VIRTUAALISEN KÄYTTÖÖNOTON VAIKUTUKSET PROJEKTITOIMITUKSESSA

Suunnittelun ja käyttöönoton tehostaminen

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan Industrial IoT-koulutusohjelman diplomityö

2022

Jukka Uotila

Tarkastajat: Professori Jero Ahola

TkT Tuomo Lindh

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Teknis-luonnontieteellinen

Sähkötekniikka

Jukka Uotila

Virtuaalisen käyttöönoton vaikutukset projektitoimituksessa

Suunnittelun ja käyttöönoton tehostaminen

Sähkötekniikan Industrial IoT-koulutusohjelman diplomityö

2022

102 sivua, 24 kuvaa, 12 taulukkoa, 2 kaaviota ja 2 liitettä

Tarkastaja: Professori Jero Ahola ja TkT Tuomo Lindh

Avainsanat: Virtuaalinen käyttöönotto, digitaalinen kaksonen, toimitusprojekti

Diplomityössä selvitettiin virtuaalisen käyttöönoton vaikutuksia projektitoimituksessa. Tavoitteena oli suunnittelun sekä käyttöönoton tehostaminen. Tutkimus toteutettiin Siemens Osakeyhtiön ja Raute Oyj välisessä yhteistyöprojektissa. Kirjallisuuskatsauksessa selvitettiin digitaalisen kaksosen ja virtuaalisen käyttöönoton soveltamista suunnittelussa ja käyttöönotossa. Projektitoimituksen osalta selvitettiin onnistuneen projektin elementit.

Tutkimus aloitettiin kvalitatiivisilla puolistrukturoiduilla haastatteluilla, joiden avulla kartoitettiin Raute Oyj:n projektitoimituksen haasteet. Haastattelun tuloksia käytettiin määrittämään virtuaalisen käyttöönoton tavoitteita, joiden pohjalta valittiin Siemens Digital Enterprise -portfoliosta sopiva ratkaisu tekniseen toteutukseen. Vaikutuksen arvioimeksi valittiin sekä määrällinen, että laadullinen mittari.

Tekninen toteutus tehtiin tapaustutkimuksena osana Raute Oyj:n projektitoimitusta. Virtuaalisen käyttöönoton kohteena oli nelitasoinen viilunpaikkauslinja, josta rajattiin soveltuva kokonaisuus. Virtuaalisen käyttöönoton ympäristö toteutettiin palveluna Siemens Osakeyhtiön toimesta ja virtuaalinen käyttöönotto sisällytettiin osaksi Raute Oyj:n suunnittelua ja projektitoimitusta.

Virtuaalisen käyttöönoton avulla alitettiin projektitoimituksen suunnitteluun ja käyttöönottoon varattu tuntimäärä. Lisäksi projektitoimituksen laatu parani ja joustavuus lisääntyi. Johtopäätöksissä esitetään virtuaalisen käyttöönoton skaalaamisen haasteet ja edellytykset.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Engineering Science

Electrical Engineering

Jukka Uotila

Impacts of virtual commissioning on project delivery

Increase the performance of engineering and commissioning

Master's thesis

2022

102 pages, 24 figures, 12 tables, 2 charts and 2 appendices

Examiners: Professor Jero Ahola and TkT Tuomo Lindh

Keywords: Virtual commissioning, digital twin, project delivery

Impacts of virtual commissioning on project delivery was studied in this master's thesis. The target was to enhance engineering process and commissioning. The research was carried out as a co-operation project between Siemens Osakeyhtiö and Raute Oyj. The literature review addressed digital twin and virtual commissioning usage in engineering and commissioning. Regarding to project delivery, the elements of successful project were reviewed.

The research was started with qualitive semi-structured interviews which were used to clarify challenges of Raute Oyj's project delivery. The results were used to determine targets for virtual commissioning and a suitable technical solution was selected from Siemens Digital Enterprise portfolio. Both quantitative and qualitative measures were selected to evaluate the effects.

