %	90,6 %

Havainto 5 (mittaustulosten toisintaminen):

- Mittaustulokset kuvassa 10 on todennettu paikkansa pitäviksi uusintamittauksen avulla. Tukiasemat vaihtuvat kuvan 10 A ja B. osalta vastaavasti. Esimerkin C kohdalla voi huomata nuolen alla olevan tukiaseman tunnuksen olevan eri kuin toiseen suuntaan ajettaessa. Syynä voi olla ympäristö tai ajankohdasta johtunut tukiaseman ruuhkautuminen.
- Eroavuudet ovat hyvin vähäisiä ja monessa paikassa lähes olemattomia.

Havainto 6 (menetelmän toimivuus):

- Kartoittaminen matkapuhelimella vaikuttaa varsin riittävältä tähän käyttöön. Matkapuhelin antaa käyttölaitteena aidon käsityksen yhteyksien toimivuudesta, vaikkakin puhelinmalleissa on eroja. Tarkempien tulosten saavuttamiseksi tulisi käyttää auton ulkoista antennia ja erityistä mittalaitetta.
- QGIS paikkatieto-ohjelmisto taipuu hyvin kiinteiden tukiasemien mallintamiseen ja kuuluvuuksien kartoittamiseen.



Kuva 10. Tukiasemien mittaustulosten vertailua karttapohjalla (Viljanen 2021).

3.5 Johtopäätökset

Mobiiliyhteyden (3G) todellinen kattavuus ja tukiasemien nopea vaihtuvuus, sekä keskinäinen paikkaavuus kävi hyvin ilmi rekonstruktioita tarkastellessa kts. kohta 3.4. Mitattua dataa käsittelemällä oli mahdollisuus selvittää yhteyden ja GPS paikannuksen luotettavuutta eri mittausten ajalta. Käytössä olleet taajuusalueet, eikä tiedonsiirtonopeudet käyneet kuitenkaan ilmi kerätystä datasta. Havainnoista voidaan silti päätellä yhteyksien luotettavuudessa olevan selkeitä vaihteluita, mutta ei mitenkään tavanomaisesta käyttökokemuksesta poikkeavia. Kriittisissä ja reaaliaikaisuudeltaan kovennetuissa järjestelmissä yhteyksien tulisi toimia käytännössä aina sataprosenttisella varmuudella, joten jatkoselvityksen kannalta kiinnostavaa olisi esimerkiksi, kuinka lähelle täydellisyyttä voidaan päästä milläkin alueella ja millä järjestelyillä. Langattomuus ja sijaintimuutokset muodostavat liikkuville järjestelmille oman piirteensä ja laskee järjestelmien väli-

sen tiedonvaihdon luotettavuutta merkittävästi. Haja-asutusalueilla riski yhteyden katkeamiseen on mittausten perusteella selkeästi hieman suurempi kuin kaupungeissa. Maaston katveet voivat aiheuttaa jopa yli kilometrin mittaisia reitin osia, joissa kuuluvuus (RSSI) laskee alle -95dBm. Yhteyksien toimivuuden voi silti todeta olevan arkipäivän tarpeisiin varsin hyviä. Havaintojen perusteella tiedon välityksen luotettavuutta tulisi mahdollisesti parantaa kasvattamalla laitteiden tai ohjelmistojen puskurimuistien kokoja ja älykkyyttä samalla, kun tukiasemien välejä joudutaan korkeampien 5G taajuuksien heikomman etenemisen vuoksi tihentämään. Nopeammilla yhteyksillä, kuten 5G:llä kyettäisiin purkamaan näitä lähetyksen tai vastaanoton puutteen vuoksi puskuriin jääneitä vanhempia informaation osia entistä nopeammin uuden tiedon edeltä. Vähän vanhemmankin tiedon merkitys voi olla olennaista tilannekuvan eheyden ja jatkuvuuden kannalta, joten kaikkea siirtymätöntä tietoa ei tulisi kadottaa järjestelmistä.

Tärkeänä oppina saavutettiin ymmärrystä matkapuhelinsolun käsitteestä ja miten niiden toteutus näkyy todellisessa maailmassa. Havainnot olivat mielenkiintoisia ja selvitettyjen teorioiden mukaisia. Tukiasemat ja niiden vaihtuvuus täsmäsivät hyvin uusintamittausten kohdalla, joskin pieniä eroja oli havaittavissa. Matkapuhelinsoluja tutkimalla oli luonnollista tutustua paremmin erilaisiin radiotaajuuksien etenemismalleihin ja kuvaajiin. Etenemismalleista useimmiten vastaan tuli Longley-Rice -malli, mutta toinen hyvin kevyt ja melko epätarkka menetelmä on nk. Voronoi-kuvaaja, joka ei kuitenkaan laske varsinaista signaalien etenemistä. Painotetun Voronoi-kuvaajan käyttö kuuluvuuksien yksinkertaistetun mallintamisen kannalta voisi olla hyvinkin hyödynnettävissä. Vaikkakaan kuvaajan rajat eivät välttämättä muodostu aina lähellekään radiotaajuuksien kantamien todellisia rajoja. Tämä johtuu siitä, että Voronoi-kuvaaja käytännössä piirtää useista eri pisteistä etäisyyksien lähimpiä leikkauskohtia ja näin muodostuu monikulmioinen verkkomainen kuvaaja. Voronoi-kuvaajan kanssa voidaan hyödyntää vapaan tilan vaimennuksen laskentakaavaa. (Sun ym. 2018, 10.)

Solukokojen vaihtelu alueellisesti on arvioitavissa mittaustulosten perusteella ja tämä antoi myös pohjakäsitystä generisten mallien rakentamiseksi. Teoreettista tukea solukokojen määritelmälle antoi STUK:n matkapuhelinverkon toiminnasta ja tukiasemista kertova tietopaketti, jossa eri solukokojen säteen mukaan kuvataan makro- (>1km), mikro- (100m-1000m) ja pikosoluiksi (<100m). Solukoko vaihtelee tyypillisesti keskimääräisen käyttäjämäärän mukaan eli paljonko alueella keskimäärin on mobiililaitteita, sekä ympäristön katveisuuksien mukaan. Tiheään rakennetuilla alueilla ja isoissa julkisissa tiloissa, kuten kauppakeskuksissa voidaan käyttää pienitehoisia pikosoluja tarjotakseen yhteydet saadoille käyttäjille. (STUK 2019.)



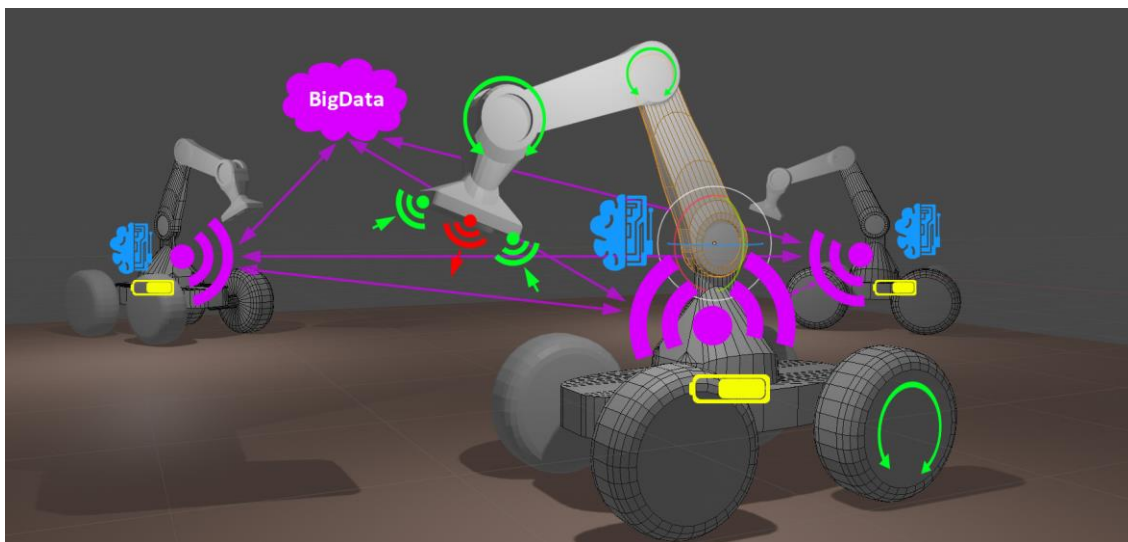
Kuva 11. Erilaisia mastotyyppisiä ja solukokoja (Viljanen 2021).

Mobiiliyhteyksien kaltaista tukiasemakeskeistä verkkoon liittymistä voidaan verkkotopologialtaan kutsua tähtimäiseksi. Tähän tähtimäisyyteen on tulossa 5G:n myötä jatkettu ominaisuus, jonka avulla 5G:n 1-3km kantamaa voidaan jatkaa esimerkiksi lyhtypylväisiin liitettyjen 5G toistimien avulla nk. daisy chain -periaatteella. Olisiko siis seuraava askel tästä luoda konsepti autonomisesti liikkuville tukiasemille, joilla voitaisiin täydentää laajakaistaisia yhteyksiä aiempaa ketterämmin? 5G:n ja ehkä viimeistään 6G:n myötä tukiasemilta voinee odottaa liikkuvuutta. Koneesta koneeseen (M2M) tyypiset adhoc ja mesh-verkko ratkaisut yleistyvät jo nyt monien IoT-laitteiden kohdalla. Mesh-verkkotopologian hienous perustuu laitteiden helppoon liitettävyyteen ja yhteyden varmentamiseen

jatkamalla yhteyttä laitteesta vapaasti toiseen. Mesh-verkkotopologiassa solmupisteet voivat siis keskustella suoraan keskenään ja toistensa kautta. Haasteena mesh-verkkotopologiassa ovat tiedonsiirrolliset pullonkaulat, puskuroituminen ja datapakettien kiertoon jääminen. (Keskinen 2019, 47.)

Korkeat linkkimastot, laitetilat, runkosolmut ja runkokaapelit ovat todennäköisesti vielä pitkään hyvin tärkeä osa mobiiliyhteyksien infraa. Uusien yhteystyyppien tulo markkinoille tulee johtamaan verkkolaitteiden uusimisen lisäksi tukiasemien ja runkokaapeleiden tihentämiseen. Infran rakentaminen aiheuttaa luonnollisesti rakentamisen ahtautta, sekä maisemallisia haasteita, mutta voi myös osaltaan johtaa palvelujen kustannusten nousuun. Toisaalta verkkoyhteyksien toimivuus on aina vain tärkeämpää, joten oletettavasti laadukkaista yhteyksistä ollaan tulevaisuudessa valmiimpia maksamaan hieman enemmän. Kiinteiden tukiasemien lisäksi liikkuville tukiasemille tai toistimille saattaisi löytyä kysyntää, joilla nopeiden verkkojen kattavuutta voisi ulottaa esimerkiksi loma-kausilla tai tapahtumien aikana entistä ketterämmin tiettyihin kohteisiin ilman kalliin infran rakentamista. Tämä voisi avata uudenlaisia palvelumalleja palveluntarjoajille.

4 Kyberfyysinen järjestelmä (CPS)



Kuva 12. Kuvituskuva kyberfyysisistä järjestelmistä (Viljanen 2021).

4.1 Käsiteanalyysi

Kyberfyysisen järjestelmän käsite on paljon esillä digitalisaatiosta kertovissa tutkimuksissa, mutta käsite tuntuu silti edelleen kovin vieraalta ja vähän käytetyltä. Määritelmän tutkimisen tavoitteena on ollut oppia ymmärtämään määritelmän sisältö ja luokitella erilaisten verkottuneiden ohjausjärjestelmien ominaisuuksia mahdollisimman yleiskäsitteisiin osiin, jonka avulla voidaan muodostaa runkorakenne mallintamisen tarpeisiin. Käytännössä tämä tarkoittaa pohjatyötä tietynlaisen oliomallin luomiselle, jotta mallinnettuja järjestelmiä voidaan hyödyntää simulaatioissa ja ohjelmoinnissa.

Yleisesti tiedostetaan se, että kaikenlaisissa ohjausjärjestelmissä ne laitteet, jotka tuottavat fysikaalisesta avaruudesta järjestelmiin tietoa sisään (input) tapahtuu erilaisten sensoreiksi luokiteltavien sähköisten muuntimien kautta. Näin ollen sensoreiden kuvaamiseen olisi kenties mahdollista toteuttaa suhteellisen vakio muotoinen, mutta riittävän kattava parametrisoitavissa oleva sensorimalli. Oikeastaan se olisi enemmän kuin suositeltavaa, sillä sensoreiden ja ympäristöjen välille tulisi luoda keskeisiin fysiikan perus- ja johdannaissuureisiin perustuva mahdollisimman joustava ja skaalautuva rajapinta. Tällainen rajapinta tarvitaan järjestelmien välisten vuorovaikutusten simuloimiseksi nk. multi domain -asetelmissä, jossa kaikki voi vaikuttaa kaikkeen. Näin ollen erilaisten mallien rajapintoja hyödyntäviä laskentamalleja kyettäisiin toteuttamaan joustavammin.

Tavoitteena oli myös löytää käsitteellinen määritelmä sensoria päinvastaiseen suuntaan toimivalle muunninlaitteelle, joka määrittäisi toimivuutensa yhtä yksinkertaisesti kuin sensorin, mutta ohjausjärjestelmästä ulos (output). Löytäkseen edellä kuvatun määritelmän, on tietysti olennaista tietää mihin käsitteistöön sensorit kuuluvat. Sensorit ovat nk. muuntimia (transducer) ja näiden muunninlaitteiksi määriteltävien pienten laitteiden funktio on muuntaa energiaa muodosta toiseen, mutta myös muotoon, joka on järjestelmälle soveltuvaa (Lexico 2021). Lähinnä sähköstä ja signaaleista mekaaniseksi liikkeeksi tai sähkömagneet-

tiseksi säteilyksi ja toisinpäin. Sensoria vastakkaiseen suuntaan toimivat muuntimet ovat aktuaattoreita (toimilaitteet). Lisäksi ovat kaksisuuntaiset muuntimet, jotka kykenevät muuntamaan energiaa kumpaankin suuntaan.

Määritelmän mukaan aktuaattoreilla tarkoitetaan kineettistä liikettä tuottavia sähkölaitteita, kuten erilaisia sähkömoottoreita. Kaksisuuntaisilla muuntimilla tarkoitetaan laitteita, jotka muuntavat energiaa kumpaankin suuntaan, kuten antennoja ja kaiuttimista, sekä mikrofoneista löytyviä piezo-elementtejä. Kahden erillisen ulostulon käyttäminen tuntui kuitenkin mallintamisen kannalta epäkäytännölliseltä ja ajatukseen oli piirtynyt käsitys, että yksinkertaistamisen vuoksi sisään- ja ulostuloiksi tulisi riittää omat väylänsä I/O-periaatteen mukaisesti. Näin ollen kaksisuuntainen muunnin on jätetty tästä pois ja se voidaan mallintaa sensoreiden ja aktuaattoreiden yhtenäisellä käytämisellä. Aktuaattori-käsitettä käytetään siis jonkin verran laajennettuna sen nimenomaisesta määritelmästä, joka vaikuttaa olevan melko yleistä. On myös näkemys, jossa sensorit ovat erotettu kokonaan muuntimista ja muuntimia käytetään sensoreille vastakohtana. Tässä tutkimuksessa on päädytty käyttämään aktuaattori-käsitettä sensoreiden vastakohtana.

Seuraavat haasteet liittyivät tiedonsiirtoyhteyksien, ohjauslogiikan/älyn ja sähköenergian kapasiteettien kuvaamiseen, mutta näistä myöhemmin mallin määrittelyn yhteydessä lisää. Tällaisen järjestelmäkokonaisuuden kuvaamiseksi yhdellä käsitteellä ei ollut aluksi helppo löytää yhtä käyttöön soveltuvaa käsitettä, vaan mielessä siinsi ajatus eräänlaisesta älykkästä laiteyksiköstä tai äly-yksiköstä. Samoin ajatuksena oli se, että käsite voisi olla koneen lisäksi mahdollisimman analoginen ihmisen kykyjen kuvaamiseksi. Tämähän on itseasiassa ollut alkujaan myös kybernetiikan keksijänkin näkökulma. Lopulta kyseistä järjestelmää parhaiten kuvaava määritelmä alkoikin sattumalta löytyä ja näin kyberfyysisen järjestelmän käsite lopulta valikoitui. Ensimmäisten hakujen osalta tuli päädyttyä työpaperiin nimeltä Modeling the Internet of Things: a simulation perspective, D' Angelo, G. Ferretti, S. Ghini, V (2017). Työpaperissa mainittu ohjelmisto OM-NeT++ johti seuraavien hakujen jäljille ja tätä kautta myös lyhenne CPS (Cyber-

physical system) löytyi. Esiselvitystyö johti kyberfyysisten järjestelmien tutkimusten pariin, joka oli itselle aiemmin täysin tuntematon käsite. Hyvin pian tuli havahduttua CPS:n löytymiseen keskeisenä osana myös teollisuuden neljännen vallankumouksen eli Teollisuus 4.0:n käsitteistöstä. Kyberfyysiset järjestelmät käsittävät käytännössä kaikki älykkäät järjestelmät alleen, kuten myös IoT:n. (Bartodziej 2016, 52–57.)

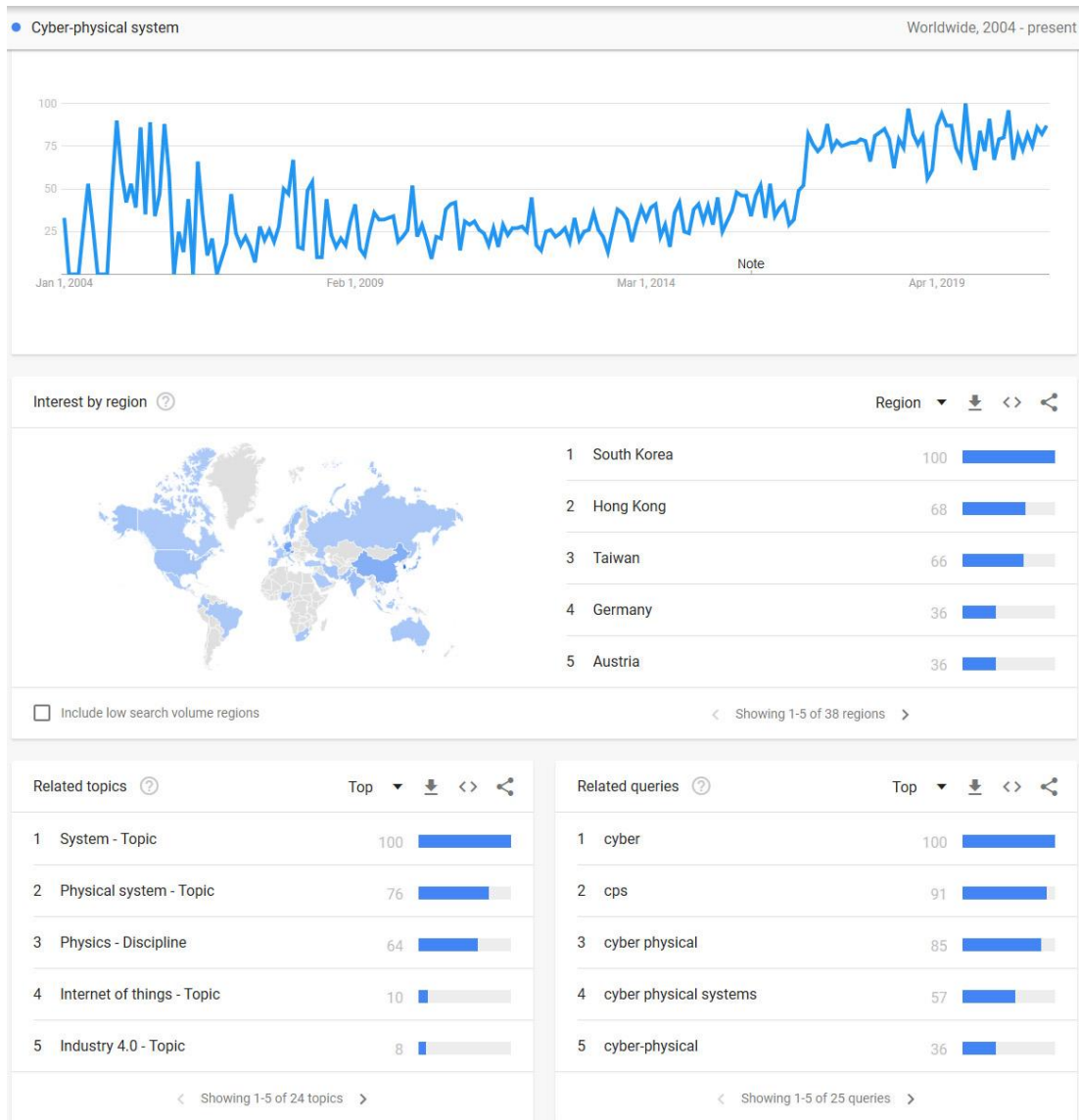
Kyberfyysisten järjestelmien tutkimuksiin syventyminen alkoi siis edellä mainituista käytännönläheisistä lähtökohdista, joka on osaltaan muovannut sitä näkökulmaa, jolla järjestelmän määritelmää tässä työssä tarkastellaan. Kyberfyysisten järjestelmien määritelmästä on ollut havaittavissa erilaisissa julkaisuissa jossain määrin erilaisia tulkintoja, jossa kyberia käsitellään enemmän tai vähemmän irrallisena kokonaisuutena fyysisistä osista. Kyberfyysisyyttä on tulkittu esimerkiksi niin, että prosessitekniikan sovelluksissa tuotantolinja muodostaa fyysisen ulottuvuuden tekniset ratkaisut eli OT:n (operational technology) ja IT-ratkaisut (information technology) kyberulottuvuuden, kattaen kaiken muun tietotekniikan koko organisaatiossa. OT:n ja IT:n välisen rajapinnan hämärtyminen kuvaaminen tulevaisuuden kyberfyysisten järjestelmien keskeisenä tavoitteena on jäänyt toisissa tutkimuksissa vähemmälle. On kuitenkin voinut havahtua tieteilisissä kirjoituksissa myös useisiin tätä työtä vastaaviin tulkintoihin, kuten 4.2 Lähdehakutulosten analysoinnissa on aihetta sivuttu.

4.2 Lähdehakutulosten analysointi

Hakutuloksia kyberfyysisistä järjestelmistä löytyy suhteellisen hyvin, mutta silti on havaittavissa, ettei käsite ole välttämättä kovinkaan tunnettu tai sitä ei koeta helposti käytettävänä. Perusteluna tälle on se, että käsitettä on kuullut käytettävän suhteellisen harvoin erilaisissa lehtijulkaisuissa verrattuna sulautettuihin järjestelmiin tai IoT-käsitteeseen, jotka ovat olleet esillä jo useita vuosia. Hakutuloksista käy ilmi useampia tutkimuksia ja määritelmän kuvauksia liittyen kyberfyysisiin järjestelmiin. Hakuja tehdessä löytyi muutama kotimainen osuma, joista yhtenä esimerkkinä Kyberfyysisten järjestelmien kehittäminen Suomessa vuonna 2019 Rautala, E. 2019 käsittelee aihetta yhteiskunnallisemmalta tasolta.

Toinen kotimainen tutkimus *Small world for dynamic wireless cyber-physical systems* Latvakoski, J. 2016 käsittelee samaa aihealuetta kuin tässä tutkimuksessa, mutta teknistieteellisemmästä näkökulmasta. Useimmat tutkimuksista olivat englanninkielisiä ja ulkomaisten tutkijoiden tekemiä. Hakutulosten kautta löytyi myös joitain tutkijoita, jotka ovat identifioituneet vahvasti kyseisen tutkimusalan piiriin. Esimerkkinä Berkleyn yliopiston professori Edward A. Lee, joka jopa omistaa verkkotunnuksen nimeltä cyberphysicalsystems.org tutkimuksilleen. Hän on toteuttanut useampia julkaisuja, sekä hänen luentojaan on nähtävillä YouTube-palvelussa. Berkleyn yliopistolla on myös kyberfyysisiä järjestelmiä tutkiva iCyPhy niminen tutkimusyhteisö, jonka tavoitteena on tehdä tutkimusta kyberfyysisten järjestelmien arkkitehtuurista ja suunnittelusta, mallinnuksesta ja analysointi tekniikoista. Google Trends palvelulla haettaessa aiheita ”Kyberfyysinen järjestelmä”, ei löytynyt riittävästi tuloksia, jotta niistä olisi ollut tilastoitaviksi. Tilastoidut tulokset aiheista ”Cyber-physical system” alkaen vuodesta 2014, jakautuminen maittain ja hakuun liittyneet muut aiheet ja kyselyt esitettynä kuvassa 13. Vuonna 2017 kyseisten aiheiden määrä on noussut tasaisesti ja trendi on edelleen kasvava, johon syynä lienee Teollisuus 4.0 -konseptin markkinoinnillisuus. Euroopasta Saksa erottuu selvästi muiden maiden yli ja tätä varmasti selittää se, että Teollisuus 4.0 -käsite on itseasiassa Saksan valtion vuonna 2012 laatima käsite (Bartodziej 2016, 32–34). Suomessa ei kyseisillä hakusanoilla ole tehty tilastoinnin kynnyistä ylittävää määrää hakuja. Suomesta on kuitenkin mukana 262 kumppania tutkimus, kehitys ja innovointi ohjelmassa nimeltä ITEA3 ja 115:sta sen alla olevassa projektissa. Yhtenä esimerkkinä ITEA3:n projektista on OpenCPS, jossa on käsitelty vastaavasti kyberfyysisten järjestelmien mallintamista Modelica ja UML standardien kautta. Suomesta kyseisessä tutkimuksessa on mukana VTT. (Lee 2021; iCyPhy 2021; ITEA3 2021.)

Kaikkiaan systeemiteoreettisia tutkimuksia ja muita julkaisuja löytyy erittäin paljon ja näistä on hyvin sovellettavissa tietoa ja ratkaisuja myös kyberfyysisten järjestelmien mallintamisen teoreettiseksi pohjaksi.

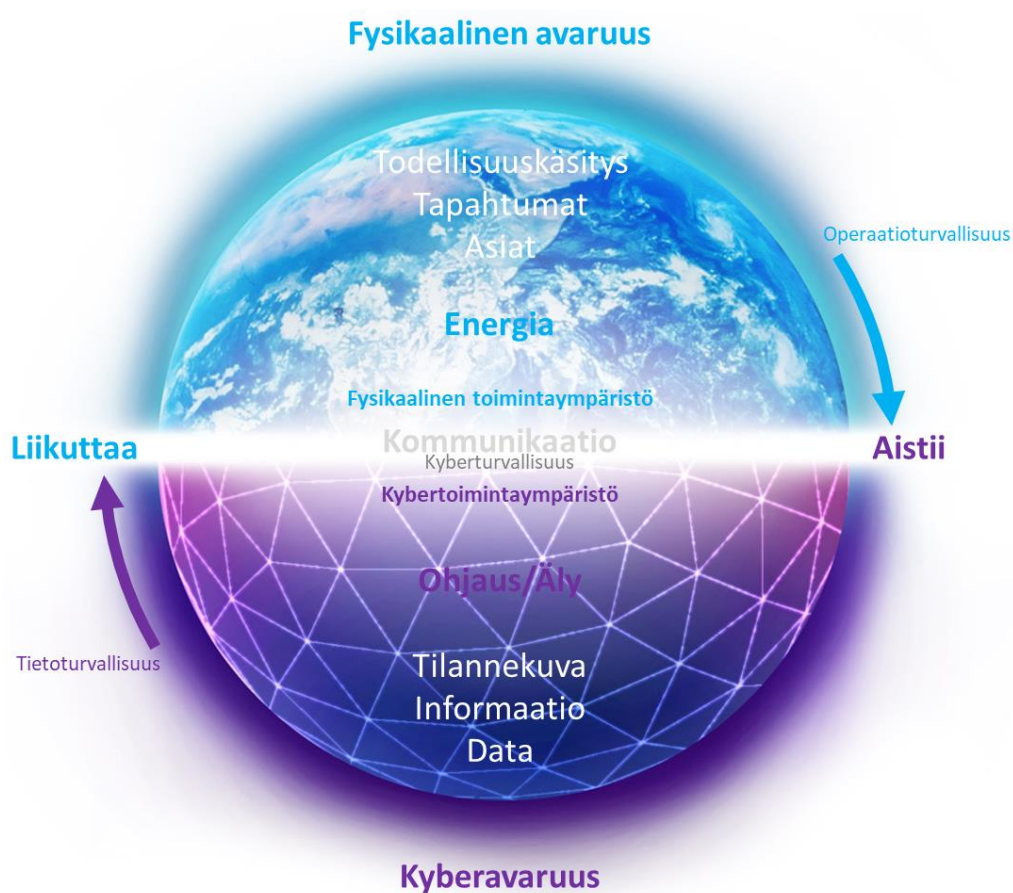


Kuva 13. Google Trends tulokset: "Cyber-physical system" 1.4.2021.