The technical implementation was carried out as a case study as a part of Raute Oyj's project delivery. The four-level veneer patching line was the target for the virtual commissioning and a suitable scope was defined. The solution was implemented as a service by Siemens Osakeyhtiö and the virtual commissioning was integrated to Raute Oyj's engineering and project delivery process.

By means of virtual commissioning, the working hours used for project delivery engineering and commissioning went below the allocated number of hours. In addition, the quality of project delivery improved and flexibility increased. In the conclusions chapter, the challenges and conditions of scaling up the virtual commissioning are presented.

KIITOKSET

Diplomityö sai alkunsa tammikuussa 2020, kun yhteistyötä Siemens Osakeyhtiön ja Raute Oyj:n välillä lähdettiin syventämään. Yhteistyön keskipisteessä ovat ihmiset ja haluankin kiittää kaikkia mukana olleita henkilöitä avoimista keskusteluista, ajatusten vaihdosta sekä tekemiseen tarttumisesta. Tämä diplomityö ei olisi valmistunut ilman hyvää yhteistyötä.

Erityiskiitokset kuuluvat:

- Omalle puolisolleni, joka jaksoi kannustaa ja mahdollisti diplomityön tekemiseen arjen keskellä
- Diplomityön ohjaajille Tuomo Lindhille sekä Lars Mauralle hyvistä keskusteluista ja ajatusten vaihdosta
- Työnantajalle opiskelun tukemisesta. Opiskeluiden suorittaminen työn ohessa olisi ollut vielä haastavampaa ilman työnantajan joustoa.

Diplomityön tekemisen voi kiteyttää lastenrunoon nimeltä Ihmisen elo, jonka lukeminen esikoiselleni oli osa iltarutiineja ennen kirjoittamisen jatkamista:

Vehreä mänty, ei mikään kelo.

Semmoista on tämä ihmisen elo.

Etsiä löytää ja jälleen etsiä.

Puita on paljon.

Olemme metsiä.

- Jukka Itkonen

Espoossa 5.3.2022

Jukka Uotila

LYHENNELUETTELO

Lyhenteet

API	Application Programming Interface, ohjelmointirajapinta
Ethernet	Pakettipohjainen lähiverkkoratkaisu
FAT	Factory Acceptance Test, tehdastesti, jossa ohjausjärjestelmän toiminta testataan toiminta- ja vaatimusmäärittelyjä vastaavaksi
HIL	Hardware-in-the-loop, simulointimenetelmä, jossa ohjausjärjestelmä kytketään virtuaaliseen malliin
HMI	Human Machine Interface, käyttöliittymä
IoT	Internet of Things, Esineiden Internet
I/O	Input / Output, tulot ja lähdöt
JT	Jupiter Tessellation, ISO-standardoitu 3D-tiedostomuoto
LVL	Laminated veneer lumber, viilupuu
MCD	Mechatronics Concept Designer, Siemensin NX-suunnitteluohjelmiston laajennusosa 3D-mallien simulointiin
NX	Siemensin 3D-suunnitteluohjelmisto
OPC	Open Platform Communications, joukko tiedonsiirron standardeja, joita käytetään teollisuuden automaatiosovelluksissa.
PEMS	Prototypical Engineering Modeling and Simulation, Ympäristö, jossa ylläpidetään simulointimalleja
PIP	Process image partitions, prosessikuvan alueet
PLC	Programmable logic controller, ohjelmoitava logiikka
PLM	Product Lifecycle Management, Tuotteen elinkaaren hallinta

PROFIdrive-telegram	Kommunikointisanoma PLC:n ja sevo- sekä taajuusmuuttajakäyttöjen välillä
PROFIsafe-teleram	Turvakommunikointisanoma PLC:n ja servo- sekä taajuusmuuttajakäyttöjen välillä
PROFINET	Process Fiel Net, Ethernet standardi teollisuudessa
SAT	Site Acceptance Test, hyväksymistestaus, joka sisältää vaatimusten täyttymysten tarkastelun
SIL	Software-in-the-loop, simulointimenetelmä, jossa simuloitu ohjausjärjestelmä kytketään virtuaaliseen malliin
SIMIT	Siemensin simulointiohjelmisto toimilaitteiden ja prosessien simulointiin
SMG	Simulation model generator, Simulointimallin automaattisen luomisen työkalu
TIA Portal	Totally Integrated Autmation Portal, Siemensin suunnitteluohjelmisto automaatiolle
VDA	Veneer Defect Analyzer, Konenäköjärjestelmä viilun vikojen tunnistuksessa
3D	3-Dimensional, kolmiulotteinen

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Kiitokset

Lyhenneluettelo

1 Johdanto ... 10
1.1 Tutkimuksen tavoitteet ... 11
1.2 Tutkimusongelma ja kysymykset ... 11
1.3 Tehdyt rajaukset ja tutkielman rakenne ... 12
2 Digitaalinen kaksonen ja virtuaalinen käyttöönotto ... 14
2.1 Digitaalinen kaksonen ... 14
2.1.1 Digitaalisen kaksosen käyttökohteet suunnittelussa ... 17
2.1.2 Digitaalisen kaksosen käyttöönoton haasteet ... 20
2.1.3 Digitaalisen kaksosen ja virtuaalisen käyttöönoton välinen yhteys ... 20
2.2 Virtuaalinen käyttöönotto ... 21
2.2.1 Aikaisemmat tutkimukset virtuaalisesta käyttöönotosta ... 21
2.2.2 Virtuaalisen käyttöönoton määritelmä ... 23
2.2.3 Virtuaalisen käyttöönoton arvolupaus ... 24
2.2.4 Virtuaalisen käyttöönoton taloudellinen hyöty ja mittaaminen ... 25
2.2.5 Virtuaalinen käyttöönotto osana suunnitteluprosessia ... 26
2.3 Siemens Digital Enterprise -tuoteportfolion ohjelmistot digitaalisen kaksosen ja virtuaalisen käyttöönoton toteutukseen ... 30
3 Projektitoimitukset ... 32
3.1 Projektin ja toimitusprojektin määritelmä ... 32
3.2 Toimitusprojektin onnistumisen edellytykset ... 33
3.2.1 Projektiviestinnän merkitys ... 33
3.2.2 Projektin muutosten hallinta ... 34
3.2.3 Projektin riskien hallinta ... 35
3.2.4 Asiakaslähtöisyys ... 35

4 Raute Oyj:n toimitusprosessin haasteiden kartoitus 37
4.1 Raute Oyj:n nelitasoisen viilunpaikkauslinjan ja toimitusprosessin esittely 37
4.2 Puolistrukturoidun haastattelututkimuksen toteutus 39
4.3 Tutkimushaastattelun tulokset ja projektitoimituksen haasteet eri vaiheissa 41
4.3.1 Sopimus ja projektitoimituksen aloituspalaveri 41
4.3.2 Suunnittelun valmistuminen 42
4.3.3 Tehdastestauksen toteutus Raute Oyj:n tiloissa 44
4.3.4 Asennuksen valmistuminen loppuasiakkaalla 46
4.3.5 Käyttöönoton suorittaminen loppuasiakkaalla 46
4.3.6 Loppuasiakkaan hyväksyntä ja takuu 48
4.4 Haasteiden ryhmittely eri teemojen alle 49
4.5 Teemojen ja haasteiden esiintymistiheys projektitoimituksessa 55
4.6 Haasteiden ratkaisu virtuaalisella käyttöönotolla 56
4.6.1 Virtuaalisen käyttöönoton mittaaminen projektitoimituksessa 58
5 Virtuaalisen käyttöönoton tekninen toteutus 59
5.1 Virtuaaliseen käyttöönoton ohjelmistot ja ympäristön toteutus 59
5.2 Virtuaalisen käyttöönoton laajuus ja suunnitteluprosessi 62
5.2.1 Mekaniikan simuloinnin laajuus ja optimointi 66
5.2.2 Toimilaitteiden ja prosessin simuloinnin laajuus sekä optimointi 69
5.2.3 Automaatioympäristön simulointi 77
6 Tulokset 78
6.1 Virtuaalisen käyttöönoton vaikutukset projektitoimitukseen 78
6.2 Määrällisten ja laadullisten mittareiden tulokset 79
6.3 Projektitoimituksen haasteiden ratkaisu virtuaalisen käyttöönoton avulla 80
7 Pohdinta ja johtopäätökset 84
7.1 Tavoitteiden saavuttaminen 84
7.2 Virtuaalisen käyttöönoton skaalautuminen ja haasteet 87
7.3 Tutkimustulokset suhteessa aiempiin tutkimuksiin 91
7.4 Tutkimuksen rajoitteet 92
7.5 Jatkotutkimusalueet 93
Lähteet 94