4.3 Määritelmän abstrakti kuvaus

Todellisuuskäsitykseen pohjautuvan fyysikaalisen avaruuden merkitys kyberavaruudelle on tuottaa informaatiota aistimalla fyysisiä tapahtumia ja asioita, sekä muuntamalla aistihavainnot digitaaliseksi dataksi kyberavaruuden taustalla olevaan informaatioympäristöön. Mikäli informaatioympäristön ominaisuuksia kyetään ymmärtämään, voidaan sitä hyödyntää tilannekuvien muodostamiseen, hajautettuun tai kollektiiviseen älyyn ja ohjaamiseen (Kuusisto 2005, 3). Kybertoi-

mintaympäristö vastaa tämän kaiken informaation hallinnoimisesta. Vastavuoroisesti kyberavaruuden merkitys fyysikaaliselle avaruudelle on tuottaa tilannekuvaksi tunnistetun informaation pohjalta ihmisäylyllisen tai koneäylyllisen tulkinnan tuloksena optimoitua ohjausta. Ohjauksella tarkoitetaan jonkin asian harkittua muutosta käytännössä liikkeen avulla. Liike voi olla suoraa fyysikaalisen ilmiön käyttöä, kuten sähkömoottorin pyörytystä, radiolähetteen säteilyä tai epäsuoraa todellisuuskäsityksen muovaamista. Kyberfyysisen järjestelmän abstrakti rakenne esitetään useimmissa lähteissä hieman kuvan 14 kaltaisena kuvauksena, mutta kyseinen kuva on kirjoittajan oma tulkinta.



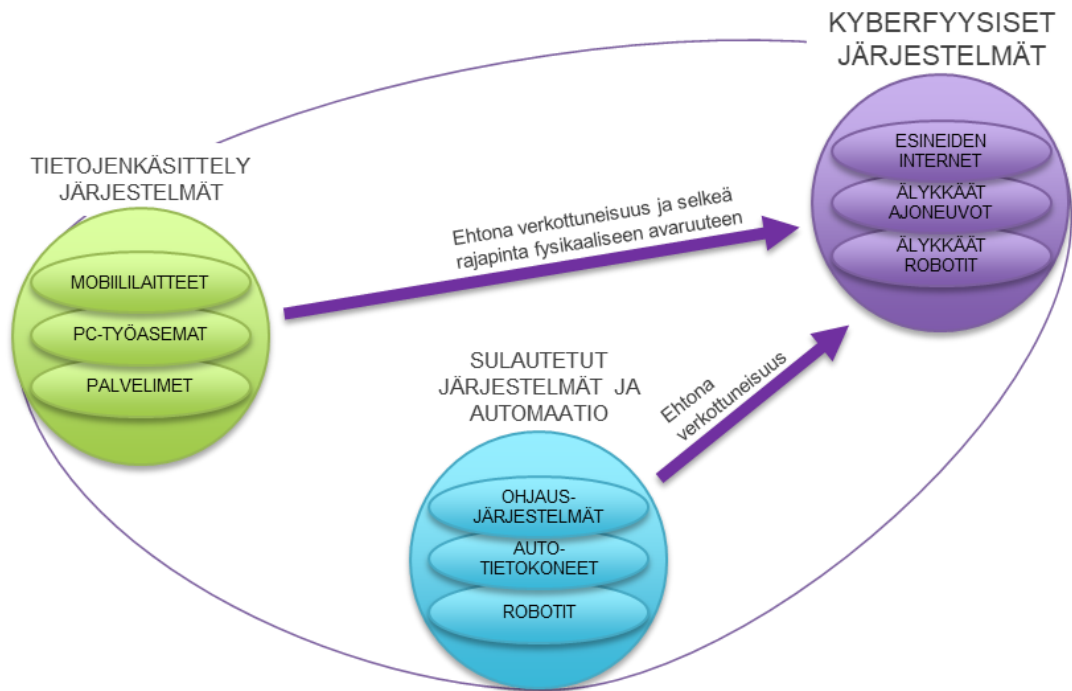
Kuva 14. Kyberfyysinen pyörä (Viljanen 2020).

Kuvatun kyberfyysisen pyörän avaruuksien rajapintoihin on kuvattu kyberturvallisuuden liittyvät operaatioturvallisuus ja tietoturvasuus. Operaatioturvallisuuden (OT) kuuluu henkilöiden, välineiden, tapahtumien ja muiden asioiden suo-

jaaminen fyysisen turvallisuuden ja tiedon jakamisen säätelyn keinoin. Tietoturvallisuuden (IT) peruseriaatteisiin kuuluvat tiedon manipuloinnilta, vääristämiseltä ja tuhoamiselta suojautuminen. Operaatioturvallisuus, fyysinen turvallisuus ja tietoturvallisuus täydentävät järjestelmien loogisiin hallinnointitasoihin viittaavaa kyberturvallisuutta.

4.4 Yleinen määritelmä ja konkreettinen kuvaus

Kyberfyysisellä järjestelmällä tarkoitetaan järjestelmää, jolla on sekä tietotekniiseen tiedonvaihtoon perustuvia kyberominaisuuksia, että käsin kosketeltavia fyysisiä ominaisuuksia ja nämä ominaisuudet mahdollisimman läheisesti yhdistävä rajapinta. Määritelmä tuo tavallaan laajennuksen sulautettujen järjestelmien ja automaatiojärjestelmien määritelmiin, joiden olennaisimpana puutteena ovat olleet tietoverkkojen laaja hyödyntäminen. Kyberfyysisten järjestelmien periaate lähtee liikkeelle fyysisten prosessien reaaliaikaisesta mittaamisesta ja digitoimisesta, josta muodostuu järjestelmän toiminnasta kertovaa informaatiota. Digitoitua informaatiota välitetään muihin järjestelmiin kyberominaisuuksien avulla erilaisten fyysisten ja loogisten rajapintojen kautta. Verkon kautta vastaanotetun ja järjestelmän itsensä keräämän informaation perusteella vaikutetaan järjestelmien toimintoihin. Informaatiota ja siihen pohjautuvaa ohjausta välitetään fyysisen toimintaympäristön ja kybertoimintaympäristön välillä kumpaankin suuntaan. Tätä informaation loogista kiertoa järjestelmien kautta kutsutaan palautesilmukoiksi. Fyysisen toimintaympäristön ajallinen etuasema johtuu siis luonnollisesti siitä, että järjestelmät saavat syötteensä fyysisistä prosesseista. Informaatioympäristön tilannekuva voi kilpailla ajallisen etuaseman saavuttamisessa vain mallien ja simulaatioiden keinoin, joiden tuotteilla kyetään ennakoimaan tulevast. Kybertoimintaympäristöjen, kuin informaatioympäristöjen keskeinen hyöty perustuu siis tiedon jakamiseen ja ihmisen kuin koneen älyn opettamiseen, sekä tulevan ennakointiin. Kyberfyysisiä järjestelmiä kutsutaan myös yhdistelmällisyyden vuoksi hybridijärjestelmiksi ja muutoksellisuksiensa, kuten liikkuvuuden vuoksi dynaamisiksi järjestelmiksi. Kyberfyysisen järjestelmän luokitteluun ei ole eksaktia määritelmää, mutta siihen pätee esimerkiksi kuvassa 15 kuvatut periaatteet. (Bartodziej 2016, 52–57.)



Kuva 15. Kyberfyysiseksi järjestelmäksi luokittelu (Viljanen 2021).

Kyberfyysinen järjestelmä koostuu käsitteenä kahdesta ominaisuudesta eli kyberominaisuuksista ja fyysisistä ominaisuuksista. Erilaisia teknisiä ratkaisuja ja näiden käyttötapoja löytyy molempiin hyvinkin laajasti, joten erilaisten järjestelmien luokittelu kyberfyysiseksi voi olla joissain tapauksissa tulkinnallista. Tulkinnaan vaikuttaa mm. se, kuinka merkittävää luokittelun kohteena olevan järjestelmän palautesilmukoiden vaikuttavuus nk. kyberprosesseihin ja fyysisiin prosesseihin on. Luokittelun arvioinnin tueksi on laadittu seuraavan taulukon 2 mukainen työkalu. Taulukkoon on annettu prosentuaalinen arvio keskeisimmästä kyberominaisuudesta ja fyysisestä ominaisuudesta, jonka jälkeen arvio otetaan prosenttien tulona. Käytännössä yli 75% on selvästi kyberfyysiseksi luokiteltava järjestelmä ja yli 50% tarkoittaa järjestelmän täyttävän osittain kyseiset vaatimukset. Luokittelu edellyttää kykyä ominaisuuksien laadullisesta tulkinnasta.

Taulukko 2. Kyberfyysisen järjestelmän luokittelu.

Järjestelmä	Keskeisin kyberominaisuus K%	Keskeisin fyysinen ominaisuus F%	Kyberfyysisyys K*F%
Akkuporakone	0%	Sähköväänin 75%	Ei ole 0%
Verkkokytin	Verkon ohjaus 100%	0%	Ei ole 0%
Palvelimet	Tietojen hallinta 100%	0%	Ei ole 0%
PC-työasema	Internet-yhteys 100%	HID laitteet 25%	Vähän 25%
Ajoneuvoihin sulautetut ohjausjärjestelmät	CAN-väylä + ECU 25%	Ajoneuvon sensorit ja aktuaattorit 100%	Vähän 25%
Mobiililaitteet (puhelimet, tabletit, jne.)	Mobiiliyhteys 100%	HID + muut laitteet 50%	Osittain 50%
Perinteiset automaatiojärjestelmät	SCADA järjestelmä 65%	Robotin sensorit ja aktuaattorit 100%	Osittain 65%
Älyrannekkeet	Bluetooth 90%	Syke + muut sensorit 100%	On 90%
Älykkäät robotit	IoT ja M2M-yhteydet 100%	Robotin sensorit ja aktuaattorit 100%	On 100%
Älykkäät ajoneuvot	Mobiili-, VANET-, M2M-yhteydet 100%	Ajoneuvon sensorit ja aktuaattorit 100%	On 100%
IoT-laitteet	IoT-yhteys 100%	Olosuhde-sensorit 100%	On 100%

Fyysisten ominaisuuksien luokittelussa voidaan tukeutua seuraaviin seikkoihin:

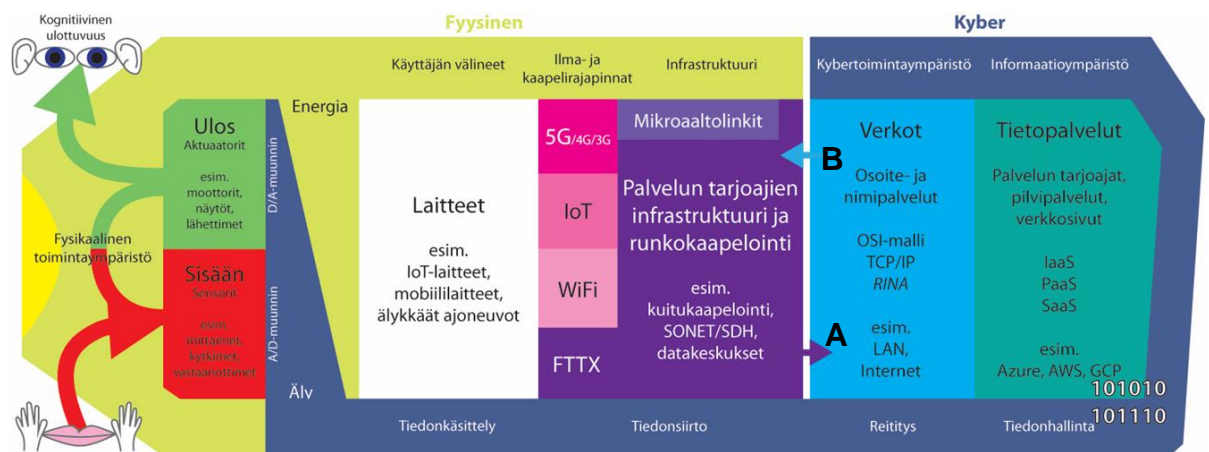
- 0% Ei lainkaan fyysisiä prosesseja mittaavia tai niitä muokkaavia laitteita.
- 25% HID-laite (Human interface device).
- 50% HID-laite ja joitain mittaavia lisälaitteita.
- 75% Yksittäinen fyysistä prosessia mittaava sensori tai aktuaattori.
- 100% Sensoreita ja/tai aktuaattoreita.

Kyberominaisuuksien luokittelussa voidaan tukeutua seuraaviin seikkoihin:

- 0% Ei lainkaan tietoteknisiä ratkaisuja tai yhteyksiä.
- 25% Kahden tai useamman järjestelmän osan välinen tiedonvaihto paikallisesti enintään 50m alueella.

- 50% Kahden tai useamman järjestelmän osan välinen tiedonvaihto paikallisesti enintään 100m alueella.
- 75% Kahden tai useamman järjestelmän välinen tiedonvaihto paikallisesti enintään 500m alueella ja osin WAN-verkossa (esim. Internet).
- 100% Mahdollisuus laajoihin WAN-verkkoihin.

Kyberominaisuudet tehostavat järjestelmän fyysisten ominaisuuksien käytettävyyttä. Tehostaminen toteutetaan fyysisistä prosesseista kerätystä informaatiosta koostetun ja edelleen jaetun tilannekuvatiedon ja data-analyysien keinoin. Järjestelmän loogisen toimintaperiaatteen näkökulmasta tämä tarkoittaa palautesilmukoita, jossa fyysiset prosessit ohjaavat laskennallisia prosesseja ja laskennalliset prosessit fyysisiä prosesseja. (Bartodziej 2016, 52–57.)



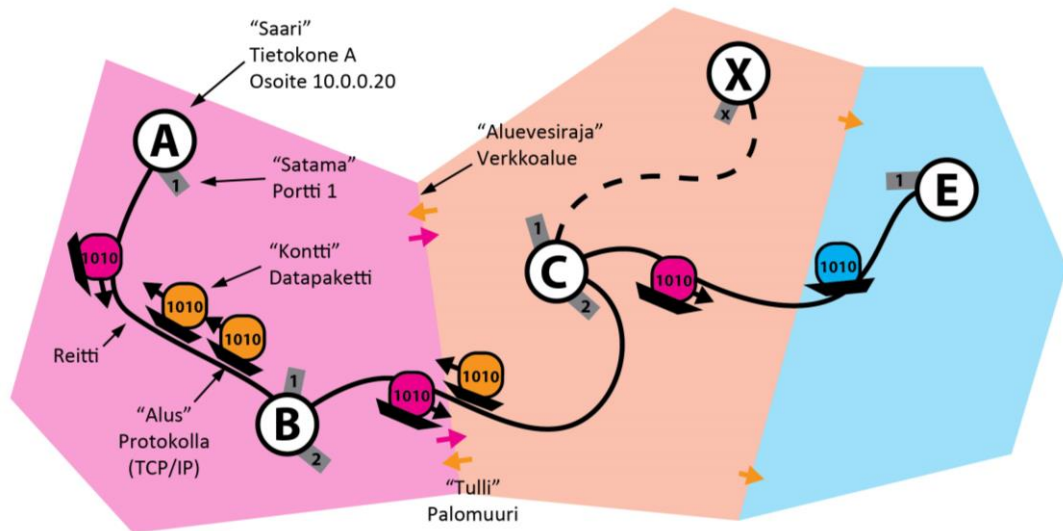
Kuva 16. Kyberfyysisen järjestelmän konkreettinen kuvaus (Viljanen 2021).

Fyysisten prosessien konkreettisiksi osiksi voidaan luokitella erilaiset laitteet, ilma- ja kaapelirajapinnat, infrastruktuuri ja teholähteet. Kyberprosessien osia ovat tiedonkäsittelyyn ja -siirtoon, reititykseen ja tiedonhallintaan liittyvät käytännöt ja kaikki samaan verkkoon kytköksissä olevien tietojärjestelmien saatavilla olevat tietopalvelut. Kyberprosesseja voisi kuvata vertauskuvallisesti ikään kuin mahdollisuudeksi purjehtia tietokoneesta toiseen ja kyvystä siirtää tietokoneiksi kuvattavien saarien tai mantereiden satamista tietoa sisältäviä kontteja toisiin satamiin, kuten kuvassa 17 on kuvattu. Kyseinen ajatus kuvata kyber- käsite

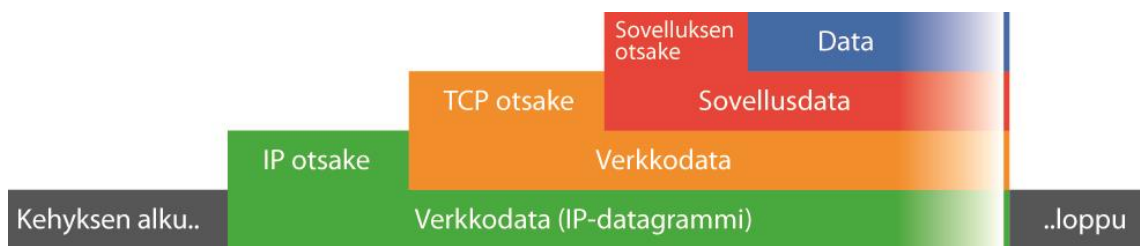
näin, muodostui kirjoittajan perehtyessä sovellusten virtualisointiin liittyviin kontteihin. OSI-mallilla voidaan tarkentaa kuvassa esitetyt verkkorakenteiden osat yhteen fyysiseen ja kuuteen loogiseen eri kerrokseen. Taulukossa 3 OSI-mallin kerrokset muodostavat kybertoimintaympäristön palautesilmukan vaiheet. Järjestelmään sisälle tultaessa kuljetaan vaiheet järjestyksessä 1-7 ja sisältä ulos mentäessä vaiheet 7-1. Kuvan 16 A ja B vastaavat taulukon 3 vastaavia. Kuva 18 kuvaa kuvan 17 TCP-IP protokollan mukaista datakehystä, jonka mukana ”sinisen datan” sisällä oleva informaatio kuljetetaan päätelaitteen sisälle ja ulos. (ISO 1987.)

Taulukko 3. OSI-malli

OSI-malli (Open Systems Interconnection Reference Model)				
A	B	Kerrokset	Protokollan data yksikkö (PDU)	Funktio
	1	Fyysinen kerros (Physical layer)	Bitti, symboli	Siirtotietekniikka (valokuitu, ethernet, jne)
	2	Siirtoyhteyserros (Data Link layer)	Kehys	Kehystää kerrosten 3-7 datan. (MAC osoite)
	3	Verkkokerros (Network layer)	Paketti	Reititys ja aliverkottaminen. (IPv4, IPv6)
	4	Kuljetuserros (Transport layer)	Segmentti, datagrammi	Huolehtii pakettien saapumisesta (TCP, UDP)
	5	Istunterros (Session layer)	Data	Sovelluserros (istunnot)
	6	Esitystapakerros (Presentation layer)	Data	Sovelluserros (teksti, kuva, video, ääni, jne. formaatit)
	7	Sovelluserros (Application layer)	Data	Sovellukset (MQTT, HTTP, HTTPS, FTP, FTPS)



Kuva 17. Kybermeri (Viljanen 2021).



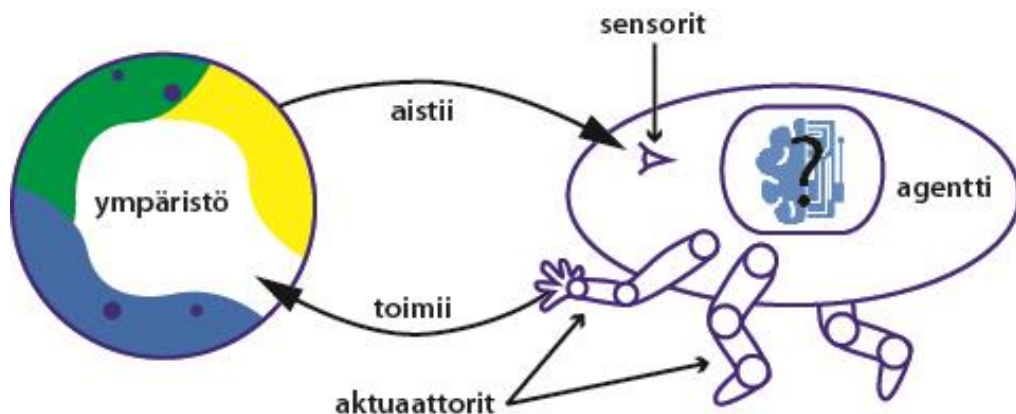
Kuva 18. TCP-IP protokollan mukainen kehys. Kuvan 16 "alus" ja "kontti". (Viljanen 2021; IONOS 2020).

4.5 Älyn määritelmä (älykäs agentti)

Tutkimustyössä laaditun kyselyn ja haastattelun pohjalta heräsi näkemyksiä älyn käsitteen käytön tarkentamisen tarpeesta tässä työssä esitellyissä ohjausjärjestelmiä kuvaavissa malleissa. Äly, yleiskäsitteellisesti, voidaan määritellä kykyinä oppia uutta ja sopeutua uusiin tilanteisiin (Mensa 2013). Äly on myös paljon käytetty etuliite, kun puhutaan erilaisista teknologisista uuden ajan ratkaisuista, kuten älykkäistä järjestelmistä. Älykkyys koneiden tapauksessa on kyvykkyys toimia tilanteissa omatoimisesti eli autonomisesti. Autonomisuuteen voidaan päästä mm. ennalta määritettyjen logiikoiden ja sumeiden logiikoiden avulla, sekä neuroverkkoja, koneoppimista ja ohjattua oppimista hyödyntämällä.

Älykkyys luodaan ohjelmoimalla riittävän monipuoliset ehdot ja käytösmallit, jotta kone osaa toimia itsenäisesti erilaisissa tilanteissa. Koneoppimisella voidaan jatkaa ohjelmoitua logiikkaa esimerkiksi opettamalla konetta toimimaan tilanteissa halutulla tavalla. Ohjattu opettaminen tapahtuu altistamalla kone useita kertoja erilaisiin ja samankaltaisiin tilanteisiin ja kertomalla mitä sen kuuluu missäkin tilanteessa tehdä. Koneoppiminen täydentää loogista käytöstä ja autonomisuutta ilman varsinaista ihmisen tuottamaa ohjelmointityötä.

Teknistä järjestelmän osaa, joka toteuttaa ohjaukset ennalta ohjelmoidusti, kutsutaan logiikkaohjaimeksi. Logiikkaan perustuva ohjaus tulee olemaan hie- man rajoittunut käsite tulevaisuuden tarpeita ajatellen. Tekoälyn kehittymisen myötä, logiikkaohjainten lisäksi tarvitaan tehokasta rinnakkaislaskentaa neuro- verkkojen käsittelyyn. Neuroverkkojen tuloksina saavutetaan tietokoneen luomia tietorakenteita, kuten akateemikko Teuvo Kohosen luoma itseorganisoitua karta (SOM, Self-organizing map). Neuroverkkojen tuloksia arvioimalla, loogi- set päätökset tulevat perustumaan ns. sumeaan logiikkaan, kuten useista syöt- teistä laskettuun normaalijakaumaan ja todennäköisyyksiin. Näin ollen loogiisiin päätöksiin saadaan tekoälyllistä autonomisuutta. Älykkyuden käsitteen käytön perusteluna on hyödynnetty älykkään agentin määritelmää. Älykkään agentin (intelligent agent) määritelmää käytetään tekoälyssä ja koneoppimisessä kuva- maan toimijan älykkyuden tasoja. Älykkään agentin ja sen ympäristönsä välinen vuorovaikutus on kuvattu kuvassa 19. (Sahakangas 2019, 10-18.)



Kuva 19. Toimijoiden ja ympäristöjen välinen vuorovaikutus (Russel & Norvig 2004; Viljanen 2021).

Älykkään agentin määritelmään kuuluu vastaavia osia kuin luvussa 4.6 ASCIE-mallissa, mutta käsitteeseen sisältyy erityisesti viiteen tasoon luokiteltu käyttäytyminen. Käyttäytymismallit olisivat integroitavissa ASCIE-mallin älyyn. Älykkään agentin määritelmä pohjautuu vastaavasti toimijoiden havainnointi- ja toimintakykyjen palautesilmukan mallintamiselle. Russel & Norvig (2004) ovat ryhmitelleet agentit seuraavaan viiteen eri luokkaan perustuen niiden älykkyyteen ja kykyihin (käännös Hyvönen 2004):

- Heijasteagentti (Simple reflex agent)
- Malliperustainen heijasteagentti (Model-based reflex agent)
- Tavoitteellinen agentti (Goal-based agent)
- Hyötyperustainen agentti (Utility-based agent)
- Oppiva agentti (Learning agent)

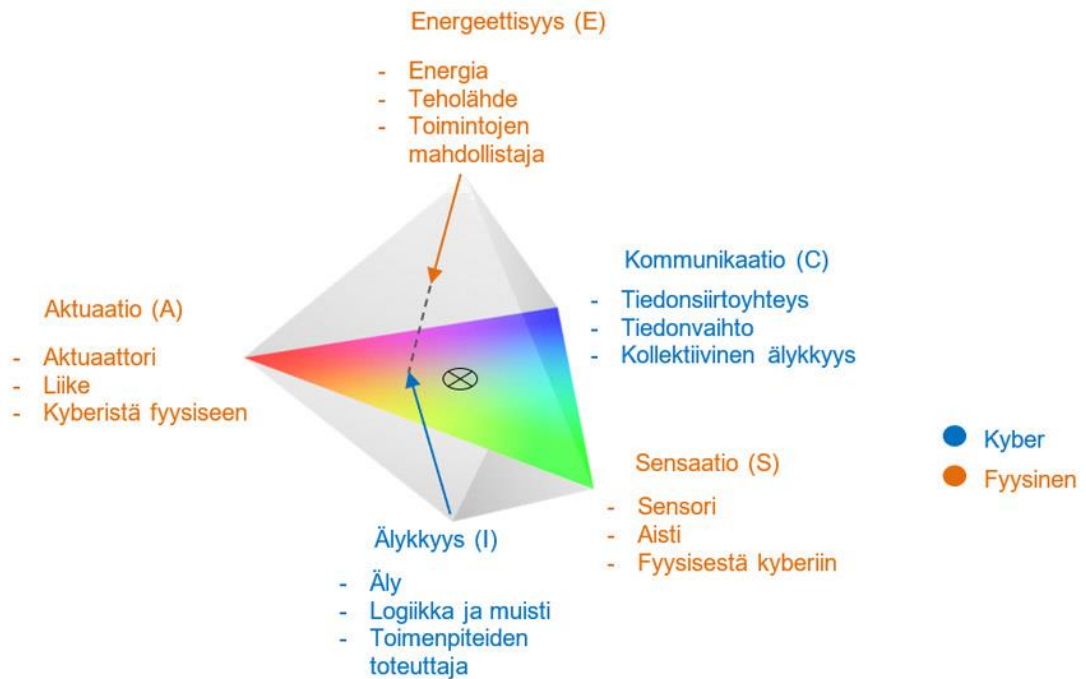
4.6 ASCIE-malli

Kyberfyysisten järjestelmien mallintamisen vuoksi on tässä tutkimuksessa kehitetty malli, joka jakautuu viiteen abstraktiin ominaisuuteen, jotka ovat liike / aktuaatio (A), aistimus / sensaatio (S), kommunikaatio (C), ohjaus / älykkyys (I) ja energeettisyys (E). Nämä ominaisuudet muodostavat tässä tutkimustyössä esitellyn ASCIE-mallin määritelmän. ASCIE on johdettu englannin kielen sanoista actuation, sensation, communication, intelligence ja energeticness. ASCIE-mallin ja sen määritelmän tarkoitus ei ole ainoastaan abstrakti käsite, vaan mahdollistaa mallin käyttö ohjelmoimalla. Periaate vastaa tässä tutkimustyössä perehdyttyihin kybernetiikan perusteisiin, ohjausjärjestelmiin, älykkäisiin agentteihin, kuin toiminnallisiin malliyksiköihin (FMU, Functional mock-up unit), mutta on yksinkertaisempi ja rajatumpi. Viisiosainen jako muodostuu ajatuksesta, joka pohjautuu teoriaan kaikkien tietoteknisten laitteiden riippuvuudesta energiaan, tyypillisesti sähköenergiaan. Kääntäen tämä tarkoittaa sitä, että energian käytön kohdentamisella älykkäästi on järjestelmän toimintojen käytön tehokkuuden näkökulmasta merkitystä. Energian käytön kohdentamisessa keskeinen osakokonaisuus on ohjaimiin ohjelmoitu logiikka eli nk. äly, jolla ohjataan järjestelmän

kaikkia muita teknisiä ominaisuuksia ja myös älyä itseään. Tyypillisesti suurimman osan energiasta kuluttavat aktuaatiota (liikettä tai toimintaa), sensaatiota (aistimusta) ja kommunikaatiota toteuttavat ominaisuudet eli erilaiset muunninlaitteet, mutta myös ohjausälykkyyden taustalla olevat prosessorit ja muistit voivat kuluttaa merkittävän osan tästä. Energian kulutuksen painopiste voi määräytyä hyvin järjestelmäkohtaisesti.

Kaikki kyberfyysisen järjestelmän ja monen muunkin ohjausjärjestelmän keskeiset ominaisuudet ovat luokiteltavissa näihin ASCIE:n viiteen pääkohtaan, jotka ovat esitelty tarkemmin tämän luvun aliluvuissa. Luokittelun tarkempi perustelu on muodostettu kaavioita ja esimerkkejä käyttäen. Kuvassa 20 on esitetty ominaisuudet kolmiulotteisen muodon kautta, jossa ASE muodostavat fyysiset ominaisuudet ja CI muodostavat loogiset kyberominaisuudet. Muoto on käytännössä kaksi tetraedriä vastakkain, joiden väliin ASC kolmio jää tasopinnaksi. Tässä kuvauksen tapauksessa tetraedri on symmetrinen kaikilta tahkoiltaan, mutta jos järjestelmä painottuisi esimerkiksi vahvasti aktuaatio ominaisuuksiin, A kulma voisi olla visuaalisesti kauempana keskipisteestä. Tämä kertoisi katsojalle järjestelmän olevan liikkeen tuottamiseen painottuva. Energian kulutusta kuvataan yläpuolella olevasta E kulmasta ASC kolmion pintaa kohti tulevalla vektorilla, jonka suunta määräytyy sen mukaan mihin ominaisuuksiin energiaa kulutetaan. Älyn käyttö on käytännössä vastakkainen energian kulutuksen kanssa, koska äly on usein energian kulutusta ohjaava tekijä. Kuvaajaa ja sen pääkohtiin jaon periaatetta hyödynnetään tutkimustyön muissa vaiheissa ja visualisoinnissa.