Liitteet

Liite 1. Haastattelurunko

Liite 2. Projektitoimituksen haasteet ja virtuaalisen käyttöönoton vaikutusmahdollisuudet

1 Johdanto

Teknologian kehitys, asiakkaiden odotukset ja ympäristön vaikutukset muuttuvat niin nopeasti, että näihin vaatimuksiin vastaaminen edellyttää palveluiden, tuotteiden, prosessien, ja näkökulmien jatkuvaa kyseenalaistamista sekä kehittämistä yritysten sisällä. (Patzak ja Rattay 2012, s. 459). Erityisesti korkean automaatioasteen tuotantojärjestelmien suunnittelu vaatii monialaista osaamista ja eri osastojen välistä kommunikaatiota (Neugebauer ja Schob 2011). Samalla kun tuotantojärjestelmät muuttuvat monimutkaisemmiksi, syntyy painetta suorittaa käyttöönoton yhä lyhyemmässä ajassa (Martins, Costelha ja Neves 2020). Digitaalinen kaksonen on tunnistettu yhtenä lupaavana teknologiana, jonka avulla yritykset pystyvät vastaamaan muuttuvaan ympäristöön ja tehostamaan omaa toimintaansa. (Corallo, Vecchio, Lezzi ja Morciano 2021.) Suunnittelun ja käyttöönoton tehostamiseen Ahrens, Richter, Hehenberger ja Reinhart (2018); Reinhart ja Wünsch (2007), Hoffmann, Schumann, Maksoud ja Premier (2010) ja Neugebauer et al. (2011) esittelevät virtuaalisen käyttöönoton hyödyntämistä.

Digitaalisen kaksosen ja virtuaalisen käyttöönoton tutkimuksissa on selvitetty teknologioiden hyödyntämistä suunnittelussa, käyttöönotossa ja tuotannossa. Kovin laajaa tutkimusta ei kuitenkaan ole virtuaalisen käyttöönoton vaikutuksista projektitoimituksen tehostamisessa, johon tämä tutkimus keskittyy.

Tutkimus toteutetaan osana Siemens Osakeyhtiön ja Rauten Oyj:n välistä yhteistyöprojektia. Työn tilaajana toimii Siemens Osakeyhtiön Digital Industries -liiketoimintayksikkö, joka toimii kappaletavara- ja prosessiteollisuudessa. Siemens Digital Industries keskittyy teollisuusautomaatioratkaisuiden, digitalisaation ja palveluiden toimittamiseen asiakkaillensa Suomessa ja Baltiassa. Tuote- ja palveluratkaisuiden kokonaisuutta kutsutaan nimellä Digital Enterprise -portfolio. (Siemens 2021.)

Raute Oyj toimittaa asiakkailleen teknologiaratkaisuja LVL:n, vanerin ja viilun tuotantoon yksittäisestä laitteesta aina tehtaan kattaviin tuotantoprosesseihin (Raute 2021a). ” Rauten ratkaisuihin kuuluvat muun muassa tukinkäsittely, sorvaus, kuivaus, viilunkäsittely, vanerin ladonta ja puristus, levyjen käsittely sekä automaatio- ja ohjausjärjestelmät. Ratkaisujen tueksi Raute tarjoaa myös

ainutlaatuisia, koko tehtaan elinkaaren kattavia palveluja aina varhaisesta investoinnin suunnitteluvaiheesta tehdastarkastuksiin, modernisointeihin ja tehdaspäivityksiin.” (Raute 2021a). Projektitoimituksiin kuuluvat tehtaan tuotantoprosessit, tuotantolinjat ja yksittäiset koneet sekä tuotantoa tukevat laadunvalvonnan ja tuotannonhallinnan mittausjärjestelmät (Raute 2021a).

1.1 Tutkimuksen tavoitteet

Tammikuussa 2020 Raute Oyj sai tilauksen Venäjältä loppuasiakkaalta vanerin paikkauslinjasta projektitoimituksena. Kyseinen projektitoimitus kattaa kokonaisratkaisun suunnittelusta käyttöönottoon. Kyseessä on Raute Oyj:lle tyypillinen projektitoimitus, joka pitää sisällään sekä vakiotuotteita että asiakkaan tarpeisiin räätälöityjä ratkaisuja. Siemens Osakeyhtiö toimittaa Raute Oyj:lle paikkauslinjan teollisuusautomaatiotuotteet ja ohjelmistot osana projektitoimitusta.

Raute Oyj:n strategian ytimessä on digitalisaation tuomat hyödyt (Raute 2020). Raute Oyj haluaa selvittää voiko Siemensin tarjoamasta Digital Enterprise -portfoliosta löytyä sopivat ratkaisut tehostamaan projektitoimituksia. Yhdeksi ratkaisuvaihtoehdoksi on noussut digitaalisen kaksosen ja virtuaalisen käyttöönoton hyödyntäminen suunnittelun ja käyttöönoton tehostamiseksi. Tutkimuksen tavoitteena on kartoittaa Raute Oyj:n projektitoimituksen eri vaiheet ja niihin liittyvät haasteet. Löydöksiin perusten selvitetään, onko projektitoimituksessa mahdollista hyödyntää uudenlaista teknologiaa, digitaalista kaksosta ja virtuaalista käyttöönottoa Siemens Digital Enterprise -portfoliosta ja tehostaa projektitoimitusta.

1.2 Tutkimusongelma ja kysymykset

Projektitoimituksessa suunnittelu ja valmistus ovat ajallisesti pitkiä prosesseja ja eri vaiheisiin liittyvä osaaminen on moniulotteista ja jopa henkilöitynyttä. Suunnittelu- ja valmistusvaiheessa tapahtuvat erilaiset virheet ja viivästykset vaikuttavat suoraan käyttöönoton sujuvuuteen, aikatauluun ja budjettiin, joiden seurauksena Raute Oyj:llä on ollut haasteita nopeuttaa käyttöönottoja asiakkaan luona. Virtuaalisen käyttöönoton hyödyntämiseksi osana projektitoimitusta Raute Oyj ja Siemens Osakeyhtiö ovat käynnistäneet yhteisen projektin, joka toteutetaan tässä tutkimuksessa.

Tutkimuksen päätutkimuskysymys on:

Miten virtuaalinen käyttöönotto tehostaa projektitoimituksen läpivientiä suunnittelusta käyttöönottoon?

Päätutkimuskysymys jaetaan edelleen alatutkimuskysymyksiin:

1) Minkälaisia haasteita sisältyy toimitusprojektiin Raute Oyj:llä?
2) Voidaanko haasteet ratkaista virtuaalisen käyttöönoton avulla ja miten mitata syntyvä hyöty?
3) Mitkä ovat virtuaalisen käyttöönoton vaikutukset projektitoimituksen eri vaiheisiin ja aikataulukseen?