ASCIE-mallin määritelmä pohjaa lähteensä tutkimuksessa aiemmin määriteltymiin käsitteisiin ja on siten hypoteettinen. ASCIE-mallille on myös luotu kokeellinen ohjelma, joka tulkitsee CSV-muotoisen mallin olioksi ja visualisoi ne objekteina karttapohjalle (kts. 4.6.8).



Kuva 20. ASCIE-mallin kuvaus (Viljanen 2020).

4.6.1 Käsitteet ja käsitekaavio

ASCIE-mallin ja sen määritelmän perustelemiseksi, yhtenä tutkimusmenetelmänä on käytetty luokkakaavion ja käsitekaavion yhdistelmää. Kaavion avulla on jäsennetty viisikohtainen kyberfyysiselle järjestelmälle soveltuva määritelmä. Tämä on erikseen jaettu viiteen tasoon, joita tutkimustyössä pyritään käyttämään käsitteistön järjestelmällisyyden säilyttämiseksi ja asian hahmottamisen tukemiseksi.

Ominaisuus. Ominaisuuksista puhuttaessa käytetään muotoja aktuaatio, sensaatio ja kommunikaatio, jotka ovat abstraktiudeltaan hyvin yleistäviä käsitteitä. Esimerkiksi kommunikaatio-ominaisuus.

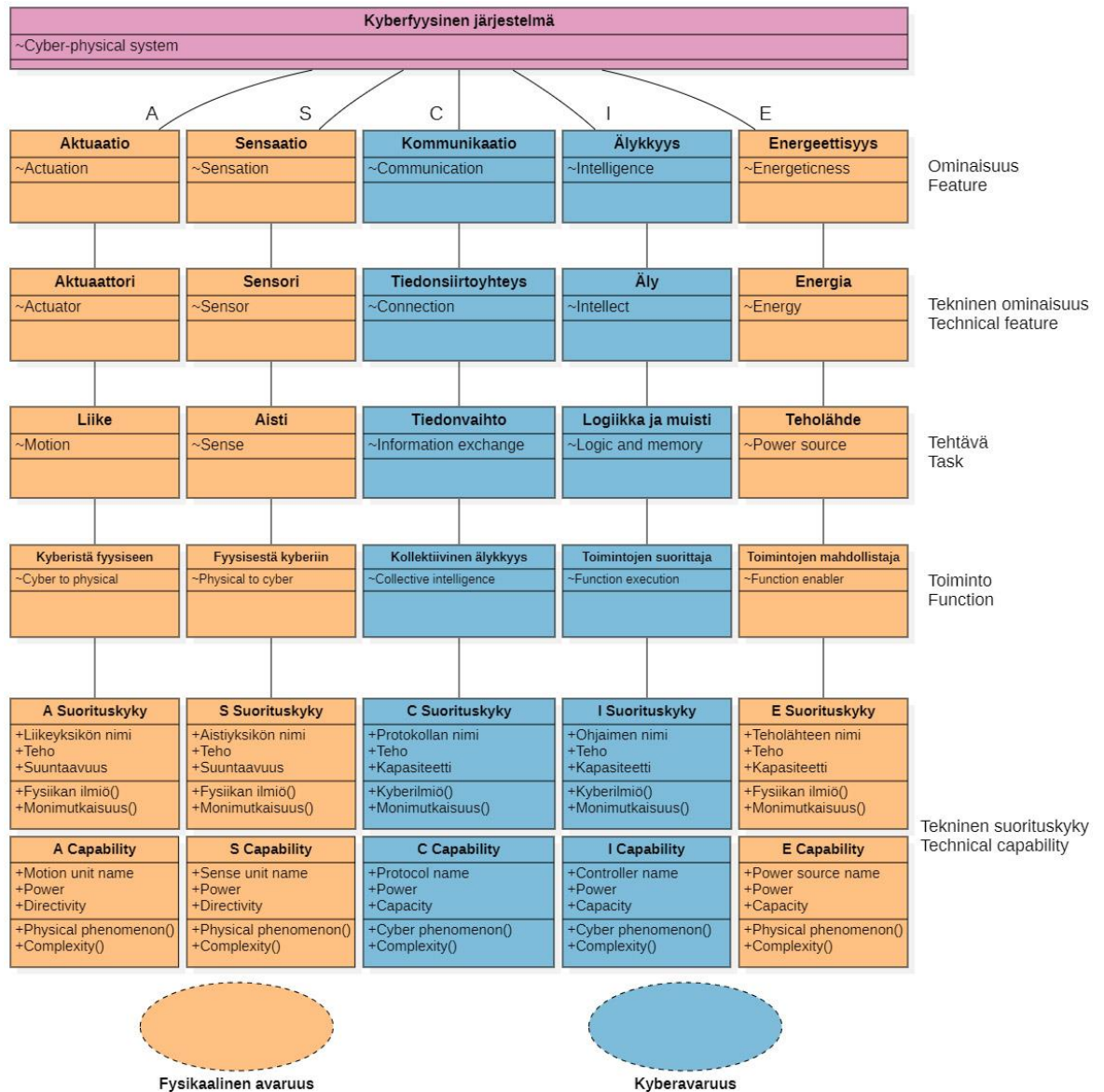
Tekninen ominaisuus. Puhuttaessa teknisistä ominaisuuksista käytetään esimerkiksi yksikössä muotoa sensori ja monikossa sensorit. Tyypillisesti järjestelmissä on useita sensoreita. Tämä luokittelee ominaisuutta konkreettisemmin järjestelmän tietyt osat. Yleisimmin käytetään näitä käsitteitä, kun puhutaan järjestelmän jostain ominaisuudesta.

Tehtävä. Tehtäviksi on kuvattu kunkin teknisen ominaisuuden tehtäviä, kuten aktuaattoreiden tehtävänä on luoda liikettä, sensoreiden aistia ja erilaisten energioiden tehtävänä on toimia teholähteenä.

Toiminto. Toiminto kertoo abstraktilla tasolla, mitä kyseinen ominaisuus tai tekninen toiminnallisuus tuottaa. Kuten aktuaattori tuottaa toiminnon kyberistä fyysiseen, energia tuottaa toimintojen mahdollistamisen ja kommunikaatio tuottaa mahdollisuuden kollektiiviseen älykkyyteen.

Tekninen suorituskyky ja toiminnallisuus. Tekninen suorituskyky vastaa kysymykseen mitä laitteella on tarkoitus saada laajemman kokonaisuuden kannalta aikaiseksi eli kuinka tehokas se on käyttötarkoitukseensa. Tässä määritelmässä abstraktiotaso on jo melko matalalla ja lähellä konkreettisempaa oliomallia, jonka hyödynnettävyys mallintamisessa alkaa olemaan kaivatulla tasolla. Teknisellä toiminnallisuudella tarkoitetaan tässä teknisen suorituskyvyn taustalla olevaa järjestelmän alijärjestelmää yksityiskohtaisesti kuvaavaa osaa. Teknisellä toiminnallisuudella on tiettyjä suorituskykyarvoja.

Kuvassa 21 on avattu näiden em. määritelmien jäsentymistä yhdessä käsittekaaviokuvassa.



Kuva 21. ASCIE-mallin käsitekaavio (Viljanen 2020).

4.6.2 Aktuaattorit (A)

Aktuaattoreiden tehtävänä on toteuttaa järjestelmän ohjauksyksiköiden tuottamien ohjaukskomentojen mukaista toimintaa, kuten liikettä eli nk. aktuaatiota. Ohjauksen komennot voivat tulla järjestelmästä itsestään tai verkon yli. Näin ollen tarkoituksena on muuntaa laskennallisten prosessien ohjauksen komennot fyysikaalisten prosessien osiksi. Tyypillisesti tämä tarkoittaa fyysisistä liikettä tai muu-

tosta. Fyysistä liikettä voidaan toteuttaa esimerkiksi mekaanisesti sähkömoottorin avulla, akustisesti piezo-elementillä tai sähkömagneettisesti antennin avulla. Aktuaattori on itsessään se koko osa laitteesta, joka vastaa kyseisen liikkeen tuottamisesta. Aktuaattoreiden voidaan ajatella olevan järjestelmän fyysiset ulostulot (output).

4.6.3 Sensorit (S)

Sensoreiden tehtävänä on aistia (sensaatio eli aistimus) fyysikaalisia prosesseja laskennallisten prosessien syötteiksi. Sensorit toimivat siis vastavuoroisesti kuin aktuaattorit. Tyypillisesti sensoreiden toiminta tarkoittaa fyysisten ilmiöiden aistimista mittaamalla ja digitoimalla. Mittausta voidaan toteuttaa esimerkiksi olosuhteiden mittauksessa lämpötila-anturein, liikkeen mittauksessa liikesensorein tai ohjauslaitteiden paino- ja säätökytkimillä. Kuvantavat laitteet kuten kamerat ovat myös sensoreita. Kuvantavat laitteet ovat usein ns. matriisisensoreita eli ne rakentuvat useasta pienemmästä sensorista, jolloin aistitieto on luettavissa kuvana. Sensoreiden voidaan ajatella olevan järjestelmän fyysiset sisääntulot (input).

4.6.4 Tiedonsiirtoyhteydet (C)

Tiedonsiirtoyhteyksien tehtävänä on yhdistää järjestelmien laskennalliset prosessit toisiinsa ja luoda näiden välille tiedonvaihtokanava (kommunikaatio). Käytännössä tämä tarkoittaa kaikkea sitä verkossa liikkuvaa tietoa, jota kyseinen kyberfyysinen järjestelmä saa käyttöönsä ja mitä tietoa jakaa ulospäin. Tiedonsiirtoyhteydet toimivat siis kyberfyysisten järjestelmien kollektiivisen älyn mahdollistajina. Tiedonsiirtoyhteyksien fyysisten lähettimien osat ovat tämän mallin mukaisesti luokiteltavissa laitteen aktuaattoreiksi ja vastaanottimet sensoreiksi. Tämä johtuu siitä, että tiedonvaihto kulkee aina jotain fyysistä ilmiötä hyödyntäen, eikä keskinäisvaikutuksilta esimerkiksi samoja taajuuksia käyttävien järjestelmien välillä voida välttyä. Tiedonsiirtoyhteyksien voidaan ajatella olevan järjestelmän loogisiin kyberominaisuuksiin viittaavia käytänteitä.

4.6.5 Ohjaukset / Älyt (I)

Älyn muodostavien logiikoiden ja muistien tehtävänä on määrittää tavoitteet, miten järjestelmän tulisi toimia milloinkin ja ohjata järjestelmän toimintaa (älykkyys). Älyllä ei tarkoiteta tässä tapauksessa esimerkiksi ihmisälyä vaan koneelle ohjelmoituja loogisia ketjuja. Logiikoilla tarkoitetaan järjestelmään ohjelmoituja algoritmeja, jotka voivat olla toimintaan vaikuttavia ehtoja, tiedon tallennusta tai laskennallisia prosesseja. Monimutkaiset logiikat vaativat laskentatehoa ja muistikapasiteettia. Pidemmälle vietyä ja tavoitteisiin perustuvaa logiikkaohjelmointia voidaan kutsua tekoälyksi. Tekoälyyn voidaan liittää myös koneoppiminen esim. neuroverkkojen muodossa, jolloin laskennalliset suorituskykyvaatimukset kasvavat merkittävästi. Logiikkaohjaimiin sisällytyt prosessorit toimivat järjestelmien älyllisten toimenpiteiden toteuttajina ja rajapintana kaikille ASCIEmallin mukaisille osille. Ideaalitulanteessa älykkyydellä kyetään ohjaamaan koko järjestelmän energian kulutusta. Silloin järjestelmän toiminnan tehokkuutta voidaan optimoida loogisesti. Älyn käsitteen käyttöä logiikan sijaan, rinnalla tai laajennettuna logiikkana ja ohjauksen ohessa voidaan perustella tekoälyn ja autonomisuuden yleistymisellä, kuten luvussa 4.5 Älykäs agentti.

4.6.6 Energiat (E)

Energioiden tehtävänä on ylläpitää järjestelmän toimintoja yllä eli toimia teholähteenä (energeettisyys). Teholähteellä voidaan tarkoittaa esimerkiksi ladattuja akkuja tai valtakunnallista sähköverkkoa tai muuta keinoa tuottaa järjestelmän kuluttamaa energiaa, joka tyypillisesti on sähköä. Ekologisuuden ja aurin-
gon valon ehtymättömyyden puolesta suosittuja ratkaisuja nykyään ovat aurinkopaneelit. Teholähteet toimivat järjestelmän kaikkien toimintojen mahdollistajana. Mikäli energia järjestelmästä loppuu, se tyypillisesti sammuu ja hävittää väliaikaisen muistijälkensä. Usein järjestelmä on kuitenkin uudelleen käynnistettävissä, kun riittävät energiatasot saavutetaan uudelleen.

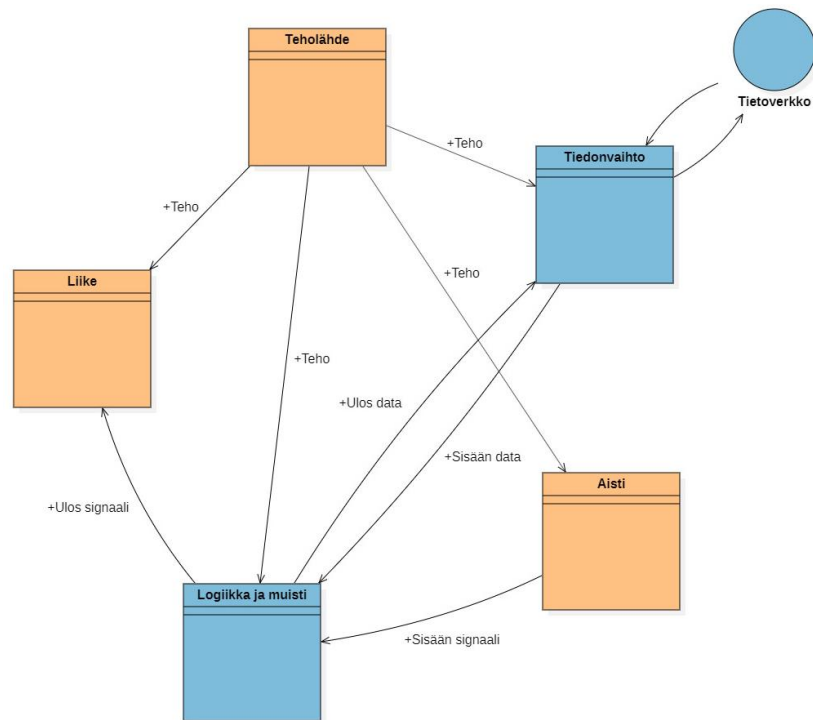
4.6.7 Järjestelmien sovittaminen ASCIE-malliin

ASCIE-mallin konkretisoimisen vuoksi on seuraavissa esimerkeissä sovitettu muutamien kuvitteellisten järjestelmien ominaisuudet kyseiseen malliin. Taulukossa 4 on kuvattu muutama erilainen järjestelmä mallin mukaisesti. Lähtökohteisesti kaikkiin teknisiin ominaisuuksiin tulisi löytyä vähintään yksi nimetty suorituskyky, jotta järjestelmää voi kutsua edes välttävästi kyberfyysiseksi järjestelmäksi. Suorituskykyjen luokittelun ajatukseen pääsee nopeasti kiinni sisäistämällä käsitteet ja rajapinnat.

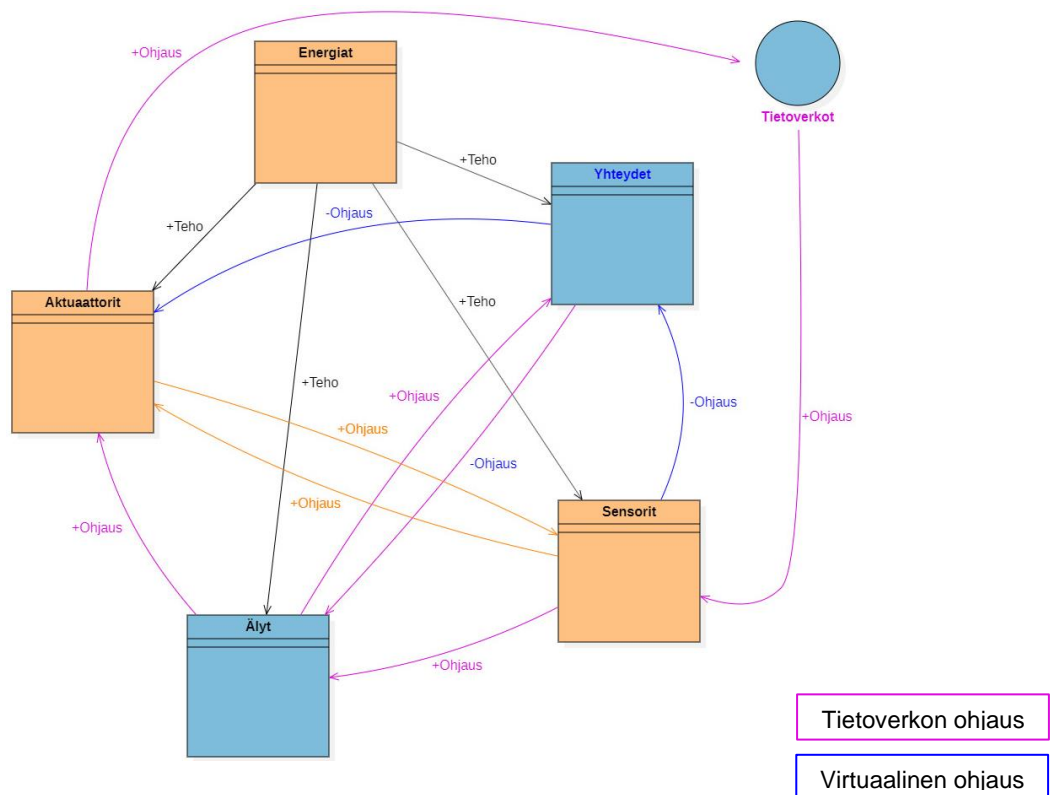
Huomioitavaa on erityisesti tiedonsiirtoyhteyksien muodostamisen kannalta keskeiset fyysiset lähetin ja vastaanotin elementit, jotka ovat itseasiassa teknisiltä ominaisuuksiltaan luokiteltavissa aktuaattoreiksi ja sensoreiksi. Tämä johtuu luonnollisesti fysiikasta ja avaa mahdollisuuksia nk. multi domain laskennoille.

Taulukko 4. Esimerkki kolmen kuvitteellisen järjestelmän sovittamisesta ASCIE-malliin.

Järjestelmä	Tekniset ominaisuudet				
	Aktuaattorit	Sensorit	Tiedonsiirtoyhteydet	Ohjaukset/Älyt	Energiat
Älypuhelin	GSM lähetin 5G lähetin WLAN lähetin Bluetooth lähetin RFID lähetin Näyttö Kaiutin Värinä	GSM vast. 5G vast. WLAN vast. Bluetooth va. RFID vast. Kosketus Mikrofoni Liikesensori	GSM yhteys 5G yhteys WLAN yhteys Bluetooth yhteys RFID luenta	Proessori Muistit Android Sovellukset	Akku+
Autonominen auto	4G lähetin LTE-M lähetin Sähkömoottori Ohjausjärjest. Jarrut Näyttö Automaattiovet	4G vast. LTE-M vast GPS vast. Hätäohjaus Nopeusanturi Kosketus Kamerat	4G yhteys LTE-M yhteys GPS yhteys	Proessorit Muistit Autonomisen ajoneuvon ohjelmistot	Akku+
IoT-laite		Lämpötila-sensori Kosteussensori	Zigbee	Ohjauspiiri Ohjelmointi	Paristo+



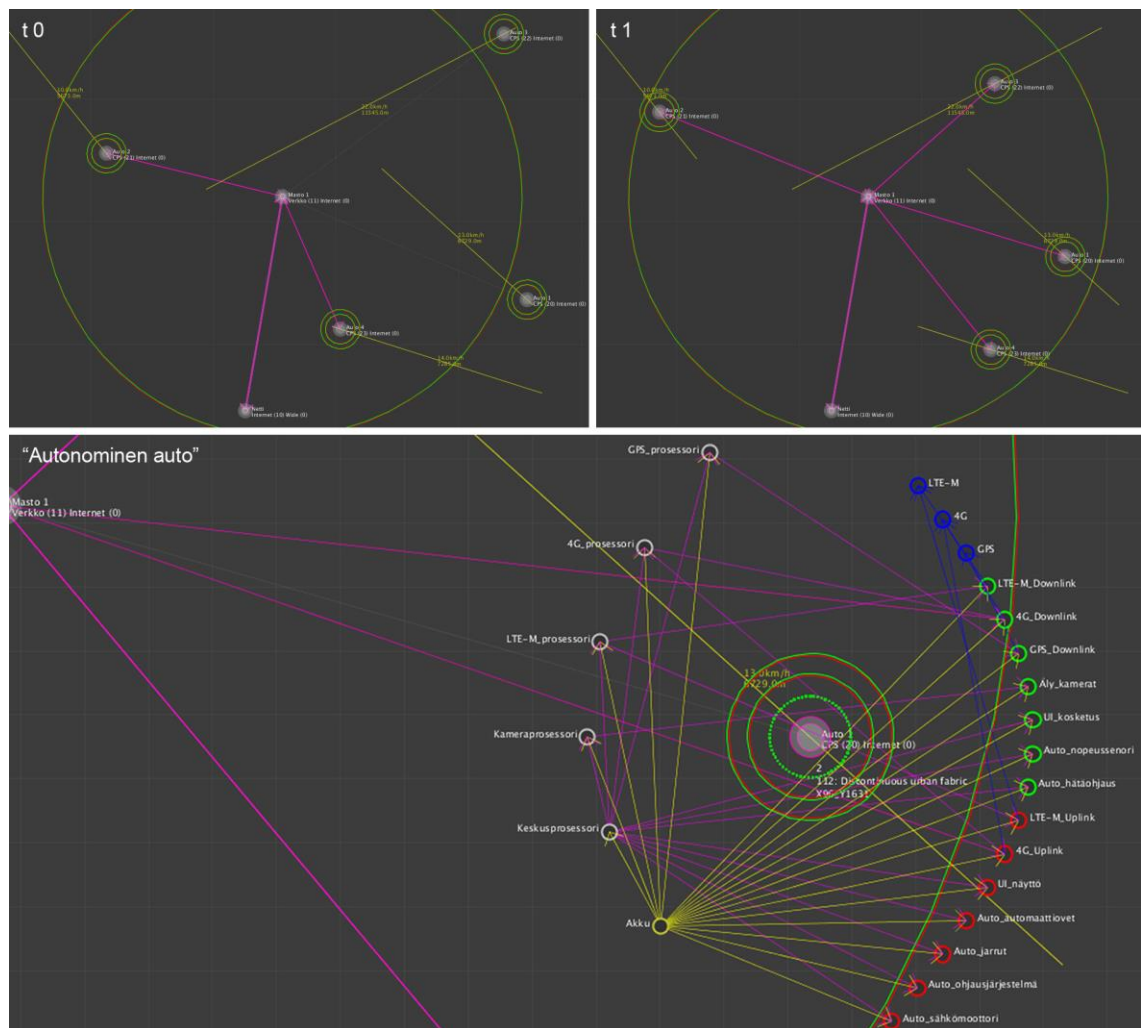
Kuva 22. Käsitteellinen kuvaus ASCIE-mallista tehtävineen (Viljanen 2020).



Kuva 23. Käsitteellinen kuvaus ASCIE-mallin teknisistä ominaisuuksista (Viljanen 2020).

4.6.8 ASCIE-mallin käytännön esimerkki

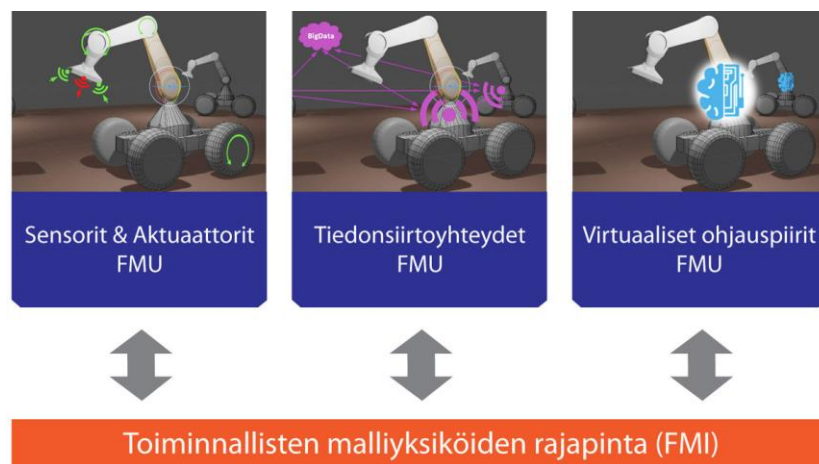
ASCIE-mallille on toteutettu spatiaalinen visualisointiohjelma käyttäen Java-ohjelmointia. Kuvakollaasissa 24 nähdään neljä taulukon 4 ”Autonominen auto” mukaisesti luotua objektiä, sekä näille yhteinen 4G-tukiasemaobjekti. Isompi ympyrä kuvaa 4G-tukiaseman kantamaa. Autot ovat animoitu liikkumaan keltaisia viivoja pitkin. Liikkumiseen perustuvat muutokset pinkeissä yhteyslinkeissä esitettyinä ajanhetkillä t0 ja t1. Järjestelmän toiminnalliset osat ovat avattuna kuvan alimmassa osassa. Yhteyslinkit muodostuvat automaattisesti mallien rakenteiden ja parametriarvojen mukaisesti. ASCIE-mallin voidaan todeta olevan hyödynnettävissä vähintään verkkojen kuvaamiseen. Ohjelmaa jatkokehittämällä, käyttökelpoisen analysoitavan datan tuottaminen voisi olla mahdollista.



Kuva 24. ASCIE-mallin visualisointi käytännössä (Viljanen 2021).

4.7 Standardien mukaiset vaihtoehdot ASCIE-mallille

Kyberfyysisten järjestelmien mallintamiseen ja ASCIE-mallille vaihtoehtoisena ratkaisuna olisi mahdollista hyödyntää jotain jo olemassa olevaa dynamiikan simulointiin kehitettyä alustaa. Esimerkiksi Modelica on varsin yleisesti käytetty järjestelmien mallintamisen ohjelmointikieli, jolla voidaan kuvata ja simuloida kokonaisia tuotantolaitoksia tai koneiden osien toimintoja. Tuottoa tekemätön Modelica yhdistys on jo vuodesta 1996 kehittänyt avoimia standardeja ja avoimen lähdekoodin ohjelmistoja kyberfyysisten järjestelmien mallintamiseksi. Modelican päälle on myös kehitetty useita erilaisia ohjelmistoja. Samainen yhdistys on kehittänyt Modelican tueksi toiminnallisen mallirajapinnan (FMI, Functional mock-up interface), järjestelmän rakenteen ja parametrisoinnin (SSP, System structure and parametrization) ja hajautetun simulointiprotokollan (DCP, Distributed co-simulation protocol). Alusta on varsin laajasti käytetty myös suurten yritysten parissa. Kyseinen alusta tarjoaa kattavan määrän erilaisia tapoja kuvata sensoreita ja aktuaattoreita, sekä kaikkia muita ohjausjärjestelmien ja kyberfyysisten järjestelmien edellyttämiä komponentteja. Modelicalla rakennetut mallit ovat suoraan vietävissä tai muunnettavissa yhteensopiviksi ohjelmasta toiseen. Esimerkiksi toiminnallinen malli voidaan viedä Modelicasta MATLAB:n Simulinkiin. Mallien sovittaminen laajan mittakaavan simulointiin, jossa useat eri järjestelmät vuorovaikuttavat keskenään edellyttäisi vahvaa perehtymistä Modelica ympäristöön ja sen käyttöön. (Modelica 2021.)



Kuva 25. FMU:n ja FMI:n toimintaperiaate (Siemens 2019; Viljanen 2021).