Tutkimus toteutetaan tapaustutkimuksena. Ensimmäisen alatutkimuskysymyksen tavoitteena on ymmärtää Raute Oyj:n projektitoimituksen vaiheet ja niihin liittyvät haasteet. Toisen alatutkimuskysymyksen tavoitteena on selvittää, onko osa haasteista mahdollista ratkaista Siemens Digital Enterprise -portfolion virtuaalisen käyttöönoton ratkaisun avulla ja miten mitata mahdollinen hyöty. Kolmannen alatutkimuskysymyksen tavoitteena on selvittää miten virtuaalisen käyttöönoton hyödyntäminen vaikuttaa Raute Oyj:n projektitoimituksen vaiheisiin, kuten suunnitteluun, valmistukseen, tehdastestaukseen, käyttöönottoon ja luovutukseen. Voidaanko virtuaalisen käyttöönoton avulla parantaa esimerkiksi laatua, tehostaa tiedon välittymistä projektihenkilöiden välillä tai auttaa projekti pysymään annetussa budjetissa?

1.3 Tehdyt rajaukset ja tutkielman rakenne

Työ rajataan Raute Oyj:n nelitasoisen viilunpaikkauslinjan projektitoimituksen tutkimiseen. Projektitoimituksen haasteiden kartoituksessa tutkimushaastattelu rajataan projektitoimituksen eri vaiheisiin, jotka ovat sopimus, aloituspalaveri, suunnittelun valmistuminen, tehdastestaus, asennuksen valmistuminen, käyttöönotto, loppuasiakkaan hyväksyntä ja takuu. Virtuaalisen käyttöönoton hyödyntämisessä osana projektitoimitusta keskitytään mekaniikka- sähkö-, automaatio- ja turvasuunnitteluun, varsinaisen käyttöönoton tehostamiseen sekä asiakasviestintään. Käytettävä teknologia rajataan Siemens Digital Enterprise – portfolioon.

Tutkimus on jaettu seitsemään päälukuun. Ensimmäisessä luvussa on kuvattu tutkimuksen tavoitteet, tutkimusongelma ja kysymykset, tehdyt rajaukset sekä tutkimuksen rakenne. Toisessa luvussa

on tehty tämän tutkimuksen kannalta oleellinen kirjallisuuskatsaus aiheisiin. Kolmannessa luvussa avataan projektin määritelmä ja onnistuneen projektin edellytyksiä teollisuudessa. Neljännessä pääluvussa keskitytään Raute Oyj:n projektitoimituksen vaiheisiin ja haasteiden kartoittamiseen. Luvun lopussa tehdään yhteenveto haasteista ja määritellään tavoitteet virtuaaliselle käyttöönotolle. Viidennessä pääluvussa kuvataan virtuaalisen käyttöönoton ympäristön valintakriteerejä sekä kerrotaan teknisen toteutuksen pääperiaatteet. Kuudennessa pääluvussa tehdään yhteenveto virtuaalisen käyttöönoton vaikutuksesta projektitoimituksen eri vaiheisiin, tarkastellaan määriteltyjen mittareiden tuloksia sekä tehdään yhteenveto projektitoimituksen haasteiden ratkaisemisesta virtuaalisen käyttöönoton avulla. Seitsemännessä pääluvussa on tutkimuksen päätelmät: tavoitteiden saavuttaminen, tutkimustulokset suhteessa aiempiin tutkimukseen, rajoitteet ja jatkotutkimusalueet.