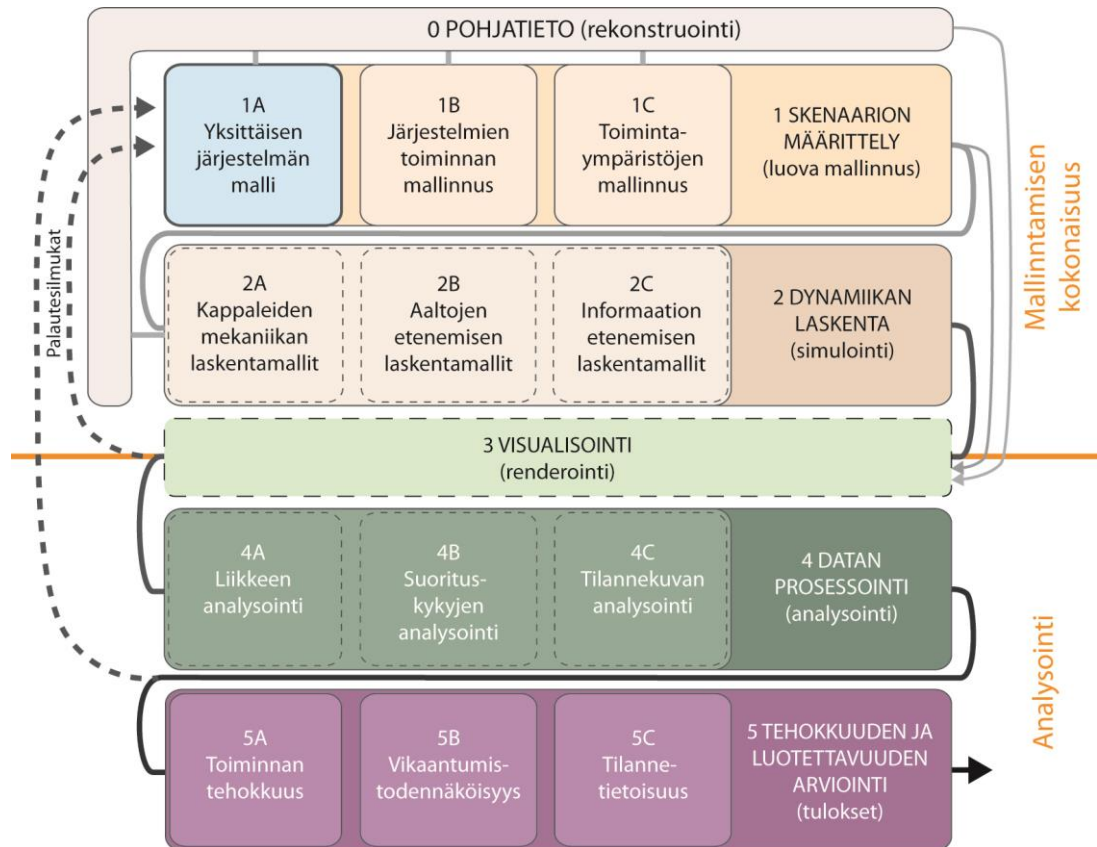
Toinen Modelicaa vastaava ympäristö on ohjelma nimeltä 20-sim, joka myös tarjoaa alustan toiminnallisten mallien rakentamiselle, simuloimiselle ja analysoinnille. 20-sim mallit perustuvat graafisiin malleihin ja laskennallisiin malleihin. Laskennallisten mallien luomisessa käytetään C-kielen kaltaista SIDOPS++ kieltä, jolla kuvataan järjestelmämallien osien toimintoja. 20-sim ohjelma tarjoaa mahdollisuuksia myös integroida simulaatioita Unity-pelimoottoriin, joka on virtuaalitodellisuuden (VR) sovellusten näkökulmasta kiinnostava ominaisuus. (20-sim 2021.)

Modelican FMU:n lisäksi mielenkiintoinen standardi on IEEE 1516-2010 HLA:n mukaiset FOM-mallit (Federation Object Model). HLA vastaa Modelica standardia periaatteeltaan itseasiassa yllättävän paljon. FMI:tä vastaavaa rajapintaa kutsutaan RTI:ksi (Run-time Infrastructure). HLA:n ajatuksena on tarjota standardoitu kyky yhdistää erilaisia simulaattoreita toimimaan yhteen. HLA on alun perin 90 luvulla kehitetty useiden sotilaskäyttöön tehtyjen hajautettujen simulaattoreiden yhdistämistä varten Yhdysvalloissa (US DoD) ja myöhemmin siitä on tullut NATO STANAG (4603) mukainen standardi. Linköpingin yliopistossa tehdyn tutkimuksen perusteella FMU ja FOM -malleja kyetään hyödyntämään HLA:n kautta samoissa simulaatioissa. Ainoana haasteena on kerrottu simulaatioiden laskennallisen ajan hallinta, joka ei ole HLA:n kannalta samalla tavalla välttämättömyys kuin FMU-mallien kanssa. Tähän haasteeseen voi kuitenkin olla olemassa useampia ratkaisuja. (Sievert 2016, 1-10, 41; IEEE 2010.)

Järjestelmää tarkasti kuvaavan toiminnallisen mallin hyödyntäminen laajemmassa laskennassa veisi mallintamisen tarkkuuden huomattavasti pidemmälle, kuin pelkistetty ASCIE-malli. Toisaalta ASCIE-malli, siitä jatkettu tai muu sen kaltainen malli voisi soveltua paremmin joustavampaan, kevyempään ja likiarvoisempaan mallintamiseen kuin toiminnallinen malli. Kevennetyille mallille voisi olla konseptien arvioinnin ja suorituskykyjen mallintamisen näkökulmasta kysyntää. Kokeellisen ohjelmointiharjoituksen perusteella ASCIE-mallin pohjalta on kyetty visualisoimaan kyberfyysisen järjestelmän ominaisuuksia karttapohjalla.

5 Kyberfyysisten järjestelmien dynamiikan mallintaminen

5.1 Mallintamisen prosessin kuvaus



Kuva 26. Dynamiikan mallintamisen prosessi (Viljanen 2021).

Järjestelmien rakenteen ja käyttäytymisen mallintamiseen on olemassa erilaisia menetelmiä vuosikymmenien ajalta ja uusia kehitetään jatkuvasti. Ensisijaisen tärkeää on tiedostaa jo keksityt ja yleisesti käytetyt menetelmät, sillä niihin kätkeytyy useiden tutkijoiden ja kehittäjien pitkällisen työn tulos. Olemassa olevat menetelmät, sekä niitä hyödyntävät ohjelmat voivat ratkaista jo nyt useimmat mallinnustarpeet tai ne voivat olla hyvin jatkojalostettavissa entistä pidemmälle. Tärkeää on myös kehittää uusia menetelmiä ennakkoluulottomasti ja uusina ajatuksin. Kyberfyysisten järjestelmien dynamiikan mallintamisen kontekstissa on selvitetty kattaus erilaisia menetelmiä ja ohjelmia, joilla voidaan toteuttaa yksittäisten järjestelmien mallintamista ja usean järjestelmän, sekä ympäristöjen vä-

listen vuorovaikutusten mallintamista. Tähän haasteeseen on kehitelty dynamiikan mallintamisen prosessi, joka perustuu kattavasti erilaisten mallien käyttöön, sekä teoreettiselta pohjaltaan jatkuvan ajan simulaatioiden (eng. continuous time simulation), kuin myös diskreettien tapahtumien simulaatioiden (eng. discrete event simulation) periaatteisiin (Pritchett ym. 2000, 1133).

Tietokonepelit ja koulutussimulaattorit ovat tyypillisesti jatkuvan ajan simulaatioita, joissa aika etenee jatkuvana hetkestä toiseen esimerkiksi reaaliaikaiseen kelloon sidonnaisena tai ajan nopeutta säädeltynä. Jatkuvan ajan simulaatioiden mahdollisuutena on kyberfyysisten prosessien tarkka mallintaminen, mutta niistä muodostuu helposti laskennallisesti raskaita. Useimmat kompleksiset simulaatiot perustuvatkin stokastisiin diskreettien tapahtumien simulointeihin, sillä niillä saavutetaan laskennallisesti optimaalisempia ratkaisuja ainoastaan jostain tietystä hetkestä. Jatkuvan ajan ja diskreettien tapahtumien simulaatioita voidaan sekoittaa yhteen prosessiin, jolloin saavutetaan kokonaisuuden laskennan kannalta optimaalisin ratkaisu. Simulaatioiden välinen ajallinen synkronointi on useaan ohjelmaan hajautetuissa simulaatioissa hyvin keskeinen vaatimus, jotta vuorovaikutteiset ilmiöt kyetään laskemaan oikein. Puhutaan esimerkiksi asynkronisten simulaatioiden uudelleen synkronoinnista, jossa aikavälitykset interpoloidaan samaan tahtiin esimerkiksi sekunnin välisiksi. Ajallisella tarkkuudella on myös simulaation lopputuloksen laadun kannalta olennainen merkitys. Dynamiikan mallintamisen prosessi on laadittu ajatuksellisesti olevan pääasiassa jatkuvan ajan simulaatioon perustuvaksi, mutta monelta osin myös diskreetteihin tapahtumiin perustuvaa simulointia voidaan eri simulointivaiheissa hyödyntää. Ajallisuutta ei ole huomioitu prosessikuvauksen vaiheissa, sillä eri vaiheisiin on todellisuudessa useita eri ratkaisuja, jotka voivat olla käyttötapauksesta riippuen jatkuvia tai diskreettejä. (Pritchett ym. 2000, 1132-1140; Molfino ym. 2008, 5; Bruegge 2006.)

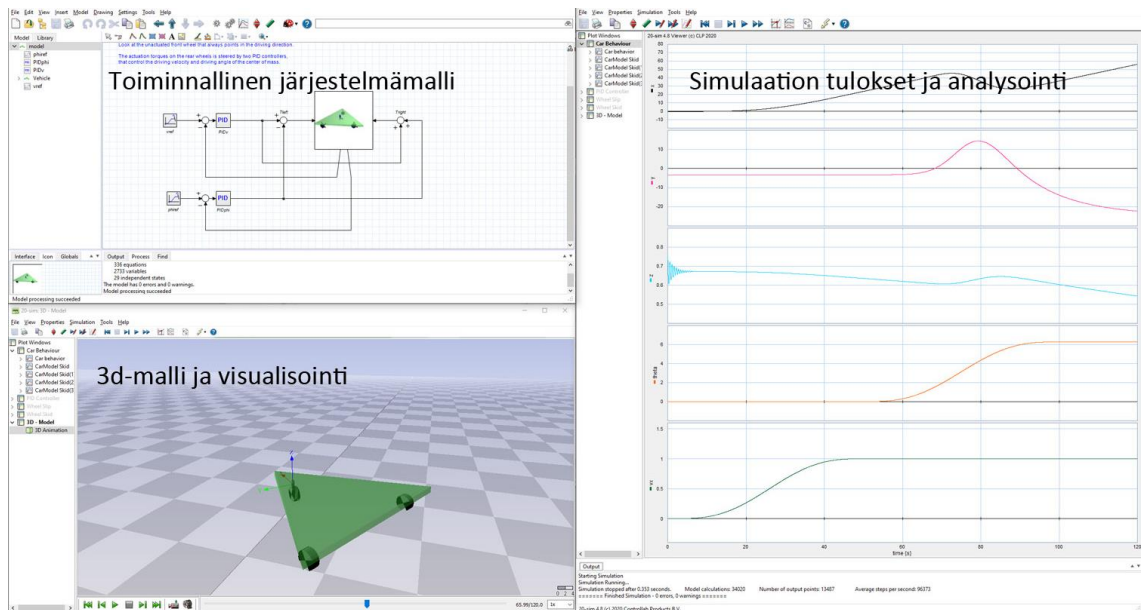
Mallintamisen prosessin pohjatiedon keruuta ei esitellä tässä luvussa, vaan esimerkki löytyy luvusta 3, jossa kerätty data on jatkuvaan aikaan perustuvaa pohjatietoa. Pohjatietoa voidaan hyödyntää prosessikuvauksen kaikissa mallintami-

sen kokonaisuuden vaiheissa, sekä vertailuarvoina analysoinnissa. Reaaliaikaisen pohjatiedon avulla olisi mahdollista kytkeä myös jokin fyysinen järjestelmä kiinni simulaatioon järjestelmän testaamiseksi hardware-in-the-loop -periaatteella (HWIL). Prosessin tarkoituksena on kuvata eräänlainen kyberfyysisten järjestelmien dynamiikan mallintamisen konsepti, jonka perusteella voidaan arvioida eri vaiheiden toteuttamiseen soveltuvia ohjelmia, ohjelmia, joilla voidaan toteuttaa useampia vaiheita tai millainen ohjelman tulisi olla tai määrittää työnjollisia vaiheita. Prosessi on kirjoittajan oma näkökulma ja hypoteettinen ratkaisu, joka perustuu tutkimuksessa kerättyyn pohjatietoon, määritelmiin ja kokemukseen. Dynamiikan mallintamisen prosessi tukeutuu luvussa 2 kuvattuun mallintamisen kokonaisuuden määritelmään ja myös siellä käytettyihin lähteisiin, kuin myös luvun 1 tutkimuksen määritelmissä oleviin lähteisiin. Analysointiosuus pohjautuu luvussa 3 toteutetun tukiasemista kerätyn datan analysointiin. Mallien luominen perustuu luvussa 4 tutkittuun kyberfyysisten järjestelmien mallintamiseen.

Dynamiikan mallintamisen prosessilla pyritään käytännössä kuvan 26 prosessin lopussa olevien analysoitujen tuotteiden ja arvioiden toteuttamiseen. Analyysin tavoitteena on saavuttaa ymmärrys, miten jokin osakokonaisuuden tai ympäristön muutos vaikuttaa järjestelmiin ja järjestelmien järjestelmiin. Analyysin tulisi tukea tulosten raportoinnissa kirjallisen arvion ja suositusten tuottamisessa.

5.2 Käyttöön soveltuvia ohjelmia

Kuvassa 27 näkyvä kuvakaappaus on ohjelmasta 20-sim, joka on tunnistettu yhdeksi dynamiikan mallintamiseen soveltuvista ohjelmista ja kuvaa käyttöön soveltuvien ohjelmien toimintaperiaatteita. Kyseisen ohjelman testiversio on ladattu, jonka mukana tulleesta skenaariosta kuvakaappaus on otettu. Kuvassa oleva kolmion muotoinen 3d-objekti kuvaa autoa ja sille luotua toiminnallista järjestelmämallia. Valmiin skenaarion pohjalta on ajettu simulaatio, joka tuotti kuvan oikealla olevat kuvaajina nähtävät tulokset.



Kuva 27. Kuvakaappaus 20-sim ohjelmasta (20-sim 2021; Viljanen 2021).

Alla olevassa taulukossa on listattu joitain mahdollisesti hyödyllisiksi tunnistettuja ohjelmia, joilla voisi olla sovellettavuutta kyberfysisten järjestelmien dynamiikan mallintamisessa. Osittain ohjelmien soveltuvuudet ovat arvioita, sillä kaikkien osalta ei ole käytännön kokemusta tai niitä ei ole erikseen tässä tutkimuksessa testattu. Monista ohjelmista on laajaa tai edes vähäistä käytännön kokemusta. Dynamiikan simulointiin liittyviä ohjelmia on löydetty useita eri lähteitä tutkimalla. Useimpien ohjelmien syvälinen opettelu on varsin työlästä ja edellyttää paljon pohjatietoa. Sovellettavissa olevat ohjelmat esitetään mallintamisen prosessin vaiheiden kuvauksissa (asteikolla 1 vähäinen – 3 hyvä), sekä luvussa 5.9 on koostettu arvioihin perustuva hyödynnettävyyssmatriisi.

Taulukko 5. Käyttöön soveltuvia ohjelmia ja niiden keskeiset käyttökohteet.

Ohjelma	Käyttökohde
StarUML	UML-kaaviot
Modelio + sysML & MBSE	UML-kaaviot
Microsoft Visio	UML-kaaviot
Microsoft Excel	Taulukoiden luonti, analysointi ja esitys
Google Sheets	Taulukoiden luonti, analysointi ja esitys
PostgreSQL	Relaatiotietokanta-alusta

SQLite	Relaatiotietokanta-alusta
Blender 3D	3d-mallinnus- ja visualisointiohjelma
3dsMax	3d-mallinnus- ja visualisointiohjelma
SolidWorks	CAD-ohjelma + FEM simulaatioita
Autodesk Inventor + EMS	CAD-ohjelma + EM simulointi
OpenFOAM + Visual CFD	CFD-laskenta
Unity	Pelimoottori
QGIS	Paikkatieto-ohjelma
ArcGIS	Paikkatieto-ohjelma
Python	Olio-ohjelmointikieli
Java	Olio-ohjelmointikieli
C++	Olio-ohjelmointikieli
Modelica (FMI, SSP, DCP)	Järjestelmämallien ohjelmointikieli
SPLAT!	EM mallinnus ja simulointi (Longley-Rice)
Altair Feko	EM mallinnus ja simulointi
ns-2 & ns-3	Verkkosimulaattori
OMNeT++, SIMUlte, Veins, RINAsim	Verkkosimulaattori
QualNet + EXata + Cyber	Verkkosimulaattori
OpenModelica	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)
Dymola	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)
SimulationX	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)
Wolfram SystemModeler	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)
MATLAB + Simulink ja muut toolboxit	Dynamiikan simulointi ja analysointi
ANSYS + HFSS ja muut lisäosat	Dynamiikan simulointi ja analysointi
20-sim	Dynamiikan simulointi ja analysointi
FlexSim	Dynamiikan simulointi ja analysointi
R	Data-analyysit
SAS	Data-analyysit

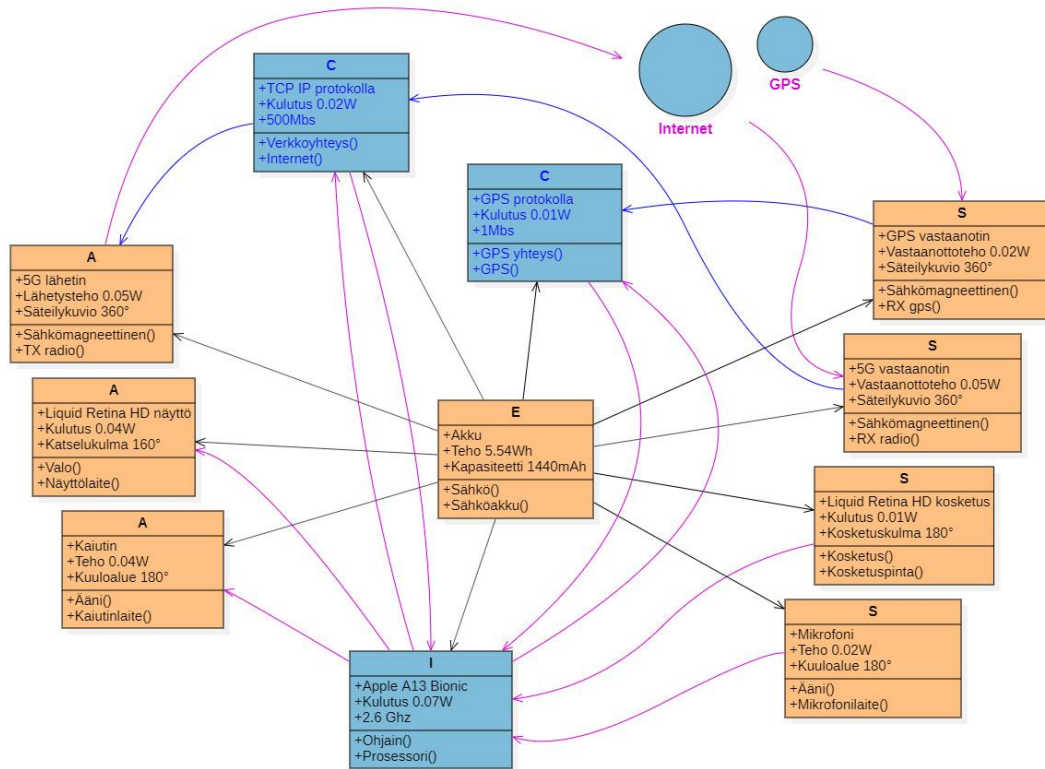
5.3 Yksittäisen järjestelmän mallintaminen (1A)

Järjestelmien dynamiikan mallintamisen ensimmäisessä vaiheessa olennaista on toteuttaa yksittäisten järjestelmien mallit käyttäen erilaisia mallinnusmenetelmiä. Esimerkiksi UML-mallinnusta ja ohjelmoinnillista oliomallinnusta. Luvun 4.6 ASCIE-malli on yksi hypoteettinen hahmotelma tällaisesta yksinkertaistetusta strukturoidusta mallista ja mitä mallin tulisi mahdollisesti sisältää. Näiden lisäksi

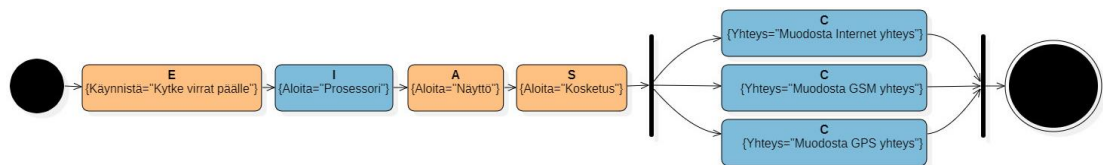
voidaan luoda 3d-malleja, joilla saavutetaan järjestelmän osien konkreettista visualisointia ja mekaniikan mallintamista. 3d-mallien avulla järjestelmän eri osille tulee myös fyysisiä mittoja. Järjestelmämallien lisäksi on erilaisia rajapintoja, jonka avulla ne saadaan liitettyä osaksi isompaa simulaatiota.

5.3.1 UML-mallinnus (Unified Modeling Language)

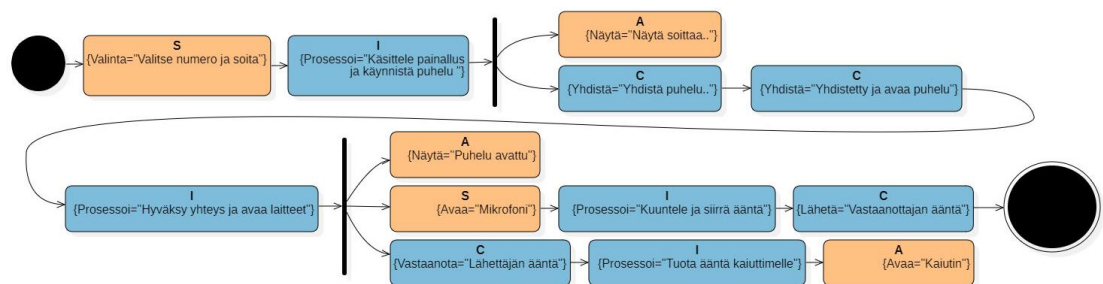
UML-kaavioiden avulla voidaan mallintaa ja visualisoida järjestelmän rakennetta, käyttäytymistä tai vuorovaikutusta loogisesti ymmärrettävään muotoon. UML-kaaviot sisältävät useampia erilaisia kaaviotyyppien alatyyppejä, kuten rakennekaavioiksi luokiteltavat luokka- ja oliokaaviot. UML lyhenne tulee sanoista Unified Modeling Language eli suoraan käännettynä yhtenäinen mallinnuskieli. Hyödyntäessä UML-kaavioita yksittäisen järjestelmän laskennallisen mallin luomiseen, on mahdollista mallintaa järjestelmä käyttäen oliokaaviota. Oliokaavion muotoon mallinnettu järjestelmä kyetään rakentamaan myöhemmin vastaavasti olio-ohjelmointikielellä tai mahdollisesti muuntamaan UML-kaavio suoraan ohjelmakoodiksi. UML-kaaviot ovat hyvä keino tuottaa kuvauksia järjestelmistä tai prosesseista. UML-kaavioiden vuorovaikutus- ja tilakaaviot soveltuvat dynaamisten mallien kuvaamiseen (Bruegge 2006, 4).



Kuva 28. Havainnekuva älypuhelimien laitteista käyttäen luokkakaaviota (Viljanen 2020).



Kuva 29. Yksinkertainen aktiveettikaavio (Viljanen 2020).



Kuva 30. Aktiveettikaavio älypuhelimien soiton aloittamisesta ja yhdistämisestä (Viljanen 2020).

Taulukko 6. Ohjelmien soveltuvuus UML-mallinnukseen.

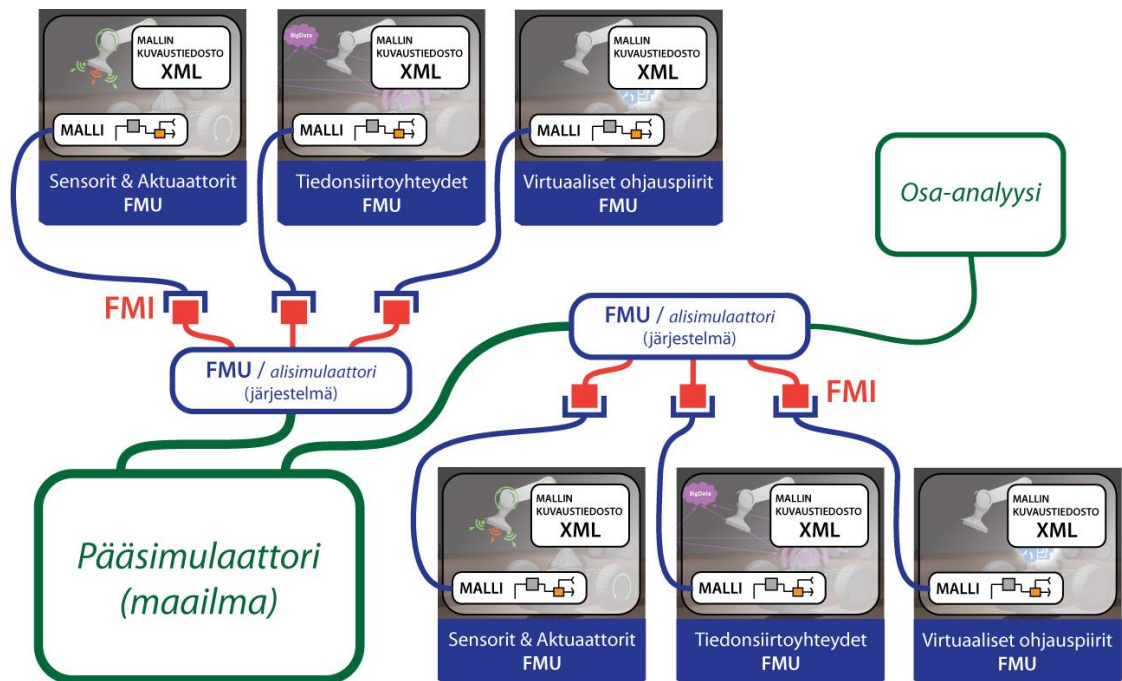
Ohjelma	Käyttökohde	Soveltuvuus
StarUML	UML-kaaviot	3
Modelio + sysML & MBSE	UML-kaaviot	3
Microsoft Visio	UML-kaaviot	3

5.3.2 Oliomallit ja toiminnalliset malliyksiköt (FMU)

Oliomalli on vapaasti määritettävissä oleva tietorakenne, jolla määritetään järjestelmää tai muuta asiaa kuvaavat attribuutit ja funktiot. Oliomallin tietorakenteen avulla kyetään luomaan yksi tai useampi varsinainen toimija, jonka avulla toimija voi säilyttää tilatietonsa ja toimia vuorovaikutteisesti osana isompaa laskennallista kokonaisuutta. Oliomallin luomisessa voidaan hyödyntää UML-kaavioita, mutta varsinaisten oliomallien luomiseen käytetään olio-ohjelmointikieliä. Järjestelmää kuvaavan oliomallin luomiseksi pitää olla hyvä käsitys kaikista niistä rajapinnoista, joilla oliomalli halutaan liittää osaksi laskennallisia prosesseja. Oliomalli voidaan luoda välillisesti myös CSV tiedoston tai SQL tietokannan avulla, mikäli ohjelma kykenee kyseisiä tietolähteitä niin tulkitsemaan.

Järjestelmän toiminnallisuuksia kuvaavien mallien luomiseen on olemassa esimerkiksi oliopohjainen ohjelmointikieli nimeltä Modelica. Modelican avulla voidaan luoda nk. FMU-malleja (Functional Mock-up Unit) eli toiminnallisia malliyksiköitä. Modelica on muodostunut eräänlaiseksi standardiksi, jonka etuna saavutetaan järjestelmämallien suunnittelu, jakaminen ja hyödyntäminen erilaisissa simulaattoreissa ja analyyseissä. Toiminnalliset malliyksiköt eroavat tavanomaisista oliomalleista siten, että ne perustuvat kyseisen standardin sisältämiin vakiorakenteisiin ja ohjelmointisyntakseihin. Toiminnallisten FMU-mallien etuna on valmis FMI (Functional Mock-up Interface) rajapinta, jota käyttävät useat dynamiikan simulointiin tarkoitetut ohjelmat. Huonona puolena FMU-mallit voivat olla turhankin monimutkainen tapa kuvata järjestelmää joihinkin käyttötapauksiin. Toiminnallisten malliyksiköiden pääasiallinen käyttökohde on yksittäisten järjestelmien yksityiskohtaisessa suunnittelussa ja testaamisessa. Toiminnallista malliysikköä ja siihen liittyviä rajapintoja voidaan hyödyntää myös digitaalisten

kaksosten toteuttamiseksi ja mahdollisesti hieman rajoittuneesti HLA-rajapinnan kanssa. (Sievert 2016, 1-10.)



Kuva 31. FMU malli ja FMI rajapinta simulaattoriin (EcosimPro 2018; Viljanen 2021).