2 Digitaalinen kaksonen ja virtuaalinen käyttöönotto

Digitaalinen tehdas (Digital Factory) on kattotermi, jonka alle asettuvat digitaaliset mallit, tietokoneavusteinen tuotannonsuunnittelu, konesuunnittelu, ohjelmistot sekä integroitu tiedonhallinta osana tuotteiden elinkaarta (Scheifele, Verl ja Riedel 2018; Hoffmann et al. 2010). Digitaalisen tehtaan konsepti esiteltiin laajentamaan älykkään tehtaan (Smart Factory) määritelmää, jossa valmistuksessa hyödynnetään reaaliaikaista tiedonsiirtoa, data-analytiikkaa ja mallipohjaista simulointia sekä optimointia koko tuotteen elinkaaren ajan (Martins et al. 2020). Konseptin avulla yhdistetään suunnittelun ja valmistuksen välinen mahdollinen kuilu. Tuotteen suunnittelussa siirrytään käyttämään 3D-malleja sekä simulointia virtuaalisen mallin toteuttamiseen, jonka avulla parannetaan yhteistyötä eri suunnitteluosastojen välillä. (Salierno, Leonardi ja Cabri 2021.) Erityisesti simulointiteknologiaa ja tuotetiedonhallintaa käytetään yhdessä optimoimaan valmistusta ennen tuotannon aloittamista sekä tuetaan käyttöönottoa (Makris, Michalos, Chryssolouris ja Kimura 2012). Simulointi on olennainen osa virtuaalisen käyttöönoton toteuttamista (Martins et al. 2020). Lisäksi digitaalinen tehdas hyödyntää tuotteen digitaalista kaksosta koko sen elinkaaren ajan (Salierno et al. 2021).

Seuraavissa aliluvuissa tarkastellaan digitaalisen kaksosen ja virtuaalisen käyttöönoton määritelmiä, käyttökohteita ja vaikutusta tuotteen suunnitteluun ja käyttöönottoon. Lisäksi tehdään kirjallisuuskatsaus virtuaalisen käyttöönoton toteutuksiin ja asetetaan tämä tutkimus osaksi olemassa olevaa tutkimusta.

2.1 Digitaalinen kaksonen

Digitaaliselle kaksoselle ei ole olemassa yhtä hyväksyttyä määritelmää. Yleinen peruskäsitys voidaan kuitenkin muodostaa eri kirjallisuuslähteistä. (Eigner, Detzner, Schmidt ja Tharma 2021.) Digitaalinen kaksonen terminä esiteltiin ensimmäisen kerran vuonna 2002 Michiganin yliopistolla tohtori Michael Grievesin esityksessä, jossa käsiteltiin PLM-järjestelmän muodostamista. Malli esitti fyysiselle tuotteelle rakennettavan virtuaalisen tuotteen, joka pitää sisällään kaiken fyysisen tuotteen tiedon. (Grieves ja Vickers 2017.) Taulukossa 1 on esitetty keskeisimmät määritelmät digitaaliselle kaksoselle.

Taulukko 1: Digitaalisen kaksosen keskeisimmät määritelmät kirjallisuudessa

Lähde	Määritelmä
Grieves et al. (2017)	Fyysisellä tuotteella on digitaalinen vastinpari ja niiden välillä liikkuu data molempiin suuntiin.
Glaessgen ja Stargel (2012)	Fysikaalisiin ominaisuuksiin perustuva, moniulotteinen todennäköisyyttä hyödyntävä simulaatio tuotteesta. Digitaalinen kaksonen heijastaa fyysisen tuotteen siitä saatavilla olevan sensoridatan avulla.
Boschert ja Rosen (2016)	Digitaalinen kaksonen sisältää kaiken informaation, jota voidaan hyödyntää tuotteen elinkaaren aikana simuloinnin avulla. Digitaalinen kaksonen kehittyy oikean tuotteen rinnalla koko elinkaaren ajan. Digitaalinen kaksonen ei rajoitu pelkästään kuvaamaan tuotteen tilaa, vaan avustaa tuotteen kehittämisessä, esimerkiksi käytön optimoinnissa.
Tao, Cheng, Qi, Zhang, M, Zhang, H, Sui. (2017)	Digitaalista kaksosta hyödynnetään kaikissa tuotteen elinkaaren vaiheissa. Digitaalinen kaksonen yhdistää tuotteen elinkaaren aikana fyysisen datan, virtuaalisen datan ja niiden välisen vuorovaikutuksen.
Eigner et al. (2021)	Digitaalinen kaksonen on digitaalinen representaatio uniikista fyysisestä tai aineettomasta tuotteesta, prosessista tai palvelusta todellisesta maalimasta. Se sisältää kaiken tarpeellisen informaation käyttötarkoitustaan varten sekä kaiken kerätyn tiedon koko elinkaaren ajalta. Digitaalisen kaksosen ydin on luotu tuotekehitysvaiheessa, suunnitteluvaiheessa tai toimitusvaiheessa perustuen tuoterakenteeseen. Riippuen käyttötarkoituksesta, digitaalisen kaksosen ydintä voidaan rikastaa informaatiolla mistä tahansa lähteestä.