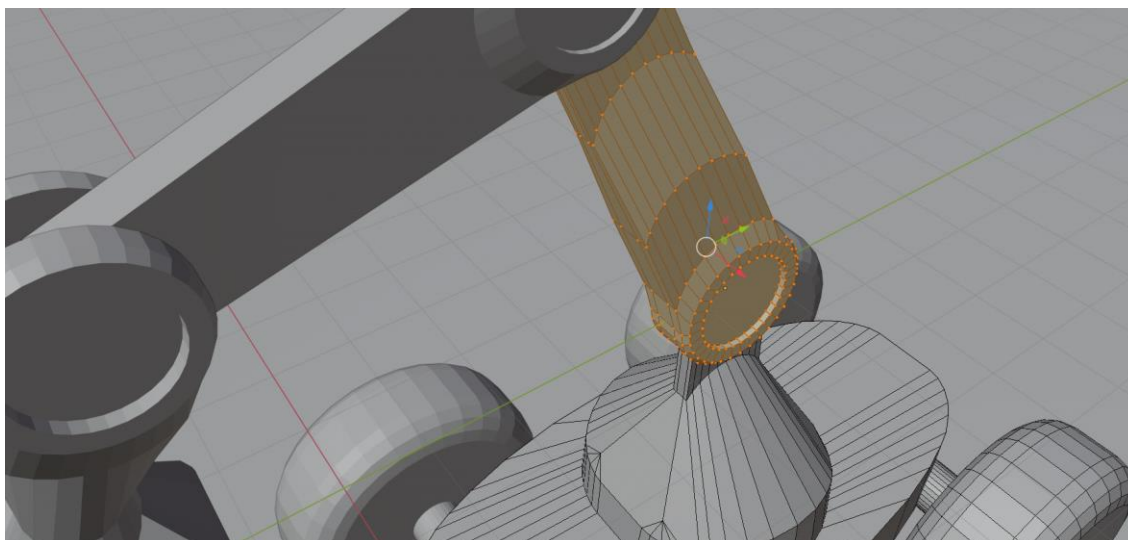
Taulukko 7. Ohjelmien soveltuvuus oliomallien ja toiminnallisten mallien luomiseen.

Ohjelma	Käyttökohde	Soveltuvuus
StarUML	UML-kaaviot	2
Modelio + sysML & MBSE	UML-kaaviot	2
Microsoft Visio	UML-kaaviot	2
Microsoft Excel	Taulukoiden luonti, analysointi ja esitys	1
Google Sheets	Taulukoiden luonti, analysointi ja esitys	1
PostgreSQL	Relaatiotietokanta-alusta	2
SQLite	Relaatiotietokanta-alusta	2
Python	Olio-ohjelmointikieli	2
Java	Olio-ohjelmointikieli	3
C++	Olio-ohjelmointikieli	3
Modelica (FMI, SSP, DCP)	Järjestelmämallien ohjelmointikieli	3
ns-2 & ns-3	Verkkosimulaattori	2
OMNeT++, SIMUlte, Veins	Verkkosimulaattori	2
QualNet + EXata + Cyber	Verkkosimulaattori	2
OpenModelica	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	3
Dymola	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	3
SimulationX	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	3
Wolfram SystemModeler	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	3
MATLAB + Simulink	Dynamiikan simulointi ja analysointi	3

ANSYS + HFSS ja muut lisäosat	Dynamiikan simulointi ja analysointi	2
20-sim	Dynamiikan simulointi ja analysointi	3
FlexSim	Dynamiikan simulointi ja analysointi	3

5.3.3 3d-mallien hyödyntäminen

Järjestelmiä kuvaavien oliomallien ja toiminnallisten mallien lisänä voidaan hyödyntää kattavasti mekaanisia osia fyysisesti kuvaavia 3d-malleja. 3d-malleja voidaan luoda erilaisin 3d-mallinnus- ja CAD-ohjelmin. Nykyään useimmat järjestelmät suunnitellaan alusta alkaen 3d-mallintamalla, joten valmis saatavuus 3d-malleista on parempi kuin ennen. 3d-mallien luontiin jälkeenpäin on kaksi erilaista menetelmää. Ensimmäinen on kuvien ja piirustusten päältä tehtävä tulkinallinen rekonstruktio yhdistettynä luovaan mallintamiseen. Käytännössä tämä tarkoittaa kokonaisuudessaan tietokoneella käsin mallintamista. Toinen menetelmä on 3d-skannata tai hyödyntää muita fotogrammetrian keinoja eli toteuttaa ns. kuvantava rekonstruktio ja korjata mallin virheet tietokoneella käsin. 3d-mallit ovat hyödynnettävissä erilaisissa FEM (Finite element method) menetelmissä, kuten virtauslaskennassa (CFD) ja sähkömagnetismin (EM) laskennassa tai niitä voidaan valaista säteenjäljitysmenetelmillä ja saavuttaa laskennallisia tuloksia kappaleiden ulkomuodoista. Näin ollen 3d-malleista saadaan visuaalisuuden lisäksi laskennallisia tuloksia. 3d-malli voi koostua pääobjektin lisäksi useista aliobjekteista, jotka ovat sidottu hierarkkisesti toisiinsa. Pääobjekti aliobjekteineen voidaan sijoittaa osaksi paikkatietoaineiston pohjalta muodostettuun virtuaaliseen toimintaympäristöön.



Kuva 32. 3d-mallin luontia mesh-mallinnustekniikalla (Viljanen 2021).

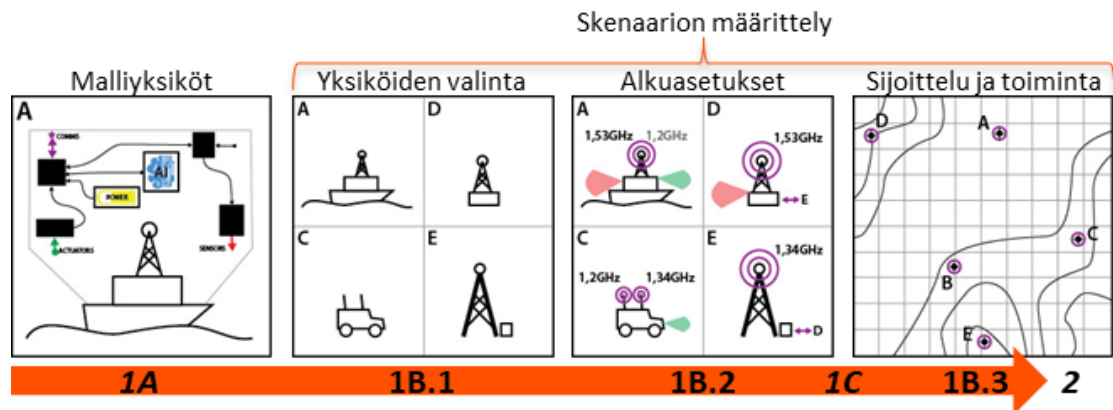
Taulukko 8. Ohjelmien soveltuvuus 3d-mallinnukseen.

Ohjelma	Käyttökohde	Soveltuvuus
Blender 3D	3d-mallinnus- ja visualisointiohjelma	3
3dsMax	3d-mallinnus- ja visualisointiohjelma	3
SolidWorks	CAD-ohjelma + FEM simulaatioita	3
Autodesk Inventor + EMS	CAD-ohjelma + EM simulointi	3

5.4 Skenaarion määrittely (1B, 1C)

Skenaariolla tarkoitetaan jonkin keksityn tai teoriaan pohjautuvan tapahtuman alkuasetelman ja muiden mahdollisten tapahtumaketjujen vaiheiden määrittelyä virtuaaliselle näyttämölle. Skenaariotarkastelussa olennaista on tapahtumien etenemiseen ja lopputulokseen liittyvä epävarmuus, johon halutaan saada vastauksia ennakoidusti. Skenaarioiden ratkontaan voidaan hyödyntää asiantuntijoiden kanssa käytyjä pelejä tai laskennallisia menetelmiä. Skenaarion määrittelyssä hyödynnetään erilaisia valmiita malleja ja toimintaympäristötietoja, sekä näille asetettavia toimintaan liittyviä lähtöparametrejä.

5.4.1 Järjestelmien toiminnan mallinnus



Kuva 33. Vaihe 1B Järjestelmän toiminnan mallinnus (Viljanen 2021).

Skenaarioiden valmistelussa tärkeää on asettaa lähtöparametrit riittävän huolellisesti vastaamaan skenaarion valmisteluun liittyvää suunnitelmaa ja käytettävän simulaatiomenetelmän vaatimuksia. Valmisteluun liittyvät mm. esitettävien tutkimuskysymysten huolellinen laadinta ja tilannekuvaus. Skenaarioiden määrittelyssä kyetään hyödyntämään esivalmisteltuja järjestelmien kuvauksia, kuten UML-malleja, oliomalleja, toiminnallisuuksia kuvaavia malleja, kuin 3d-malleja. Mallien lataamisen lisäksi tulee skenaariossa määrittää järjestelmien lukumäärät ja järjestelmien toimintaan liittyvä käyttäytyminen. Toimintaan liittyvä käyttäytyminen pitää sisällään mm. järjestelmien sijoittamisen lähtöpaikoilleen ja kulureittien määrittelyn käsin tai käyttämällä esimerkiksi laskennallista satunnaiskulkua tai muuta etenemislaskentaa. Järjestelmissä on myös useita muitakin ASCIE-mallin mukaisia asetuksia, joiden muuttaminen valmisteltuna on skenaarion kannalta olennaista. Näiden lisäksi voidaan määrittellä logiikkaan tai tekoälyyn perustuvia ohjaustratkaisuja.

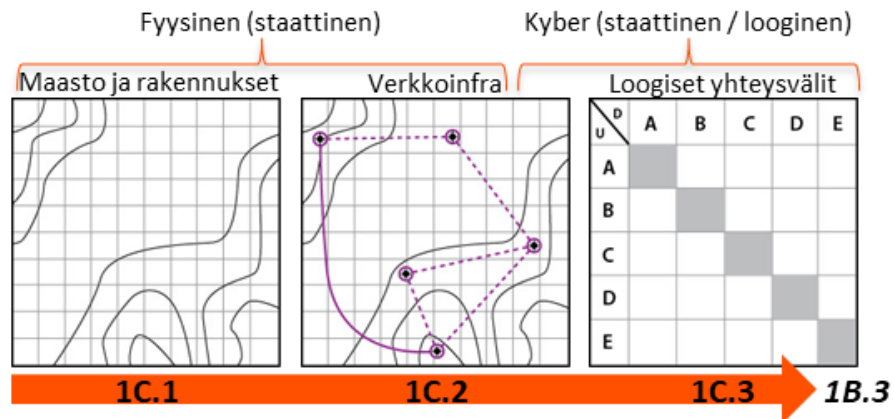
Skenaario voisi olla esimerkiksi sellainen, jossa halutaan tietää drone-logistiikan ongelmakohtia. Kuten voiko kyseinen drone lentää ilman verkkoyhteyttä koko matkan tai osan matkasta? Voiko drone lentää ilman minkäänlaisia sensoreita tai tuottavatko sensorit jotain keskeistä lisäarvoa? Tai mikä on vaadittava sääti-

latiedon tarkkuus tai sallittu säätö, jotta voi lentää. Esimerkiksi näistä ja muista muista tutkimuskysymyksistä voidaan luoda erilaisia kombinaatioita ja variaatioita what-if tyypisesti.

Taulukko 9. Ohjelmien soveltuvuus järjestelmien toiminnan mallinnukseen.

Ohjelma	Käyttökohde	Soveltuvuus
StarUML	UML-kaaviot	2
Modelio + sysML & MBSE	UML-kaaviot	2
Microsoft Visio	UML-kaaviot	2
Microsoft Excel	Taulukoiden luonti, analysointi ja esitys	1
Google Sheets	Taulukoiden luonti, analysointi ja esitys	1
Blender 3D	3d-mallinnus- ja visualisointiohjelma	2
3dsMax	3d-mallinnus- ja visualisointiohjelma	2
SolidWorks	CAD-ohjelma + FEM simulaatioita	1
Autodesk Inventor + EMS	CAD-ohjelma + EM simulointi	1
Unity	Pelimoottori	2
QGIS	Paikkatieto-ohjelma	2
ArcGIS	Paikkatieto-ohjelma	2
Python	Olio-ohjelmointikieli	2
Java	Olio-ohjelmointikieli	1
Modelica (FMI, SSP, DCP)	Järjestelmämallien ohjelmointikieli	3
ns-2 & ns-3	Verkkosimulaattori	3
OMNeT++, SIMUlte, Veins	Verkkosimulaattori	3
QualNet + EXata + Cyber	Verkkosimulaattori	2
OpenModelica	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	3
Dymola	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	3
SimulationX	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	3
Wolfram SystemModeler	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	3
MATLAB + Simulink	Dynamiikan simulointi ja analysointi	3
ANSYS + HFSS ja muut lisäosat	Dynamiikan simulointi ja analysointi	2
20-sim	Dynamiikan simulointi ja analysointi	3
FlexSim	Dynamiikan simulointi ja analysointi	3

5.4.2 Toimintaympäristöjen mallinnus



Kuva 34. Vaihe 1C Toimintaympäristöjen mallinnus (Viljanen 2021).

Järjestelmien sijoittelun pohjaksi määritellään fyysikaalista toimintaympäristöä mallintava paikkatietoaineisto ja sinne kuuluvat staattiset kohteet, kuten rakennukset. Keskeisimmät paikkatietoaineistot ovat maaston luokittelu ja korkeusaineisto, joilla on vaikutusta erilaisten etenemismallien käyttöön. Muita hyödynnettävissä olevia fyysikaalisen toimintaympäristön malleja ovat rakennetun alueen 3d-mallit, sekä olosuhteiden mallintamiseen liittyvät säätiedot ja säämallit. Kybertoimintaympäristöjen ja informaatioulottuvuuden kuvaamiseksi edellytetään erityisesti verkkojen infraan liittyvien fyysisten rakenteiden mallinnusta, kuten tukiasemia, sekä verkkojen yhteysvälien kuvaamista loogisesti.

Taulukko 10. Ohjelmien soveltuvuus toimintaympäristöjen mallinnukseen.

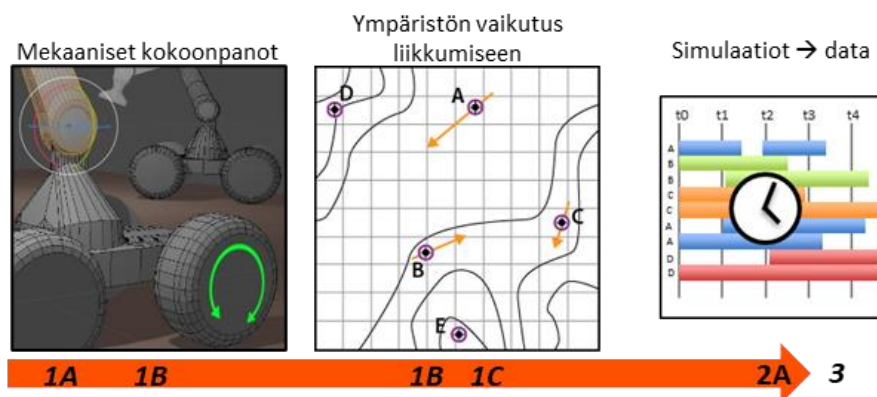
Ohjelma	Käyttökohde	Soveltuvuus
Blender 3D	3d-mallinnus- ja visualisointiohjelma	2
3dsMax	3d-mallinnus- ja visualisointiohjelma	2
Unity	Pelimoottori	2
QGIS	Paikkatieto-ohjelma	3
ArcGIS	Paikkatieto-ohjelma	3
ns-2 & ns-3	Verkkosimulaattori	3
OMNeT++, SIMUlte, Veins	Verkkosimulaattori	3
QualNet + EXata + Cyber	Verkkosimulaattori	3
OpenModelica	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	1
Dymola	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	1
SimulationX	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	1
Wolfram SystemModeler	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	1
MATLAB + Simulink	Dynamiikan simulointi ja analysointi	1
ANSYS + HFSS ja muut lisäosat	Dynamiikan simulointi ja analysointi	1

20-sim	Dynamiikan simulointi ja analysointi	1
FlexSim	Dynamiikan simulointi ja analysointi	1

5.5 Dynamiikan laskenta (2A – 2C)

Dynamiikan laskenta tai dynamiikan simulointi on laskennallinen prosessi, jossa ratkotaan yksittäisen järjestelmän ja järjestelmien ajallisia muutoksia ympäristössä. Laskenta perustuu mallinnettuun skenaarioon, joka sisältää järjestelmiä kuvaavia malleja, toiminnallisia malleja ja toimintaympäristöjen malleja, sekä skenaarion määrittelyssä annettuja lähtöparametrejä. Dynamiikan laskennassa hyödynnetään aikasidonnaisia differentiaaliyhtälöitä ja muita matemaattisia ratkaisuja. Stokastisten eli satunnaisten prosessien avulla voidaan ratkoa skenaarion osia, joissa on paljon muuttuvia ja epävarmoja tekijöitä. Laskennan tuloksena kyetään arvioimaan tilanteen kehitystä eri tapauksissa. Tallentamalla tilanteen kehityksistä saadut simuloituvat arvot jatkuvaan aikaan sidotuksi dataksi, voidaan dataa analysoida laskennan jälkeen vastaavilla menetelmillä kuin se olisi nauhoittamalla kerättyä, kuten luvussa 3 on toteutettu. Simuloimalla tuotettu data mahdollistaa sen jatkokäyttämisen pohjatietona mallintamiselle ja jatkosimulaatioiden toteuttamiselle muissa ympäristöissä. Simulointi vastaa samaa periaatetta, mihin perustuu myös tietokonepelien reaaliaikaisuus. Usein simulaatioita voidaan tarkastella, muuttaa arvoja ja pysäyttää sen ollessa käynnissä. Dynamiikan laskenta toimii parhaiten, mikäli kaikki laskennat kyetään suorittamaan saman simulaatioajan ja ajanhallinnan puitteissa. Tutkimus- ja kehityskäytössä on kuitenkin mahdollista hajauttaa näitä prosesseja erillisiin ohjelmiin, mikäli prosessit ja kiinnostuksen kohteena olevat asiat ovat hyvin tiedossa. (Heo & Varshney 2005, 81-86; Lee 2018; Pritchett ym. 2000, 1132-1140; Molfino ym. 2008, 5; Bruegge 2006.)

5.5.1 Kappaleiden mekaniikan laskentamallit



Kuva 35. Vaihe 2A Kappaleiden mekaniikan laskentamallit (Viljanen 2021).

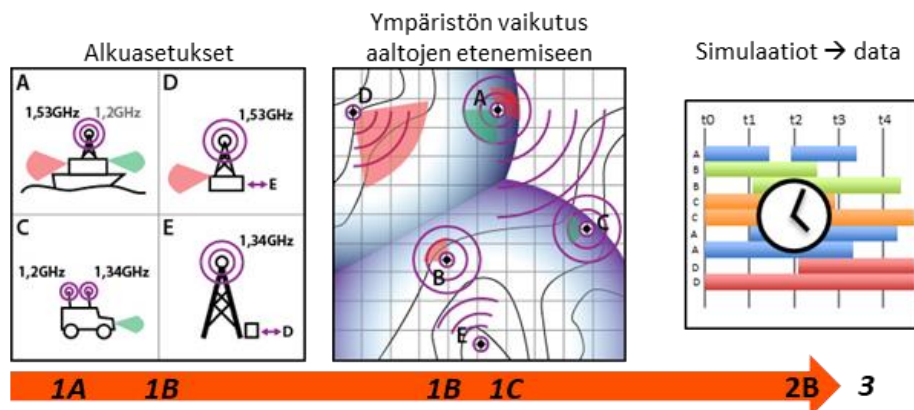
Mekaniikan laskentaa, kuten kineettistä vuorovaikutusta ja liikettä, voidaan mallintaa useammalla tavalla. Liikkeen mallinnus voi pohjautua skenaarion määrittelyssä ennakkoon annettuihin reittipisteisiin tai laskennallisiin kulkureittien arvioihin paikkatietoaineistoon perustuen. Järjestelmän paikallisten liiketekijöiden, kuten robotin varsien ja kourien liikkeen mallinnuksessa voidaan hyödyntää jatkuvaan aikaan perustuvia ennakkoon määriteltyjä liikeratoja tai järjestelmän mallissa kuvattuihin suorituskykyihin pohjautuvia reunaehtoja ja automaattista logiikkaa. Mikäli liikkumiseen liittyy epävarmuustekijöitä, voidaan liikettä arvioida myös diskreetteinä tapahtumina erilaisin stokastisin satunnaiskulkufunktion. Satunnaiskulku muuttaa halutulla vaihteluvälillä liikesuuntia ja simuloi liikkeen luonnollista vaihtelevuutta, jonka avulla saadaan tilastollista jakaumaa. Lisäksi erilaisilla liikkumisen etenemismalleilla voidaan rajata liikkuminen tiettyjen alueiden sisälle. Esimerkiksi mekaanista liikettä tuottavien aktuaattoreiden simuloinnissa voidaan hyvin hyödyntää erilaisia mekaniikan laskentamalleja, kuten pyörimisliikettä ja kitkaa. Näin auton renkaan pyörivä liike voidaan muuntaa autoa kuljettavaksi liikkeeksi. (Pritchett ym. 2000, 1133.)

Taulukko 11. Ohjelmien soveltuvuus kappaleiden mekaniikan simulointiin.

Ohjelma	Käyttökohde	Soveltuvuus
Blender 3D	3d-mallinnus- ja visualisointiohjelma	3
3dsMax	3d-mallinnus- ja visualisointiohjelma	3

SolidWorks	CAD-ohjelma + FEM simulaatioita	3
Autodesk Inventor + EMS	CAD-ohjelma + EM simulointi	3
OpenFOAM + Visual CFD	CFD-laskenta	3
Unity	Pelimoottori	3
QGIS	Paikkatieto-ohjelma	3
ArcGIS	Paikkatieto-ohjelma	3
Python	Olio-ohjelmointikieli	2
Java	Olio-ohjelmointikieli	1
C++	Olio-ohjelmointikieli	1
Modelica (FMI, SSP, DCP)	Järjestelmämallien ohjelmointikieli	2
OpenModelica	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	2
Dymola	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	2
SimulationX	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	2
Wolfram SystemModeler	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	2
MATLAB + Simulink	Dynamiikan simulointi ja analysointi	2
ANSYS + HFSS ja muut lisäosat	Dynamiikan simulointi ja analysointi	2
20-sim	Dynamiikan simulointi ja analysointi	2
FlexSim	Dynamiikan simulointi ja analysointi	2

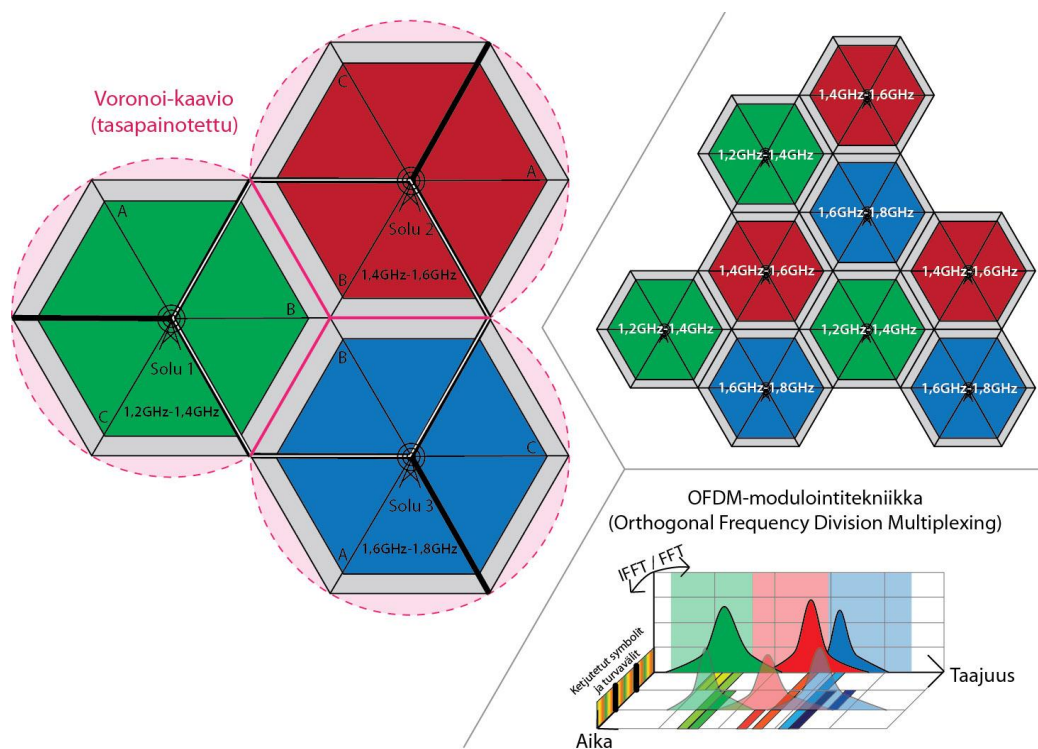
5.5.2 Aaltojen etenemisen, säteilyn ja kenttien laskentamallit



Kuva 36. Vaihe 2B Aaltojen etenemisen, säteilyn ja kenttien laskentamallit (Viljanen 2021).

Aaltojen etenemismallit ovat käytännössä sähkömagneettiseen säteilyyn, valoon ja akustiseen etenemiseen liittyviä laskentamalleja. Lisäksi on magneettija sähkökenttien laskentamalleja. Näiden laskentamallien avulla voidaan ratkoa erityisesti sensoreihin ja langattomaan tiedonsiirtoon liittyviä kantamia, katveja, interferenssiä ja useita muita fysiikkaan perustuvia teknisiä suorituskykyarvoja. Parhaimmilla laskentamalleilla aaltojen etenemistä voidaan simuloida kolmiulot-

teisessä tilassa, aika, teho ja taajuustasoilla. Silloin saavutetaan tarkimmat tulokset, mutta laskenta-ajat ovat myös pitkiä. Nopeampiin ja likimääräisempiin tuloksiin voidaan päästä säteenjäljitykseen tai maksimikantamaan perustuvilla malleilla, kuten vapaan tilan vaimennuksen laskentakaavalla tai Voronoi-kuvaajalla. Korkeampiin radiotaajuuksiin, sekä erityisesti valaisun ja optiikan simulointiin toimii hyvin säteenjäljitys. Kuvassa 37 on havainnollistettu matkapuhelinverkon toimintaperiaatetta ja Voronoi-kuvaajan käyttöä solujen määrittelyssä. Voronoi-kuvaaja ei laske fysiikkaa, vaan se kuvaa etäisyyksien välisiä nk. tasapainopisteitä. (Sun ym. 2018, 10; Heo & Varshney 2005, 86-87.)



Kuva 37. Voronoi-kuvaaja soluverkon määrittelyssä (Viljanen 2021; Keysight Technologies 2021).

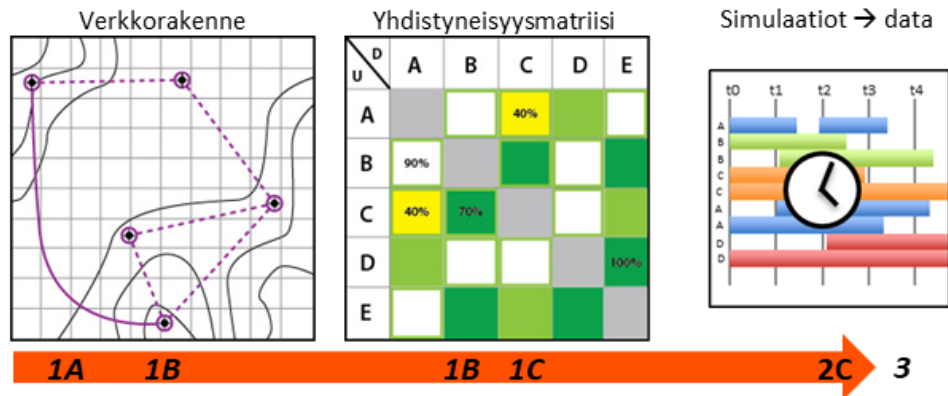
Longley-Rice malli, sekä ITU-mallit (International Telecommunication Union) ovat tarkempia malleja verrattuna Voronoi-kuvaajaan, joka ei ole varsinainen laskentamalli. Näille vaihtoehtoinen tapa laskea säteilyn ja radiotaajuuksien kulkeutumista on hyödyntää säteenjäljitystä. Säteenjäljitys sellaisenaan ei huomioi esimerkiksi signaalien interferenssejä, joiden laskenta on radiotaajuuksille ja

Radiotaajuudet 20MHz - 2GHz								
Radiotaajuudet 900MHz - 5,2GHz								
Radiotaajuudet 5,2GHz →								
Valo, IR								

Taulukko 13. Ohjelmien soveltuvuus aaltojen etenemisen simulointiin.

Ohjelma	Käyttökohde	Soveltuvuus
Blender 3D	3d-mallinnus- ja visualisointiohjelma	1
3dsMax	3d-mallinnus- ja visualisointiohjelma	1
SolidWorks	CAD-ohjelma + FEM simulaatioita	1
Autodesk Inventor + EMS	CAD-ohjelma + EM simulointi	2
OpenFOAM + Visual CFD	CFD-laskenta	3
Unity	Pelimoottori	1
QGIS	Paikkatieto-ohjelma	2
ArcGIS	Paikkatieto-ohjelma	2
Python	Olio-ohjelmointikieli	1
Java	Olio-ohjelmointikieli	1
C++	Olio-ohjelmointikieli	1
Modelica (FMI, SSP, DCP)	Järjestelmämallien ohjelmointikieli	1
SPLAT!	EM mallinnus ja simulointi (Longley-Rice)	3
Altair Feko	EM mallinnus ja simulointi	3
ns-2 & ns-3	Verkkosimulaattori	1
OMNeT++, SIMUlte, Veins	Verkkosimulaattori	1
QualNet + EXata + Cyber	Verkkosimulaattori	3
OpenModelica	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	1
Dymola	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	1
SimulationX	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	1
Wolfram SystemModeler	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	1
MATLAB + Simulink	Dynamiikan simulointi ja analysointi	2
ANSYS + HFSS ja muut lisäosat	Dynamiikan simulointi ja analysointi	3
20-sim	Dynamiikan simulointi ja analysointi	1
FlexSim	Dynamiikan simulointi ja analysointi	1

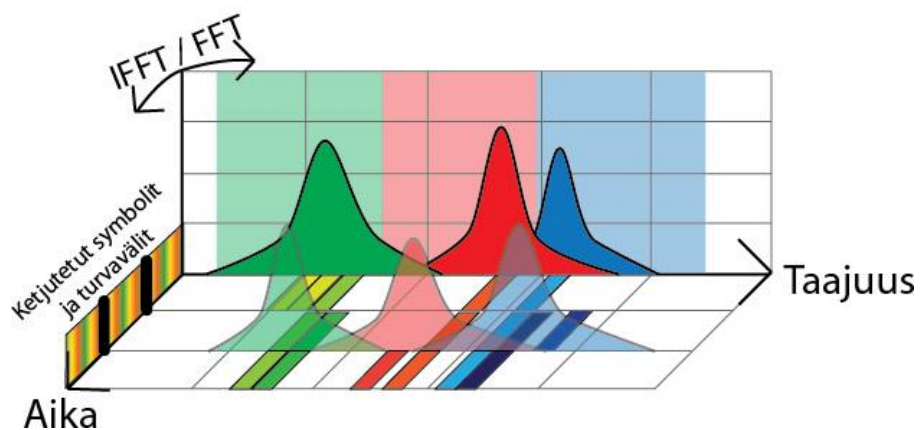
5.5.3 Informaation etenemisen laskentamallit



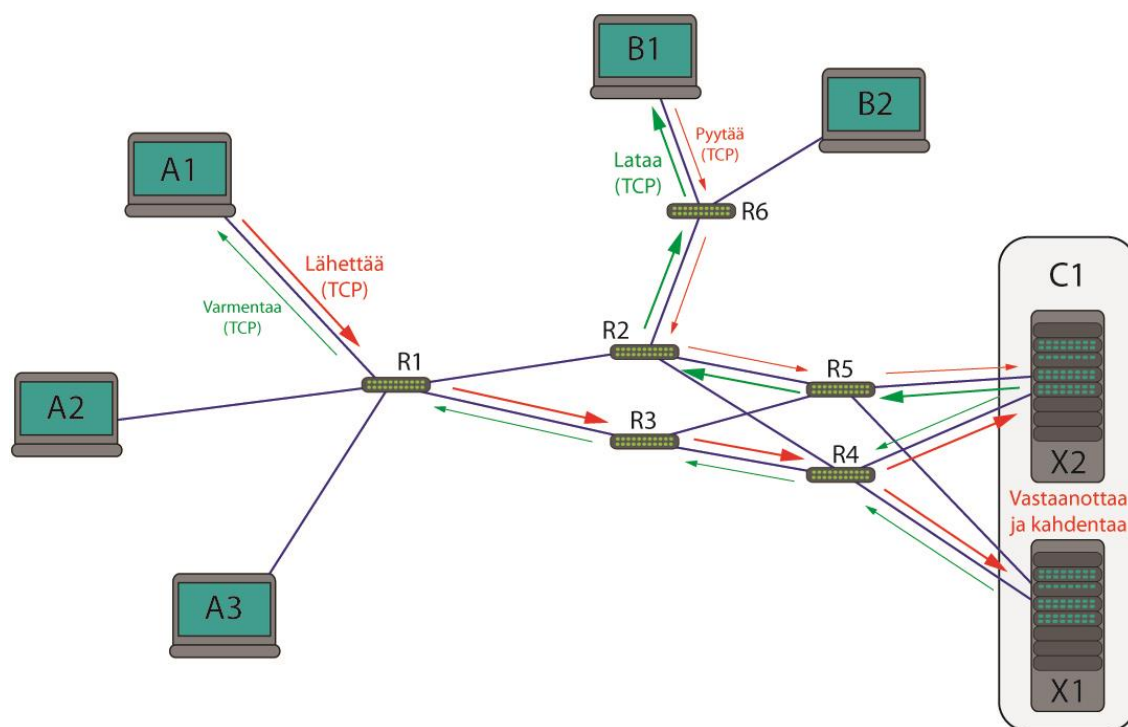
Kuva 39. Vaihe 2C Informaation etenemisen laskentamallit (Viljanen 2021).

Informaation etenemisen laskennassa tarkoituksena on simuloida tietoverkoissa tapahtuvia loogisia tiedonsiirron nopeita ja monimutkaisia tapahtumia. Laskentamallien tulisi tuottaa tietoa mm. tilannekuvan analysointiin. Erilaiset fyysiset ja loogiset rajapinnat luovat mahdollisuudet tiedon etenemiselle. Luvussa 5.5.2 käsiteltiin langattomien tiedonsiirtoyhteyksien fyysisistä ilmarajapintaa eli aaltojen etenemisen malleja. Kuvassa 40 on kuvattu informaation multipleksaamista spektriin OFDM-modulointitekniikalla, joka on laajasti käytössä erilaisissa tiedonsiirtoyhteyksissä. Multipleksauksella tarkoitetaan usean lähetteen eli tietovuon yhdistämistä yhteen, jolloin saavutetaan tiedonsiirron kannalta tehokkaampi tulos. Demultipleksaus toimii käänteisesti eli sillä tietovuot erotellaan omikseen. Multipleksaus ja muut modulointitekniikat edustavat OSI-mallin ensimmäistä tasoa eli fyysistä rajapintaa. Informaation etenemisen loogiset vaiheet noudattelevat esim. OSI-mallin (Taulukko 3) vaiheita 7-2. Kuvassa 41 on havainnollistettu TCP/IP tietoverkon toimintaperiaatetta. Tiedonsiirron tapahtumien ja informaation etenemisen laskemiseksi edellytetään aiemmissa mallintamisvaiheissa riittävän tarkkaa tietoverkkomallin luomista, joka tulee saada kytettyä niihin rajapintoihin, joilla yksittäiset simuloitavat kyberfyysiset järjestelmät voivat liittyä verkkoon. Havainnekuvasa 42 on luotu hypoteettisen tiedonsiirtosekvenssin kuvaus. (Keysight Technologies 2021.)

OFDM-modulointitekniikka (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

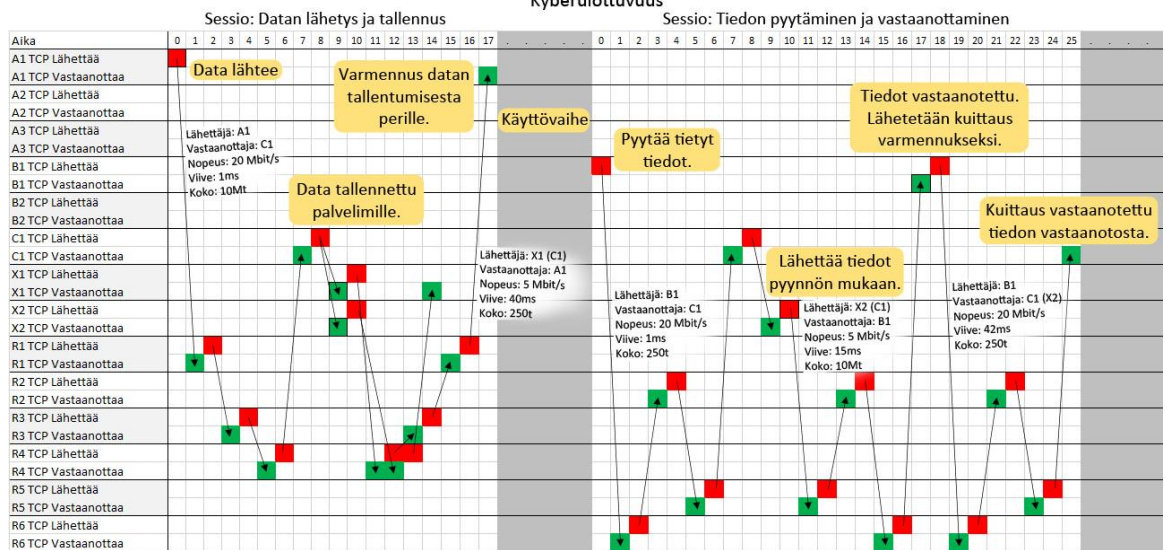


Kuva 40. Informaation multipleksaaminen spektriin (Viljanen 2021; Keysight Technologies 2021).



Kuva 41. Informaation eteneminen verkossa (Viljanen 2021).

Informaation etenemisen sekvenssi Kyberulottuvuus

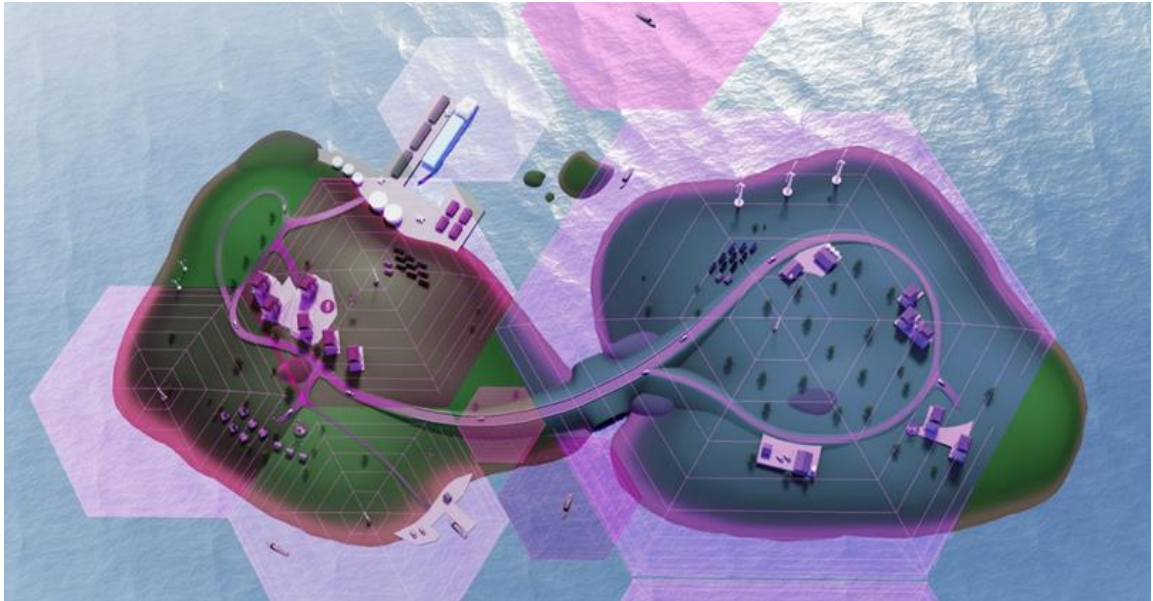


Kuva 42. Periaatteellinen verkkosimulaatio (Viljanen 2021).

Taulukko 14. Ohjelmien soveltuvuus informaation etenemisen simulointiin.

Ohjelma	Käyttökohde	Soveltuvuus
StarUML	UML-kaaviot	1
Modelio + sysML & MBSE	UML-kaaviot	1
Microsoft Visio	UML-kaaviot	1
Unity	Pelimoottori	1
QGIS	Paikkatieto-ohjelma	2
ArcGIS	Paikkatieto-ohjelma	2
Python	Olio-ohjelmointikieli	1
Java	Olio-ohjelmointikieli	1
C++	Olio-ohjelmointikieli	1
Modelica (FMI, SSP, DCP)	Järjestelmämallien ohjelmointikieli	2
SPLAT!	EM mallinnus ja simulointi (Longley-Rice)	2
Altair Feko	EM mallinnus ja simulointi	2
ns-2 & ns-3	Verkkosimulaattori	3
OMNeT++, SIMUlte, Veins	Verkkosimulaattori	3
QualNet + EXata + Cyber	Verkkosimulaattori	3
OpenModelica	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	2
Dymola	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	2
SimulationX	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	2
Wolfram SystemModeler	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	2
MATLAB + Simulink	Dynamiikan simulointi ja analysointi	2
ANSYS + HFSS ja muut lisäosat	Dynamiikan simulointi ja analysointi	1
20-sim	Dynamiikan simulointi ja analysointi	2
FlexSim	Dynamiikan simulointi ja analysointi	2

5.6 Visualisointi (3)



Kuva 43. Havainnekuva visualisoinnista (Viljanen 2021).

Useimmissa sovelluksissa on itsessään visualisointiominaisuuksia ja käyttöliittymiä, joiden avulla tuloksia kyetään tulkitsemaan eri tavoin. On myös sovelluksia, joiden visualisointikyvyt ovat hyvin rajalliset tai niitä ei ole. Silloin voidaan hyödyntää erillistä ohjelmaa, jolla tietoaineistot kyetään esittämään tarkoituksen mukaisella tavalla. 3d-mallien käyttäminen tukee järjestelmien toiminnan ymmärrettävyyttä visualisoimalla kolmiulotteisesti. Projektiokuvien tuottamista geometriatiedon pohjalta laskennallisesti kutsutaan renderoinniksi. Renderoinnin ulkoasuun voidaan vaikuttaa esimerkiksi shader-ohjelmoinnilla (Viljanen 2012, 2-13).

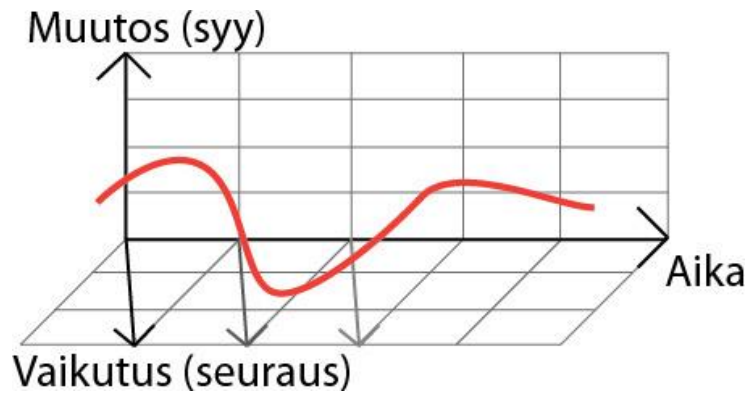
Taulukko 15. Ohjelmien soveltuvuus visualisointiin.

Ohjelma	Käyttökohde	Soveltuvuus
StarUML	UML-kaaviot	2
Modelio + sysML & MBSE	UML-kaaviot	2
Microsoft Visio	UML-kaaviot	2
Microsoft Excel	Taulukoiden luonti, analysointi ja esitys	2
Google Sheets	Taulukoiden luonti, analysointi ja esitys	2
Blender 3D	3d-mallinnus- ja visualisointiohjelma	3
3dsMax	3d-mallinnus- ja visualisointiohjelma	3
SolidWorks	CAD-ohjelma + FEM simulaatioita	2
Autodesk Inventor + EMS	CAD-ohjelma + EM simulointi	2

OpenFOAM + Visual CFD	CFD-laskenta	2
Unity	Pelimoottori	3
QGIS	Paikkatieto-ohjelma	3
ArcGIS	Paikkatieto-ohjelma	3
Python	Olio-ohjelmointikieli	1
Java	Olio-ohjelmointikieli	1
SPLAT!	EM mallinnus ja simulointi (Longley-Rice)	2
Altair Feko	EM mallinnus ja simulointi	2
ns-2 & ns-3	Verkkosimulaattori	2
OMNeT++, SIMUlte, Veins	Verkkosimulaattori	2
EXata + Cyber	Verkkosimulaattori	2
OpenModelica	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	2
Dymola	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	2
SimulationX	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	2
Wolfram SystemModeler	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	2
MATLAB + Simulink	Dynamiikan simulointi ja analysointi	2
ANSYS + HFSS ja muut lisäosat	Dynamiikan simulointi ja analysointi	2
20-sim	Dynamiikan simulointi ja analysointi	2
FlexSim	Dynamiikan simulointi ja analysointi	2
R	Data-analyysit	2
SAS	Data-analyysit	2

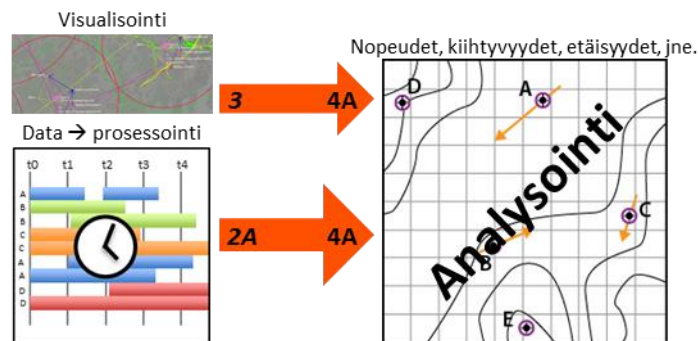
5.7 Datat prosessointi (4A – 4C)

Vuorovaikutusten ja syy-seuraussuhteiden arvioimiseksi hyödynnetään kaikkea pohjatietoa, sekä mallien ja simulaatioiden tuottamaa dataa. Vuorovaikutuksia kyetään analysoimaan jatkuvasta tai diskreetistä datasta prosessoimalla, jossa kaikkien järjestelmän osien parametrit ovat tallennettuina määrävälisessä ajassa esimerkiksi sekunnin välein. Luvussa 3 kerätty tukiasemien kuuluvuus ja paikkatieto datat vastaavat sitä mihin tässä pyritään simuloimalla. Periaate vuorovaikutusten analysoinnissa on kuvan 44 mukainen, jossa ajallisesti tapahtuvilla muutoksilla on tai ei ole vaikutusta muihin järjestelmän osiin. Muutosten vaikutukset ovat syy-seuraussuhteiden kannalta kiinnostavia. Erilaisilla muutosvaihtoehdoilla saavutetaan myös what-if analyysijä useiden simulaatiokierrosten yli.



Kuva 44. Muutos-vaikutus ja aika (Viljanen 2021).

5.7.1 Liikkeiden analysointi



Kuva 45. Vaihe 4A Liikkeiden analysointi (Viljanen 2021).

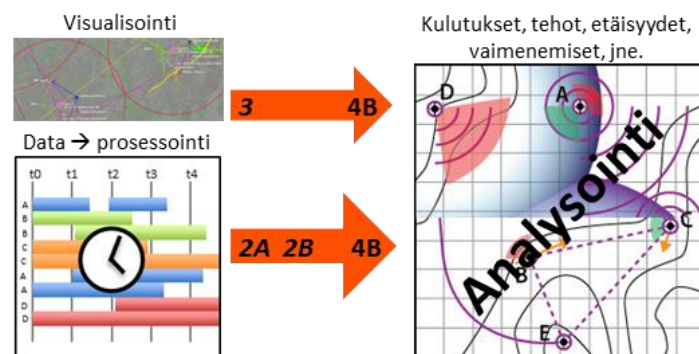
Järjestelmien mekaanisista liikkeistä voidaan analysoida esimerkiksi kulunutta aikaa, paikkaa, suuntaa, nopeuksia ja kiihtyvyyksiä. Liikkeiden analysointi on dynamiikan simuloinnissa keskeisesti muuttuva tekijä. Liikkuminen voi vaikuttaa moneen asiaan simulaatiossa. Liikkeen analysoinnilla voidaan hakea vastaus esimerkiksi kysymykseen: Oliko liikkuminen odotetun kaltaista ja miten se vaikutti kokonaisuuteen?

Taulukko 16. Ohjelmien soveltuvuus liikkeiden analysointiin.

Ohjelma	Käyttökohde	Soveltuvuus
Microsoft Excel	Taulukoiden luonti, analysointi ja esitys	3
Google Sheets	Taulukoiden luonti, analysointi ja esitys	2
Blender 3D	3d-mallinnus- ja visualisointiohjelma	2
3dsMax	3d-mallinnus- ja visualisointiohjelma	2

SolidWorks	CAD-ohjelma + FEM simulaatioita	1
Autodesk Inventor + EMS	CAD-ohjelma + EM simulointi	1
OpenFOAM + Visual CFD	CFD-laskenta	2
Unity	Pelimoottori	2
QGIS	Paikkatieto-ohjelma	3
ArcGIS	Paikkatieto-ohjelma	3
Python	Olio-ohjelmointikieli	2
Java	Olio-ohjelmointikieli	2
C++	Olio-ohjelmointikieli	2
ns-2 & ns-3	Verkkosimulaattori	2
OMNeT++, SIMUlte, Veins	Verkkosimulaattori	2
QualNet + EXata + Cyber	Verkkosimulaattori	2
OpenModelica	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	3
Dymola	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	3
SimulationX	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	3
Wolfram SystemModeler	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	2
MATLAB + Simulink	Dynamiikan simulointi ja analysointi	3
ANSYS + HFSS ja muut lisäosat	Dynamiikan simulointi ja analysointi	3
20-sim	Dynamiikan simulointi ja analysointi	3
FlexSim	Dynamiikan simulointi ja analysointi	3
R	Data-analyysit	2
SAS	Data-analyysit	2

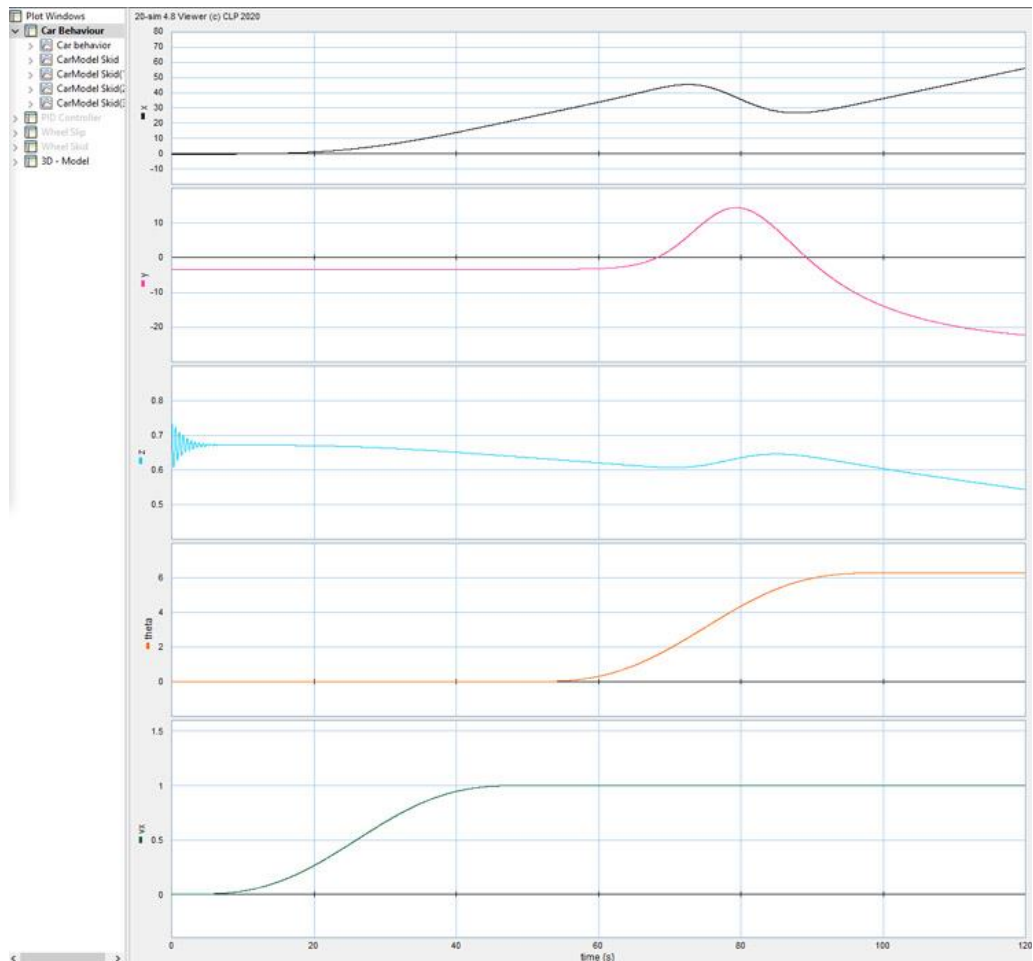
5.7.2 Suorituskykyjen analysointi



Kuva 46. Vaihe 4B Suorituskykyjen analysointi (Viljanen 2021).

Useiden suorituskykyjen samanaikaisesta simulaatiodatasta voidaan analysoida esimerkiksi aikaa, paikkaa, sensoreiden havaintokykyä ja tiedonsiirtojärjestelmien toimivuutta. Suorituskykyjen analysoinnissa voidaan hyödyntää samaa dataa ja menetelmiä kuin mekaanisten liikkeiden analysoinnissa. Suorituskykyjen analysointi on liikkeiden analysointia laajempi koko järjestelmän suorituskykyä

tuottavien ominaisuuksien tarkastelun kokonaisuus. Suorituskykyjen analysoinnilla voidaan hakea vastaus esimerkiksi kysymykseen: Oliko kaikkien hyötyä tuottavien järjestelmien toiminta odotetun kaltaista ja miten se vaikutti kokonaisuuteen?



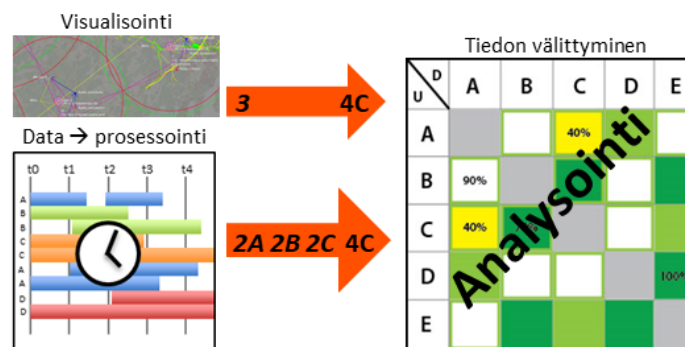
Kuva 47. Simuloitujen järjestelmämallien datasta voidaan tuottaa kuvaajia analysoitavaksi (20-sim 2021; Viljanen 2021).

Taulukko 17. Ohjelmien soveltuvuus suorituskykyjen analysointiin.

Ohjelma	Käyttökohde	Soveltuvuus
Microsoft Excel	Taulukoiden luonti, analysointi ja esitys	3
Google Sheets	Taulukoiden luonti, analysointi ja esitys	2
Blender 3D	3d-mallinnus- ja visualisointiohjelma	2
3dsMax	3d-mallinnus- ja visualisointiohjelma	2
SolidWorks	CAD-ohjelma + FEM simulaatioita	1
Autodesk Inventor + EMS	CAD-ohjelma + EM simulointi	1
OpenFOAM + Visual CFD	CFD-laskenta	2
Unity	Pelimoottori	1

QGIS	Paikkatieto-ohjelma	2
ArcGIS	Paikkatieto-ohjelma	2
Python	Olio-ohjelmointikieli	2
Java	Olio-ohjelmointikieli	2
C++	Olio-ohjelmointikieli	2
ns-2 & ns-3	Verkkosimulaattori	3
OMNeT++, SIMUlte, Veins	Verkkosimulaattori	3
QualNet + EXata + Cyber	Verkkosimulaattori	3
OpenModelica	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	3
Dymola	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	3
SimulationX	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	3
Wolfram SystemModeler	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	3
MATLAB + Simulink	Dynamiikan simulointi ja analysointi	3
ANSYS + HFSS ja muut lisäosat	Dynamiikan simulointi ja analysointi	3
20-sim	Dynamiikan simulointi ja analysointi	3
FlexSim	Dynamiikan simulointi ja analysointi	3
R	Data-analyysit	2
SAS	Data-analyysit	2

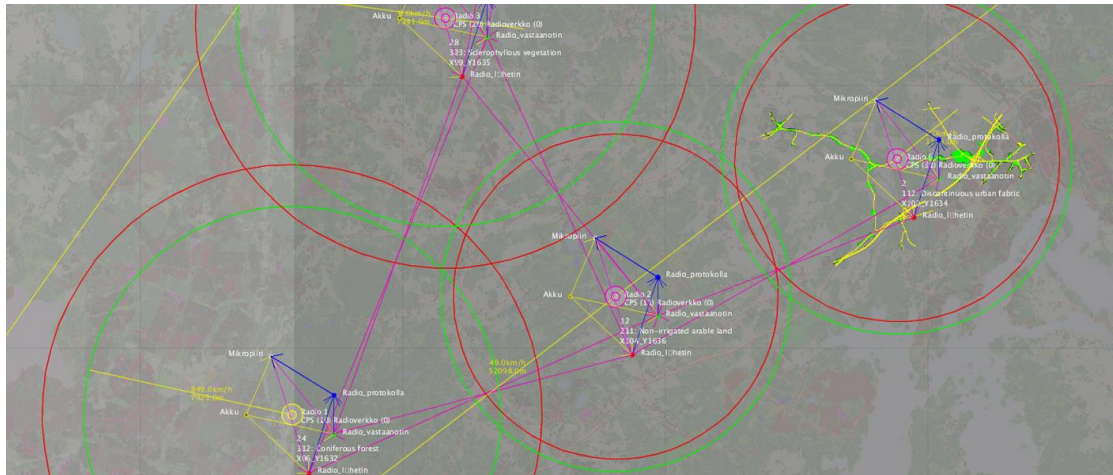
5.7.3 Tilannekuvan analysointi



Kuva 48. Vaihe 4C Tilannekuvan analysointi (Viljanen 2021).

Tilannekuvan analysoinnilla tarkoitetaan hieman vastaavia asioita kuin liikkeen ja suorituskykyjen analysoinnissa. Tilannekuvan analysoinnissa datasta pyritään prosessoimaan järjestelmien kyvyt aistia ja vaikuttaa fyysisiin prosesseihin, jota selvitettiin vaiheessa 4B Suorituskykyjen analysointi. Tilannekuvan analysoinnissa pyritään lisäksi prosessoimaan niitä tekijöitä, jotka vaikuttavat tiedon välittämiseen ja vastaanottamiseen järjestelmien välillä. Tiedon välittämällä ja vastaanottamisella on eri järjestelmien tilannetietoisuuden näkökulmasta merkitystä. Kuvassa 49 kuvataan tilannekuvan monimutkaisuutta karttapohjalla. Tie-

don jakautuneisuuden havainnollistamiseksi on laadittu kuvaaja 50, joka mukaillee yhdistyneisyysmatriisia (engl. connectivity matrix tai adjanceny matrix). Tilannekuvan analysoinnilla voidaan hakea vastaus esimerkiksi kysymykseen: Oliko järjestelmien välillä jakautunut tilannekuva odotetun kaltaista ja miten se vaikutti kokonaisuuteen?



Kuva 49. Tilannekuvan esittäminen spatiaalisesti (Viljanen 2021).

	Kukaan ei tiedä kenenkään tilasta					A-ryhmä ja X-ryhmä tietävät toisistaan tämän hetken tilanteen.					B2:n tietämys B1:stä heikkenee, mutta ei toisinpäin.					B- ja X-ryhmässä yhteydet katkeaa kaikilta.					B- ja X-ryhmässä yhteydet edelleen pois ja tilannekuva heikkenee.					Yksittäisiä yhteyksiä alkaa palaamaan.					Kaikki muut toimii paitsi B-ryhmä.					Kaikki tietää kaikkien tiloista.																																																	
Aika t	t0					t1					t2					t3					t4					t5					t6					t7																																																	
Järjestelmän tila	A1	A2	A3	B1	B2	X1	X2	A1	A2	A3	B1	B2	X1	X2	A1	A2	A3	B1	B2	X1	X2	A1	A2	A3	B1	B2	X1	X2	A1	A2	A3	B1	B2	X1	X2	A1	A2	A3	B1	B2	X1	X2	A1	A2	A3	B1	B2	X1	X2	A1	A2	A3	B1	B2	X1	X2																													
A1	■							■	■	■					■	■	■	■					■	■	■	■	■			■	■	■	■	■	■			■	■	■	■	■	■	■			■	■	■	■	■	■	■	■			■	■	■	■	■	■	■	■	■																				
A2		■							■							■								■							■								■								■								■								■								■								■						
A3			■							■							■								■							■								■								■								■								■								■								■					
B1				■							■							■								■							■								■								■								■								■								■								■				
B2					■							■							■									■								■									■								■								■								■																
X1						■							■							■									■									■								■								■								■								■															
X2							■							■							■									■								■								■								■								■								■															

Kuva 50. Tiedon jakautuneisuuden arviointi osana tilannekuvaa (Viljanen 2021).

Taulukko 18. Ohjelmien soveltuvuus tilannekuvan analysointiin.

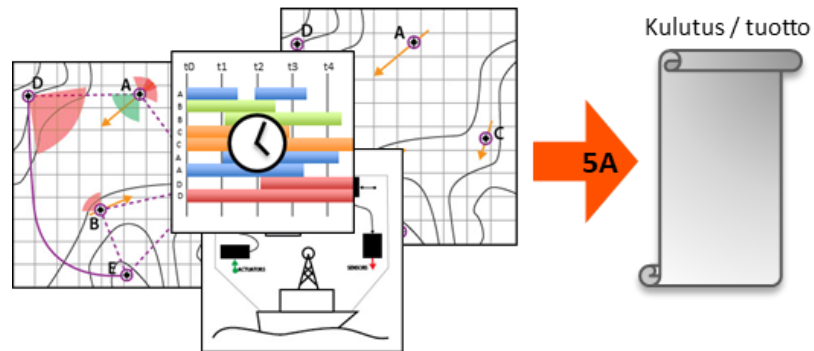
Ohjelma	Käyttökohde	Soveltuvuus
Microsoft Excel	Taulukoiden luonti, analysointi ja esitys	3
Google Sheets	Taulukoiden luonti, analysointi ja esitys	2
Blender 3D	3d-mallinnus- ja visualisointiohjelma	1
3dsMax	3d-mallinnus- ja visualisointiohjelma	1

Unity	Pelimoottori	1
QGIS	Paikkatieto-ohjelma	3
ArcGIS	Paikkatieto-ohjelma	3
Python	Olio-ohjelmointikieli	2
Java	Olio-ohjelmointikieli	2
C++	Olio-ohjelmointikieli	2
ns-2 & ns-3	Verkkosimulaattori	3
OMNeT++, SIMUlte, Veins	Verkkosimulaattori	3
QualNet + EXata + Cyber	Verkkosimulaattori	3
OpenModelica	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	2
Dymola	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	2
SimulationX	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	2
Wolfram SystemModeler	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	2
MATLAB + Simulink	Dynamiikan simulointi ja analysointi	2
ANSYS + HFSS ja muut lisäosat	Dynamiikan simulointi ja analysointi	2
20-sim	Dynamiikan simulointi ja analysointi	2
FlexSim	Dynamiikan simulointi ja analysointi	2
R	Data-analyysit	2
SAS	Data-analyysit	2

5.8 Tehokkuuden ja luotettavuuden arviointi (5A – 5C)

Tehokkuuden ja luotettavuuden arviointia voidaan toteuttaa kaikella mallintamisen kohteeseen liittyvällä tiedolla ja tarkastelemalla analysoinnin tuloksena saatuja havaintoja kriittisesti. Tavoitteena on tuottaa johtopäätöksiä analysoitujen tulosten perusteella, jolloin mallintamiseen käytetystä työstä saadaan kaivattua lisäarvoa. Pitkäkestoiseen kulutukseen liittyvien vikojen ilmaantumista ja sen kaltaista luotettavuutta voi olla kuitenkin vaikea arvioida luotettavasti pelkkien simulaatioiden perusteella. Simulaation osia voidaan täydentää monenlaisella pohjatiedolla, kuten kokeellisesti mitatuilla vikaantuvuustodennäköisyyksillä. Perinteiset taulukkolaskentaohjelmat, data-analyysien tekoon soveltuvat ohjelmat ja ohjelmointikieliset ovat hyviä menetelmiä johtopäätösten prosessoinnin tueksi.

5.8.1 Toiminnan tehokkuus



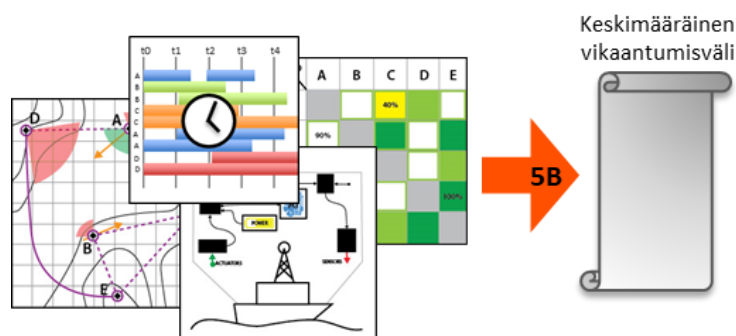
Kuva 51. Vaihe 5A Toiminnan tehokkuus (Viljanen 2021).

Kohdennetut johtopäätökset toiminnan tehokkuudesta, kuten energian kulutuksen ja sillä saavutetun tuoton suhteesta tai tavoitteen ja tuoton suhteesta. Vastaa kysymykseen: Kuinka tehokkaasti järjestelmä(t) toimii?

Taulukko 19. Ohjelmien soveltuvuus toiminnan tehokkuuden arviointiin.

Ohjelma	Käyttökohde	Soveltuvuus
Microsoft Excel	Taulukoiden luonti, analysointi ja esitys	3
Google Sheets	Taulukoiden luonti, analysointi ja esitys	2
Blender 3D	3d-mallinnus- ja visualisointiohjelma	1
QGIS	Paikkatieto-ohjelma	1
ArcGIS	Paikkatieto-ohjelma	1
Python	Olio-ohjelmointikieli	1
Java	Olio-ohjelmointikieli	1
C++	Olio-ohjelmointikieli	1
ns-2 & ns-3	Verkkosimulaattori	2
OMNeT++, SIMUlte, Veins	Verkkosimulaattori	2
QualNet + EXata + Cyber	Verkkosimulaattori	2
OpenModelica	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	3
Dymola	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	3
SimulationX	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	3
Wolfram SystemModeler	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	3
MATLAB + Simulink	Dynamiikan simulointi ja analysointi	3
ANSYS + HFSS ja muut lisäosat	Dynamiikan simulointi ja analysointi	3
20-sim	Dynamiikan simulointi ja analysointi	3
FlexSim	Dynamiikan simulointi ja analysointi	3
R	Data-analyysit	2
SAS	Data-analyysit	2

5.8.2 Vikaantumistodennäköisyys



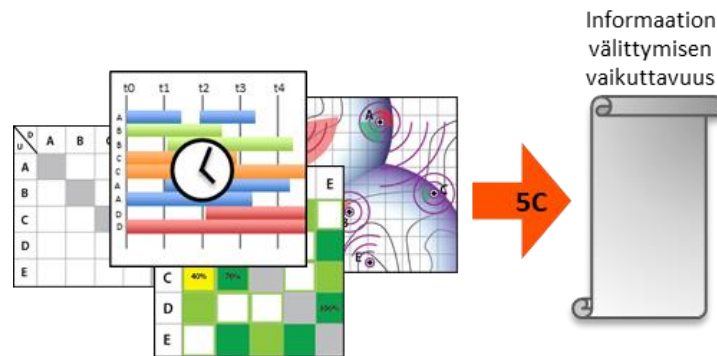
Kuva 52. Vaihe 5B Vikaantumistodennäköisyys (Viljanen 2021).

Vikaantuvuus on monen järjestelmän kohdalla yksi tärkeimmistä laadullisista asioista mitä halutaan selvittää. Langattomien järjestelmien kohdalla vikaantuvuudeksi voidaan periaatteessa katsoa yhteyksien toimimattomuudet määrittämättömistä tai kuuluvuuteen vaikuttavista syistä yhtäläisiksi. Simulaatioiden avulla voidaan arvioida myös rasitusta, lujuuslaskentaa ja lämmön siirtymää, joiden kautta on teoriassa mahdollista johtaa myös pidemmän aikavälin vikaantumisarvioita ilman kokeellisesti tuotettua pohjatietoa. Vastaa kysymykseen: Kuinka luotettavasti järjestelmä(t) toimii?

Taulukko 20. Ohjelmien soveltuvuus vikaantumistodennäköisyyksien arviointiin.

Ohjelma	Käyttökohde	Soveltuvuus
Microsoft Excel	Taulukoiden luonti, analysointi ja esitys	3
Google Sheets	Taulukoiden luonti, analysointi ja esitys	2
Blender 3D	3d-mallinnus- ja visualisointiohjelma	1
Python	Olio-ohjelmointikieli	1
Java	Olio-ohjelmointikieli	1
C++	Olio-ohjelmointikieli	1
ns-2 & ns-3	Verkkosimulaattori	3
OMNeT++, SIMUlte, Veins	Verkkosimulaattori	3
QualNet + EXata + Cyber	Verkkosimulaattori	3
OpenModelica	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	3
Dymola	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	3
SimulationX	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	3
Wolfram SystemModeler	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	3
MATLAB + Simulink	Dynamiikan simulointi ja analysointi	3
ANSYS + HFSS ja muut lisäosat	Dynamiikan simulointi ja analysointi	3
20-sim	Dynamiikan simulointi ja analysointi	3
FlexSim	Dynamiikan simulointi ja analysointi	3
R	Data-analyysit	3
SAS	Data-analyysit	3

5.8.3 Tilannetietoisuus



Kuva 53. Vaihe 5C. Tilannetietoisuus (Viljanen 2021).

Tilannetietoisuuden arvioinnin kannalta keskeinen kysymys on: Kuka tietää ja mitä? Eli kuinka tilannetietoisesti järjestelmä(t) toimii. Vaiheella pyritään saavuttamaan johtopäätökset informaation välittämisestä ja sen vaikuttavuudesta järjestelmän eri prosesseihin. Pohjatietona voidaan hyödyntää analyysejä kuuluvuuksista ja informaation välittämisestä.





Taulukko 21. Ohjelmien soveltuvuus tilannetietoisuuden arviointiin.

Ohjelma	Käyttökohde	Soveltuvuus
Microsoft Excel	Taulukoiden luonti, analysointi ja esitys	2
Google Sheets	Taulukoiden luonti, analysointi ja esitys	2
Blender 3D	3d-mallinnus- ja visualisointiohjelma	1
Unity	Pelimoottori	1
QGIS	Paikkatieto-ohjelma	2
ArcGIS	Paikkatieto-ohjelma	2
Python	Olio-ohjelmointikieli	1
Java	Olio-ohjelmointikieli	1
C++	Olio-ohjelmointikieli	1
ns-2 & ns-3	Verkkosimulaattori	3
OMNeT++, SIMUlte, Veins	Verkkosimulaattori	3
QualNet + EXata + Cyber	Verkkosimulaattori	3
OpenModelica	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	2
Dymola	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	2
SimulationX	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	2
Wolfram SystemModeler	Dynamiikan simulointi ja optimointi (Modelica)	2
MATLAB + Simulink	Dynamiikan simulointi ja analysointi	2
ANSYS + HFSS ja muut lisäosat	Dynamiikan simulointi ja analysointi	2
20-sim	Dynamiikan simulointi ja analysointi	2
FlexSim	Dynamiikan simulointi ja analysointi	2
R	Data-analyysit	2
SAS	Data-analyysit	2

5.9 Ohjelmien hyödynnettävyyden matriisi

Taulukko 22. Alla olevassa taulukossa koostettu arviot ohjelmien hyödynnettävyydestä kyberfysisten järjestelmien dynamiikan mallintamisen prosessiin.

Kyberfysisten järjestelmien dynamiikan mallintamisen prosessi	Ohjelman monikäyttöisyys (0-10)					2A KAPPALEIDEN MEKANIIKAN LASKENTAMALLIT			3 VISUALISOINTI			5A TOIMINNAN TEHO		
	0 REKONSTRUOINTI	1A YKSITTÄISEN JÄRJESTELMÄN MALLINNUKSEN	1B JÄRJESTELMIEN TOIMINNAN MALLINNUKSEN	1C TOIMINTAYMPÄRISTÖJEN MALLINNUKSEN	2B AALTOJEN ETENEMISEN, SATEILYN JA KENTTIEN LASKENTAMALLIT	2C INFORMATIION ETENEMISEN LASKENTAMALLIT	4A LIIKKEEN ANALYYSI	4B SUORITUSKYKYJEN ANALYYSI	4C TILANNEKUVAN ANALYYSI	5B VIKAANTUMISTODENNÄKÖISYYS	5C TILANNETIETOISUUS			
Arvio vaiheen ratkottavuudesta (0-10)	9	9	7	9	7	7	6	10	8	7	6	8	8	5
StarUML	3	3	3	3										
Modelio + sysML & MBSE	3	3	3	3										
Microsoft Visio	3	3	3	3										
Microsoft Excel	7	7	7	7					7	7	7	7	7	7
Google Sheets	5	5	5	5					5	5	5	5	5	5
PostgreSQL	1	1	1	1										
SQLite	1	1	1	1										
Blender 3D	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
3dsMax	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
SolidWorks	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Autodesk Inventor + EMS	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
OpenFOAM + Visual CFD	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Unity	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
QGIS	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
ArcGIS	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Python	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Java	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
C++	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Modelica (FMI, SSP, DCP)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
SPLAT!	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Altair Feko	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
ns-2 & ns-3	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
OMNeT++, SIMUte, Veins	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
QualNet + EXata + Cyber	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
OpenModelica	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Dymola	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
SimulationX	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Wolfram SystemModeler	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
MATLAB + Simulink	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
ANSYS + HFSS	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
20-sim	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
FlexSim	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
R	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
SAS	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

	Hyvin hyödynnettävissä
	Kohtalaisesti
	Välttävästi
	Ei selvää hyödynnettävyyttä

5.10 Dynamiikan mallintamisen yhteenveto

Kyberfyysisten järjestelmien mallintamiseen on olemassa useita valmiita ohjelmia, joilla voidaan kattaa yksi, useampi tai kaikki prosessin vaiheet. Erilaiset valmiit standardit tukevat keskeisesti mallinnusten toteuttamisessa.

Mahdollisuudet

- 1A YKSITTÄISEN JÄRJESTELMÄN MALLINNUS -vaihe tulisi ottaa huomioon uuden järjestelmän kehittämissä vaiheissa yhteydessä, mikäli järjestelmää halutaan arvioida mallintamalla jo ennen valmistuutta tai myöhemmin loppukäyttäjien toimesta osana isompaa kokonaisuutta.
- Valmiit standardien mukaiset järjestelmien mallit (esim. FMU tai FOM) voivat olla laajempikin etu kaupallisesti ja digitaalisten kaksosten näkökulmasta.
- Kyseessä on tietokonepelien kaltainen ongelma, johon voi olla sovellettavissa hyvin yllättäviäkin ohjelmien yhdistelmiä.
- Dynamiikan simulointiin tarkoitetuilla ohjelmilla voi toteuttaa useita vaiheita yhdessä ympäristössä.
- Modelica ohjelmointikieli voi täyttää useimmat vaatimukset toiminnallisten järjestelmämallien toteuttamisessa.

Haasteet

- Useiden erillisten ohjelmien käyttö voi hankaloittaa prosessin käyttöä tai vuorovaikutussuhteiden laskentaa ja analysointia esim. johtuen hyvin eri laatuista dataa.
- Simulaatioympäristön käyttöönotto voi olla liian haastavaa, siinä voi olla liikaa ominaisuuksia tai ne voivat olla osin rajoittuneita.
- Monimutkaisuus voi nostaa valmistelun vaikeaksi, tulosten epävarmuudet liian suuriksi tai tarvittavien iteraatioiden määrä kasvaa laskennallisesti liian suureksi.
- Teoriassa pienetkin puutteet tai virheet malleissa, voivat vaikuttaa merkittävästi simulaatioiden lopputuloksiin.
- Mallien ja simulaatioiden validointi voi olla haastavaa.

6 Kysely kyberalan tutkimuksesta ja kyberfyysisistä järjestelmistä

6.1 Kyselyn sisältö

Kyber- ja kyberfyysisen järjestelmän käsitteiden tunnettavuuden kartoittamiseksi on toteutettu kysely kyberalan asiantuntijoille ja ei-asiantuntijoille, joilla kuitenkin on tekninen tausta ja kiinnostus älykkään teknologian ratkaisuihin. Tarkoituksena on ollut luokitella vastaajat kahteen ryhmään, jolloin kaikille vastauksille on saatu taustaa siitä, millainen tieto on nykyään tekniikan alalla yleisesti omaksuttua ja minkälaiset näkemykset taas ovat nk. kyberalan asiantuntijoille ominaisia.

Kyselyn tarkoituksena on ollut kerätä näkökulmia siitä, millaisena kyber- käsite ja kyberalan kehitys nähdään. Kysely on toteutettu kyberfyysisen järjestelmien mallintamisen näkökulmasta ja tässä mittarina on käytetty sitä, kuinka paljon eri yhteyksissä kyberfyysisen järjestelmän käsite esiintyy ja miten käsite ymmärretään. Vastausten pohjustukseksi on esitelty viitekehyseseminaarin esitys ja sen sisältämä ASCIE-malli, josta on pyydetty kommentteja sen soveltuvuudesta kyberfyysisen järjestelmien mallintamiseksi erilaisissa sovelluksissa.

Kyselyn tuloksista on laadittu kvantitatiivinen aineisto, jossa vastaajia on pyydetty yksilöimään itsensä ainoastaan tittelin ja vapaaehtoisesti myös toimialan avulla ilman mainittua organisaatiota. Tittelin, työuran pituuden ja vastausten syvyyden pohjalta on arvioitu vastaajien asiantuntemuksen tasoa, jonka perusteella asiantuntijuuden ryhmäjako on toteutettu.

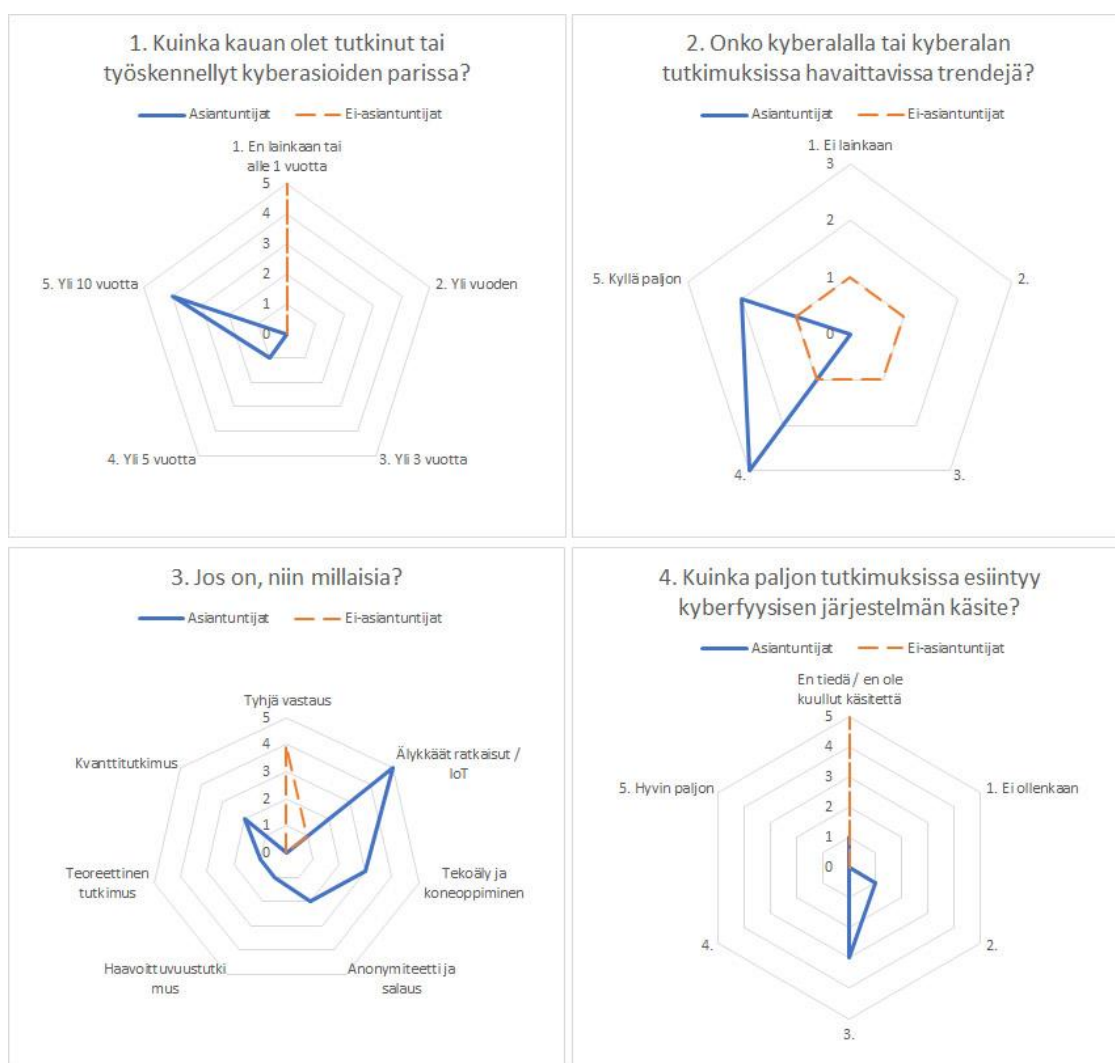
Kysely rakentuu seuraavanlaisista kysymyksistä:

- 1 Kuinka kauan olet tutkinut tai työskennellyt kyberasioiden parissa? (0 – yli 10 vuotta)
- 2 Onko kyberalan tutkimuksissa havaittavissa trendejä? (1 ei lainkaan – 5 kyllä, paljon)
- 3 Jos on, millaisia? (vapaa teksti)
- 4 Kuinka paljon tutkimuksissa esiintyy kyberfyysisen järjestelmän käsite? (En tiedä / en ole kuullut käsitettä, 1 ei ollenkaan – 5 hyvin paljon)
- 5 Ovatko kyberfyysiset järjestelmät tuttu käsitteenä? (1 ei ole – 5 on hyvinkin)

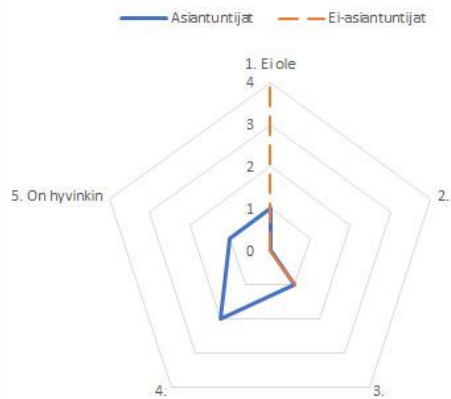
- 6 Tulisiko kyberalan tutkimuksissa hyödyntää enemmän mallintamista? (1 ei lainkaan – 5 kyllä, paljon)
- 7 Ymmärretäänkö mielestäsi cyber käsitteenä hyvin tai tulisiko määritelmää tarkentaa? (1 ei ymmärretä lainkaan – 3 ymmärretään melko hyvin, mutta joitain tarkennuksia tulisi tehdä – 5 kyllä ymmärretään hyvin, ei ole tarvetta tarkentamiselle)
- 8 Millainen tutkimus tukisi mielestäsi kyberalaa parhaiten tällä hetkellä? (vapaa teksti)
- 9 Pidätkö ASCIE-mallia soveltuvana kyberfyysisten järjestelmien mallintamisessa? (1 en lainkaan – 3 jossain määrin / en tunne asiaa – 5 kyllä, soveltuu hyvin)
- 10 Vapaa sana kyselystä, esityksestä ja ASCIE-mallista (vapaa teksti)
- 11 Extra. Pidätkö kyberalan asioita merkityksellisenä?

6.2 Kyselyn tulokset

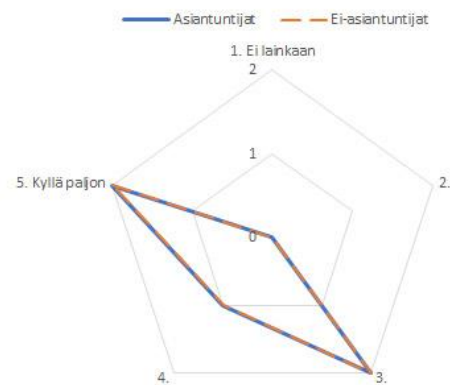
Tulokset ovat esitetty säteittäisen kaavion avulla, jossa nähdään samalla asiantuntijoiden ja ei-asiantuntijoiden vastausten jakaumat.



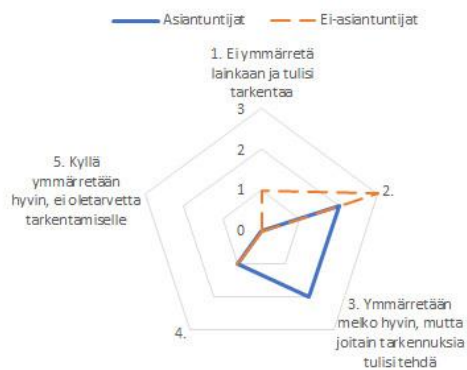
5. Ovatko kyberfyysiset järjestelmät tuttu käsitteenä?



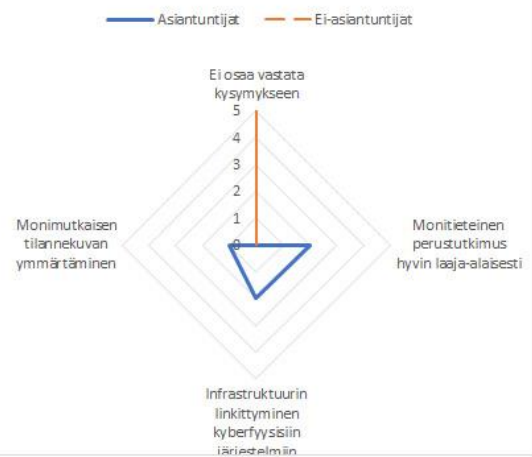
6. Tulisiko kyberalan tutkimuksissa hyödyntää enemmän mallintamisen keinoja?



7. Ymmärretäänkö mielestäsi kyber käsitteenä hyvin tai tulisiko määritelmää tarkentaa?



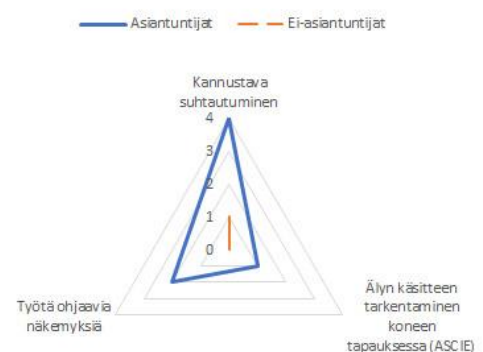
8. Millainen tutkimus tukisi mielestäsi kyberalaa parhaiten tällä hetkellä?

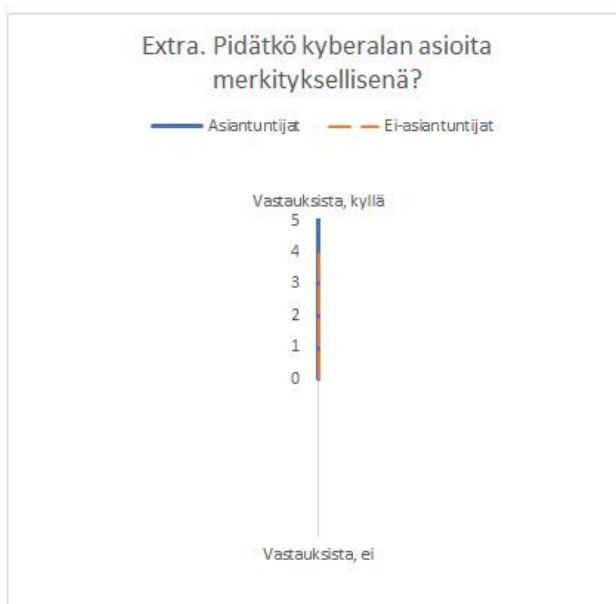


9. Pidätkö ASCIE-mallia soveltuvana kyberfyysisien järjestelmien mallintamisessa?



10. Vapaa sana kyselystä, esityksestä, määritelmistä ja ASCIE-mallista.





6.3 Kyselyn toteutus

Asiantuntijat koostuivat taustoiltaan erilaisista kyber- käsitteen parissa työskentelevistä digitalisaation asiantuntijoista, ICT-asiantuntijoista, sekä kybertutkijoista. Ei-asiantuntijoiksi luokitellut vastaajat koostuivat älykkään teollisuuden YAMK opiskelijoista, jotka ovat vastanneet kokemuksensa olevan kyberalalta ei ollenkaan tai alle vuoden. Kaikille osallistujille on esitelty alustukseksi viitekehysseminaarin esitys. Kyselyllä on saatu kumpaankin ryhmään 5 vastaajaa eli koko kyselyyn osallistui yhteensä 10 vastaajaa.

Kyselyä varten laadittiin Google Forms lomake, johon saatiin 6 vastausta viitekehysseminaarisesityksen lopussa. Viitekehysseminaarissa olleet vastaajat saivat vastata itsenäisesti lomakkeen avulla. Yksi viitekehysseminaarissa olleesta vastaajasta nostettiin asiantuntijaksi vastaustensa perusteella. Neljälle muulle asiantuntijalle esiteltiin viitekehysseminaarin esitys (esitysten kesto n. 45 min) henkilökohtaisesti käyttämällä Skypeä ja Zoomia, jonka päätteeksi kysely toteutettiin haastatteluna. Haastateltavat ovat nähneet kysymykset kaikissa tapauksissa ja ovat saaneet vastata kysymyksiin haluamallaan tavalla. Haastattelulanteet ovat teoriassa voineet vaikuttaa asiantuntijoiden vastausten laatuun, mutta toisaalta vastauksiin on täten voitu saada myöskin enemmän asiantuntijuuden syvyyttä.

6.4 Kyselyn johtopäätökset

Kaikkien asiantuntijoiden uran pituus kyberasioiden parissa oli yli 10 vuotta tai vähintään yli 5 vuotta, joka kertoi henkilöiden olevan riittävän kokeneita asiantuntijoiksi. Myös heidän tittelinsä ja muut vastaukset puhuivat asiantuntemuksensa puolesta.

Vastaajien mukaan kybertrendit painottuvat tällä hetkellä laajasti teknologiatutkimukseen, kuten älykkäisiin ratkaisuihin ja ohjelmistotekniikoihin, tekoälyyn ja verkossa toimimisen anonymiteetin säilyttämiseen, sekä tiedon salaamiseen. Tutkimuksia tehdään myös haavoittuvuustutkimuksen, teoreettisen tutkimuksen ja kvanttitutkimuksen alueilla. Ei-asiantuntijoiden on ollut vaikea määritellä muita kybertrendejä kuin IoT:n kaltaiset sovellukset.

Kyberfyysisen järjestelmän määritelmä oli käytännössä tuntematon muiden kuin asiantuntijoiden keskuudessa. Kaikille asiantuntijoillekaan määritelmä ei ollut aivan täysin tuttu, mutta pääsääntöisesti jonkinlainen käsitys kyberfyysisistä järjestelmistä oli. Käsité on esiintynyt niissä tutkimuksissa joihin asiantuntijat ovat perehtyneet, mutta ei mitenkään erityisen paljon. Erään vastaajan mukaan käsite on ollut käytössä jo 80 luvulta asti, joka oli jossain määrin pieni yllätys, mutta tarkemmin ajateltuna onhan käsite hyvin yleistieteellinen. Nykyteknologia mahdollistaa sellaisten laitteiden toteuttamisen, jotka voidaan aiempaa selvemmin luokitella kyberfyysisiksi järjestelmiksi ja näin ollen kyseiset järjestelmät tulevat vasta nyt osaksi arkipäivää.

Mallintamisen keinojen hyödyntämisessä olivat kummatkin vastaajaryhmät samoilla linjoilla. Kaikki vastaukset olivat myöskin jakautuneet keskilinan yläpuolelle eli erilaiset mallintamismenetelmät koetaan suhteellisen tasaisesti jossain määrin ja erittäin hyödyllisen väliltä. Jakautuneisuutta on kuitenkin selvästi havaittavissa, joten toisille mallintamisen hyödyt eivät oletettavasti näyttäytyä niin suurina kuin toisille. Alhaisempia arvosanoja voisi selittää toisten henkilöiden käytännönläheisempi orientoituminen tekniikan käyttöön ja käyttöönottoon, kuin

monimutkaisten mallinnusten toteuttamiseen suunnittelun tukena. Monimutkaisissa mallinuksissa on aina huomioitava abstraktius ja vaikea hahmotettavuus, jotka voivat hyötyjen lisäksi muodostaa kasvavaa epävarmuutta. Tähän kohtaan vastaajat eivät voineet vapaan tekstin perusteluja antaa, joten tarkempi selitys tältä osin jäänee uupumaan ja johtopäätökset ovat näin ollen spekulatiivisia.

Kyber- käsitteen ymmärtämisen osalta asiantuntijoilla oli hieman parempi käsitys, mutta yleinen käsitys kyberistä ja sen konkreettisesta sisällöstä on varsin heikko. Haasteena lienee sanan uutuus ja vieraskielinen alkuperä. Kieliopas suosittelee, että kyber- sanaa ei tulisi käyttää irrallisena, vaan aina muun sanan etuliitteenä. Tämä ei silti avaa sen sisältöä yhtään sen tarkemmin. Kyber- sanaa tulisi kyetä vertaamaan käsitteisiin tieto, informaatio tai fysiikka, jotka ovat useimmille tutumpia käsitteitä jo peruskoulusta. Voinee olettaa, että nykypäivänä peruskoulussa kyber- sanan määritelmää käsiteltäisiin jo paljonkin. Haastatteluissa heräsi myös jonkinlaista ärtymystä koko kyber- sanan käytölle ja haluja jopa siitä luopumiselle ilmeni haastateltavien kanssa keskustellessa.

Asiantuntijoiden mukaan kysyntää olisi erityisesti monitieteelliselle tutkimukselle ja hyvin laaja-alaisella näkökulmalla. Kaikenlaisen infrastruktuurin kytkeytymisestä kyberiin ja kokonaisuuksista muodostuvan monimutkaisen tilannekuvan ymmärtämisen parantamiseksi olisi myös kysyntää.

ASCIE-mallin osalta kaikkien muiden kuin asiantuntijoiden osaaminen ja myös kahden asiantuntijan osaaminen ei riittänyt arvioimaan mallin hyödynnettävyyttä. Kenenkään mielestä malli ei kuitenkaan osoittanut selvää kelvottomuuttaan. Yhden asiantuntijan mielestä malli on selvästi hyödynnettävissä ja kahden asiantuntijan mielestä malli vaikuttaa kelvolliselta pienin hienosäädöin. Näin ollen mallin hyödynnettävyydestä on saatu myönteistä palautetta ja kelvollisuutta käsitteeksi lienee mahdollista arvioida.

Yleisesti ottaen esityksestä ja kyselystä tuli hyvinkin kannustavaa palautetta. Kahden asiantuntijan osalta palaute sisälsi työtä ohjaavia näkemyksiä, jotka oli-

vat oikein kaivattuja. Mielenkiintoisin kommentti painottui ASCIE-mallin I-kohtaan eli älyn määritelmään tilanteessa, jossa puhutaan koneälystä vrt. ihmisäly. Tämän perusteella työssä on tarkennettu älyn käsitettä.

Lisäksi kyselyn extra osuuden vastausten perusteella kävi selväksi, että käytännössä kaikki vastaajat asiantuntijuuden tasosta riippumatta pitivät kyberalan asioita merkityksellisinä.

6.5 Kyselyn yhteenveto

Jos vastaajien vastaukset olisivat sekoitettu yhteen, olisi kyselyssä menetetty tulosten vertailtavuus. Asiantuntijoiden vastaukset olivat sisällöltään selvästi monimuotoisemmat. Paras vuorovaikutus, vapaat kommentit ja henkilökohtaisesti saatu tuki työn jatkamiseksi saatiin erikseen haastatelluilta asiantuntijoilta. Kyber-, sekä kyberfyysisten järjestelmien käsitteet eivät olleet vastausten perusteella missään nimessä täysin selviä ei-asiantuntijoille, mutta ei myöskään kailta osin haastatelluille asiantuntijoille. Aihealueeseen suhtauduttiin positiivisuudella, joka herätti paljon muutakin hyvää keskustelua.

7 Yhteenveto

7.1 Yleisesti

Alussa tutkimuksen tekeminen vaikutti melko monimutkaiselta ja aihealueen abstraktius aiheutti pitkään suuria haasteita. Työ haastoi merkittävässä määrin opettelemaan erilaisen käsitteistön hyödyntämistä tutkimuksen teossa, sekä hakemaan kaikenlaista aiheeseen liittyvää tietoa kattavasti. Alussa kyberfyysisen järjestelmän määritelmä ei ollut kirjoittajalle lainkaan tiedossa oleva käsite, vaan ongelmaa tuli lähestyttyä enemmän teoreettisen ”äly-yksiköksi” kuvatun mallin kautta, joka piti sisällään ASCIE-mallin mukaiset elementit. Kaikesta huolimatta näkemys siitä, mitä työn tulisi pitää sisällään oli olemassa. Tätä kiintopistettä kohti työssä on edetty tutkimalla, sekä ohjelmoimalla visualisointiohjelmaa ASCIE-mallin demonstroimiseksi käytännössä.

Työn kuvaaminen keskeneräisenä oli ajoittain haastavaa, mutta useiden väliesittelyjen pitäminen tuki työn sisällön ja rakenteen kehittymistä. Pitkällä 3d-mallinnustaustalla oli osaltaan vaikutus mm. mallintamisen kokonaisuuden määrittelyssä. Kyselyn tulosten ja aihealueeseen liittyvien hakutulosten analysoinnin perusteella, tämän kaltaiselle työlle ja tutkimukselle vaikuttaisi olevan selvää kysyntää.

7.2 Mallinnusmenetelmien hyödyntäminen käytännössä

- Kyberfyysisten järjestelmien mallintaminen soveltuu hyvin monimutkaisiin kokonaisuuksiin, joissa useiden sensoreiden muodostama jaettu tilannekuva ja sen pohjalta toteutettavat muutokset eri järjestelmissä ovat ilmeinen vaatimus.
- Esimerkiksi erilaisten autonomisten ajoneuvojen ja niiden keskeisten ominaisuuksien, sekä adhoc-verkkojen (VANET / MANET / FANET) simulointi voisi olla yksi soveltamisen kohde.
- Kyky suunnittelun alla olevan järjestelmän toimivuuden, tehokkuuden ja luotettavuuden arviointiin etupainoisesti vähentää jo järjestelmän kehitysvaiheessa epävarmuuksia ja edistää tällaisen kehitysprojektin etenemistä.
- Kriittisten riskien tunnistaminen ajoissa.

7.3 Tutkimuksen onnistuminen

Haasteista huolimatta tutkimus onnistui kirjoittajan omasta näkökulmasta varsin hyvin. Suurin haaste oli kyetä luomaan käsitteistöltään ehyt, johdonmukainen ja perusteltu kuvaus kyberfyysisten järjestelmien mallintamisesta. Aihealue oli kyberfyysisten järjestelmien osalta tavallaan täysin uusi ja vieras, mutta toisaalta mallintamisen kannalta hyvin tuttu. Tutkimus edellytti syventymistä erityisesti niihin järjestelmätekniisiin osa-alueisiin, jotka olivat tutkimuksen tekoa aloittaessa vähemmän tuttuja, kuten IoT, mobiiliverkot ja järjestelmämallit. Aiheeseen perehtyminen johti hyvin mielenkiintoisen, mutta myös tulevaisuuteen katsovan tutkimushaasteen ympärille. Kirjoittajan oma arvio on, että työllä voisi olla paljonkin hyödynnettävyyttä erityisesti osaamisen kartuttamisessa ja järjestelmien suunnittelun laadullisessa parantamisessa.

- Yhden pienemmän osa-alueen tutkiminen olisi ollut vaikea sitoa selkeästi mihinkään kontekstiin.
- Työllä luotiin konteksti monimutkaiselle haasteelle ja siksi se on osin abstrakti ja innovatiivinen selvitystyö erilaisista käsitteistä, sekä järjestelmien mallintamiseen liittyvistä mahdollisuuksista.
- Aiheesta pystyi tuottamaan useita konkreettisia kuvauksia, kuten kuvia, joilla abstraktiutta on pyritty vähentämään.
- Luo edellytyksiä jatkotutkimuksille.
- Paljon opittua eri käsitteistä ja yleisesti tutkimuksen tekemisestä.

7.4 Jatkokehittävää

Jatkokehityksenä tälle tutkimustyölle tulisi toteuttaa paljon lisää kehitysluonteista tutkimusta ja perehtymistä tässä työssä löydettyihin ohjelmiin, menetelmiin ja standardeihin. Kyberfyysisten järjestelmien dynamiikan mallintamisen prosessi ei ole valmis ja validoitu menetelmä, mutta se muodostaa käsityksen järjestelmien mallintamiseksi. Lopullisessa käytössä mallien ja menetelmien tarkastaminen ja hyväksyntä voi olla kriittinen vaatimus, jotta tuloksia voidaan pitää uskottavina. Esimerkiksi käyttämällä IEEE 1012 V&V (Software verification and validation) tai IEEE 1516-2010 (High Level Architecture) standardeja tai muuta ulkopuolista tarkastajaa. Validointi kannattaisi pitää kaikissa mallintamiseen liittyvissä tutkimuksissa yhtenä osana, mikäli mahdollista. Validointi-standardeilla ja kriittisellä arvioinnilla kyetään tukemaan tulosten luotettavuuden lisäksi mallintamisen tieteellistä uskottavuutta.

Lähteet

- 20-sim. 2021. Introduction to 20-sim. [Viitattu 7.5.2021]. Saatavissa: <https://www.20sim.com/overview/introduction/>.
- Bartodziej, C J. 2016. The Concept Industry 4.0. Springer. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-16502-4>
- Britannica. 2014. Cybernetics. Artikkel. [Viitattu 5.2.2021]. Saatavissa: <https://www.britannica.com/science/cybernetics>
- Britannica. 2021. Norbert Wiener. Artikkel. [Viitattu 5.2.2021]. Saatavissa: <https://www.britannica.com/biography/Norbert-Wiener>.
- Bruegge, B. 2006. Dynamic Modeling. Software Engineering 1. Lecture 10. Technische Universitaet Muenchen. [Viitattu 14.5.2021]. Saatavissa: https://ase.in.tum.de/lehrstuhl_1/files/teaching/ws0607/Software%20Engineering%20I/L10_DistDynamicModeling.pdf.
- Coronado Systems. 2000. Introduction to feedback control systems. Saatavissa: http://www.cim.mcgill.ca/~ialab/ev/Intro_control1.pdf.
- COSSIM. 2015. A Novel, Comprehensible, Ultra-Fast, Security-Aware CPS Simulator. Tavoite. CORDIS. Euroopan komissio. Horizon 2020. [Viitattu 2.5.2021]. Saatavissa: <https://cordis.europa.eu/project/id/644042>.
- CTT. 2020. RadioPlanner 2.1. Radiotaajuuksien etenemisen suunnitteluohjelmiston esittely. [Viitattu 1.1.2021]. Saatavissa: <https://www.wireless-planning.com/radioplanner>.
- DoD. 2011. Modeling and Simulation (M&S) Glossary. [Viitattu 6.5.2021]. Saatavissa: <https://www.acqnotes.com/Attachments/DoD%20M&S%20Glossary%201%20Oct%2011.pdf>.
- EcosimPro. 2018. Exporting models using FMI standard. PROOSIS. [Viitattu 4.3.2021]. Saatavissa: <https://www.ecosimpro.com/exporting-models-using-fmi-standard/>.
- Elisa. 2020. Kuuluvuuskartta. [Viitattu 5.11.2020]. Saatavissa: <https://elisa.fi/kuuluvuus/>.
- FINTO. 2021. Informaatioympäristö. KOKO-ontologia. [Viitattu 3.5.2021]. Saatavissa: <https://finto.fi/koko/fi/page/p65493>.
- Frangos, J-M. 2017. <https://www.weforum.org/agenda/2017/06/internet-of-things-will-power-the-fourth-industrial-revolution/>.

Heo, N. Varshney, P K. 2005. Energy-efficient deployment of Intelligent Mobile sensor networks. Julkaisu. DOI:10.1109/TSMCA.2004.838486. Saatavissa: <https://doi.org/10.1109/TSMCA.2004.838486>.

IBM. 2021. What is a digital twin?. [Viitattu 3.5.2021]. Saatavissa: <https://www.ibm.com/topics/what-is-a-digital-twin>.

iCyPhy. 2021. Mission Statement. Berkeley. [Viitattu 6.5.2021]. Saatavissa: <https://www.icyphy.org/>

IEEE. 2010. IEEE 1516-2010 - IEEE Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA)-- Framework and Rules. Saatavissa: <https://standards.ieee.org/standard/1516-2010.html>.

IONOS. 2020. Ethernet frame: definition and variants of the frame format. [Viitattu: 3.5.2021]. Saatavissa: <https://www.ionos.com/digitalguide/server/know-how/ethernet-frame/>.

ISO. 1987. OSI-model. ISO ICS 35.100 standardi. [Viitattu 7.2.2021]. Saatavissa: <https://www.iso.org/ics/35.100/x/>.

ITEA3. 2021. openCPS. Project description. [Viitattu 6.5.2021]. Saatavissa: <https://itea3.org/project/opencps.html>.

Jin, Z. 2018. Environment Modeling-Based Requirements Engineering for Software Intensive Systems. ISBN: 978-0-12-801954-2. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/C2014-0-00030-5>.

JYU. 2010. Naivismi. Koppa. [Viitattu: 6.5.2021]. Saatavissa: <https://koppa.jyu.fi/avoimet/taiku/taidehistorian-aikajana/modernismi/1800-luvun-modernismi/naivismi>.

JYU. 2014. Tutkimusstrategiat. Koppa. [Viitattu: 11.3.2021]. Saatavissa: <https://koppa.jyu.fi/avoimet/hum/menetelmapolkuja/menetelmapolku/tutkimusstrategiat/>.

Keskinen, M. 2019. Nokia. Esitys. [Viitattu 27.12.2020]. Saatavissa: https://www.univaasa.fi/fi/sites/vaasa5g/mobile_network_evolution_to_5g_17052019_nokia_keskinen.pdf.

Keysight Technologies. 2021. Introduction to OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing. [Viitattu 7.5.2021]. Saatavissa: http://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/89600B/WebHelp/Subsystems/wlan-ofdm/content/ofdm_basicprinciplesoverview.htm.

Kielitoimiston sanakirja. 2021. Fysiikka. [Viitattu 7.5.2021]. Saatavissa: <https://www.kielitoimistonsanakirja.fi/#/fysiikka>.

Kilkki, K. 2019. Informaatioteknologian perusteet. Oppimateriaali. [Viitattu 4.5.2021]. Saatavissa: https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/889534/mod_resource/content/8/Informaatioteknologian%20perusteet.pdf.

Klüpfel, H. 2009. Crowd Dynamics Phenomena, Methodology, and Simulation. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1108/9781848557512-010>.

Kuusisto, R. 2005. Tilannekuvasta täsmäjohtamiseen. Johtamisen tietovirrat kriisin hallinnan verkostossa. Liikenne- ja viestintäministeriö. [Viitattu 6.5.2021]. Saatavissa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/78700/Jul-kaisu_81_2005.pdf?sequence=1.

Laine, H. 1996. Oliosanasto. Helsingin yliopisto. [Viitattu 3.5.2021]. Saatavissa: <https://www.cs.helsinki.fi/u/laine/oliosanasto/>.

Lee, E A. 2021. Cyber-Physical Systems. [Viitattu 7.2.2021]. Saatavissa: <https://ptolemy.berkeley.edu/projects/cps/>.

Lee, E A. 2018. Models of timed systems. Mälardalens Högskola. Luento. [Viitattu 10.5.2020]. Saatavissa: https://play.mdh.se/media/t/0_tvle844g.

Lexico. 2021. Transducer. Sanakirja. Oxford University. [Viitattu 7.5.2021]. Saatavissa: <https://www.lexico.com/definition/transducer>.

Mathworks. 2021. Cyber-Physical Systems. Model-Based Design of cyber-physical systems in MATLAB and Simulink. [Viitattu 15.4.2020]. Saatavissa: <https://se.mathworks.com/discovery/cyber-physical-systems.html>.

Mensa. 2013. Mitä on älykkyys?. [Viitattu 7.5.2021]. Saatavissa: https://www.mensa.fi/wordpress/?page_id=12.

Modelica. 2021. Language Specification. Version 3.5. The Modelica Association. [Viitattu: 3.5.2021]. Saatavissa: <https://modelica.org/documents/MLS.pdf>.

Molfino, R. Carca, E. Zoppi, M. Bonsignorio, F. Callegari, M. Gabrielli, A. Principi, M. 2008. A Multi-Agent 3D Simulation Environment for Clothing Industry. University of Genova. Saatavissa: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-89076-8_9.

MPKK. 2014. Kybertaistelu 2020. Kybertoimintaympäristö. ISBN:978-951-25-2618-5. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-25-2618-5>.

NCTA. 2020. Growth In The Internet of Things. Kuvaaja. [Viitattu: 3.5.2021]. Saatavissa: https://www.ncta.com/chart/growth-in-the-internet-of-things?share_redirect=%2Ftopics#colorbox=node-2755.

Newitz, A. 2013. The Bizarre Evolution of the Word "Cyber". Gizmodo. Artikkel. [Viitattu 1.4.2021]. Saatavissa: <https://io9.gizmodo.com/today-cyber-means-war-but-back-in-the-1990s-it-mean-1325671487>.

NIST. 2021. Cyberspace definition. National Institute of Standards and Technology. [Viitattu 7.2.2021]. Saatavissa: <https://csrc.nist.gov/glossary/term/cyberspace>.

Notebookcheck.net. 2020. Vertailu. [Viitattu 4.7.2020]. Saatavissa: www.notebookcheck.net/Mobile-Processors-Benchmark-List.2436.0.html?

Oracle. 2021. Object-Oriented Programming Concepts - What is an Object. Oliomalli. [2.5.2021]. Saatavissa: <https://docs.oracle.com/javase/tutorial/java/concepts/object.html>.

Pappas, G. 2008. A Theory of Robustness for Cyber-Physical Systems. Luento. University of Pennsylvania. CITRIS. [Viitattu: 15.4.2020]. Saatavissa: <https://www.youtube.com/watch?v=CZl6qdVGeQE>.

Pritchett, A. Lee, S. Huang, D. Goldsman, D. 2000. Hybrid-system simulation for national airspace system safety analysis. Georgia Institute of Technology. Konferenssipaperi. Saatavissa: <https://doi.org/10.1109/WSC.2000.899076>.

Rizzon, L. 2016. Cyber-Physical Systems: two case studies in design methodologies. Väitöskirja. Università degli Studi di Trento. Saatavissa: <http://eprints-phd.biblio.unitn.it/1786/1/thesis.pdf>.

Russel, S. Norvig, P. Hyvönen, E. 2004. Älykkäät agentit. Helsingin yliopisto. Oppimateriaali. [Viitattu: 2.5.2021]. Saatavissa: <https://www.cs.helsinki.fi/u/eahyvone/courses/tekoaly04/2AlykkaatAgentit2004-09-20.pdf>.

Sahakangas, J. 2019. Koneoppiminen. Peliä oppiva ohjelma. Opinnäytetyö. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201905098512>.

Sayama, H. 2019. Introduction to the Modeling and Analysis of Complex Systems. LibreTexts. Avoin kirjoitus. PDF-muodossa. [Viitattu 7.2.2021]. Saatavissa: <https://math.libretexts.org/@go/page/7767>.

Sdxcentral. 2021. What Is SDx. [Viitattu 16.4.2021]. Saatavissa: <https://www.sdxcentral.com/cloud/definitions/software-defined-everything-sdx-part-1-definition/>.

Siemens. 2019. SystemC FMU for Verification of Advanced Driver Assistance Systems. Verification Academy. [Viitattu: 3.5.2021]. Saatavissa: SystemC FMU for Verification of Advanced Driver Assistance Systems.

Sievert, N. 2016. Modelica Models in a DistributedEnvironment Using FMI and HLA. Linköping University. [Viitattu 7.5.2021]. Saatavissa: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:971217/FULLTEXT01.pdf>

Smith, D J. Simpson, K G L. 2010. The Safety Critical Systems Handbook. IEC 61508-2010. Vikaantumistodennäköisyys (PFD). ISBN: 978-0128207000.

STUK. 2019. Matkapuhelinverkon toiminta ja tukiasemat. [Viitattu: 2.5.2021]. Saatavissa: <https://www.stuk.fi/aiheet/matkapuhelimet-ja-tukiasemat/matkapuhelinverkko/matkapuhelinverkon-toiminta-ja-tukiasemat>.

Sun, Y. He, Y. Meng, W. Zhang, X. 2018. Voronoi Diagram and Crowdsourcing-Based Radio Map Interpolation for GRNN Fingerprinting Localization Using WLAN. Artikkel. Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/s18103579>.

Suomisanakirja.fi. 2021. Dynaaminen. [Viitattu 7.5.2021]. Saatavissa: <https://www.suomisanakirja.fi/dynaaminen>.

Tareque, H. Hossain, M S. Atiquzzaman, M. 2015. On the Routing in Flying Ad hoc Networks. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.15439/2015F002>.

TEPA. 2021a. Kyber-. TSK. TEPA termipankki. [Viitattu: 3.5.2021]. Saatavissa: <https://termipankki.fi/tepa/en/search/kyber->.

TEPA. 2021b. Kyberavaruus. TSK. TEPA termipankki. [Viitattu: 3.5.2021]. Saatavissa: <https://termipankki.fi/tepa/en/search/kyberavaruus>.

TEPA. 2021c. Suorituskyky. TSK. TEPA termipankki. [Viitattu: 6.5.2021]. Saatavissa: <https://termipankki.fi/tepa/en/search/suorituskyky>.

TEPA. 2021d. Järjestelmä. TSK. TEPA termipankki. [Viitattu: 7.5.2021]. Saatavissa: <https://termipankki.fi/tepa/fi/haku/j%C3%A4rjestelm%C3%A4>.

Tiihonen, T. 2010. Simulointi. Luento 1 aineisto. Jyväskylän yliopisto. [Viitattu 6.5.2021]. Saatavissa: http://users.jyu.fi/~tiihonen/simul/luennot/luento1/Simulointi_luento1.pdf.

Tilastokeskus. 2021. Käsitteet. Ympäristö. [Viitattu 3.5.2021]. Saatavissa: <https://www.stat.fi/meta/kas/ymparisto.html>.

Tuominen, M. 2000. Vikasietoisuus reaaliaikaisissa hajautetuissa järjestelmissä. Helsingin yliopisto. Avoimien hajautettujen järjestelmien seminaari. Google-välimuisti. [Viitattu 3.5.2021]. Saatavissa: <https://www.cs.helsinki.fi/u/summanen/opetus/2000/AHJO/artikkelit/mt.ps>.

Uusiteknologia.fi. 2021. Telia sulkee 3G-verkkonsa 2023 – GSM jatkuu. Uutinen. [Viitattu 6.5.2021]. Saatavissa: <https://www.uusiteknologia.fi/2021/02/01/te-lia-sulkee-3g-verkkonsa-2023-gsm-jatkuu/>.

Viljanen, V. 2012. Direct3D HLSL-shaderit. Theseus. Opinnäytetyö. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201205066495>.

Viljanen, V. 2020. Tutkimusta varten tuotetut valokuvat, kaaviot ja mallinnukset.

Viljanen, V. 2021. Tutkimusta varten tuotetut valokuvat, kaaviot ja mallinnukset.

Wikipedia. 2021a. Feedback. [Viitattu 7.2.2021]. Saatavissa: <https://en.wikipedia.org/wiki/Feedback>.

Wikipedia. 2021b. Fifth Dimension Operations. [Viitattu 3.5.2021]. Saatavissa: https://en.wikipedia.org/wiki/Fifth_Dimension_Operations.

Wikipedia. 2021c. Imaging. [Viitattu 2.5.2021]. Saatavissa: <https://en.wikipedia.org/wiki/Imaging>.

Wikipedia. 2021d. Mallintaminen. [Viitattu 3.5.2021]. Saatavissa: <https://fi.wikipedia.org/wiki/Mallintaminen>.

Wikipedia. 2021e. Space. [Viitattu 7.2.2021]. Saatavissa: <https://en.wikipedia.org/wiki/Space>.

Wikipedia. 2021f. 3D modeling. [Viitattu 7.5.2021]. Saatavissa: https://en.wikipedia.org/wiki/3D_modeling

Wikisanakirja. 2021. Hybridi. [Viitattu 3.5.2021]. Saatavissa: <https://fi.wiktionary.org/wiki/hybridi>.

Zamani, H. 2018. Technical Committee On Hybrid Systems. Hybrid Systems. IEEE. Control Systems Society (CSS). [Viitattu: 3.5.2021]. Saatavissa: <http://hybrid-systems.iececss.org/hybrid-page>