Liu, Fang, Dong ja Xu (2021) esittelivät omassa tutkimuksessaan 21 erilaista määritelmää digitaaliselle kaksoselle vuosilta 2010–2019, mikä kertoo digitaalisen kaksosen kehittymisestä vuosien kuluessa. VanDerHorn ja Mahadevan (2021) käsittelivät omassa tutkimuksessaan 46 erilaista määritelmää kirjallisuudesta digitaaliselle kaksoselle. Yhteenvetona voidaan todeta digitaalisen kaksosen olevan digitaalinen kokonaisuus, joka heijastaa fyysisen kokonaisuuden käyttäytymistä ja päivittyy koko elinkaaren ajan. Digitaalinen kaksonen ei ole tietty teknologia, vaan idea, joka

voidaan toteuttaa eri teknologioilla. (Liu et al. 2021.) Määritelmien lisäksi digitaalinen kaksonen luokitellaan eri kategorioihin perustuen esimerkiksi tiedonkulun integraatiotasoon tai tuotteen elinkaaren vaiheeseen (Singh, Fuenmayor, Hinchy, Qiao, Myrray 2021).

Grieves et al. (2017) jakavat digitaalisen kaksosen valmistusajankohdan mukaan kahteen osaan: digitaalisen kaksosen prototyyppiin ja digitaalisen kaksosen instanssiin. Digitaalisen kaksosen prototyyppiä hyödynnetään tuotteen suunnittelussa ja testauksessa. Sen pohjalta valmistetaan fyysinen tuote. Digitaalisen kaksosen instanssissa prototyyppi on kytketty fyysiseen tuotteeseen koko elinkaaren ajaksi. Molempia digitaalisia kaksosia operoidaan alustalla, jota kutsutaan digitaalisten kaksosten ympäristöksi (Grieves et al. 2017).

Kritzinger, Karner, Traar, Henjes, ja Sihn (2018) jakavat digitaalisen kaksosen kolmeen eri kategoriaan perustuen digitaalisen kaksosen ja fyysisen tuotteen välillä olevaan tiedonkulun integraatioon. Digitaalisella mallilla tarkoitetaan tilannetta, jossa digitaalisen mallin ja fyysisen objektin välinen tiedonkulun integraatio tapahtuu molempiin suuntiin manuaalisesti. Sen sijaan digitaalinen varjo kuvastaa tilannetta, jossa data liikkuu fyysisestä tuotteesta automaattisesti digitaaliseen malliin. Kolmatta integraatiotasoa kutsutaan digitaaliseksi kaksoseksi, jossa tiedonkulun integraatio tapahtuu digitaalisen mallin ja fyysisen tuotteen välillä automaattisesti. Eigner et al. (2021) määrittelevät digitaalisen varjon kuvaavaan fyysisen tuotteen sen hetkistä tilaa sekä kaikkea informaatiota, joka lähetetään fyysisestä tuotteesta digitaalisen kaksoseen. Lähetettävä data jaetaan strukturoituun ja strukturoimattomaan dataan. Strukturoitu data lähetetään automaattisesti digitaalisen kaksoseen ja strukturoimaton data tallennetaan yrityksen IoT-järjestelmään jatkotutkimuksia varten.

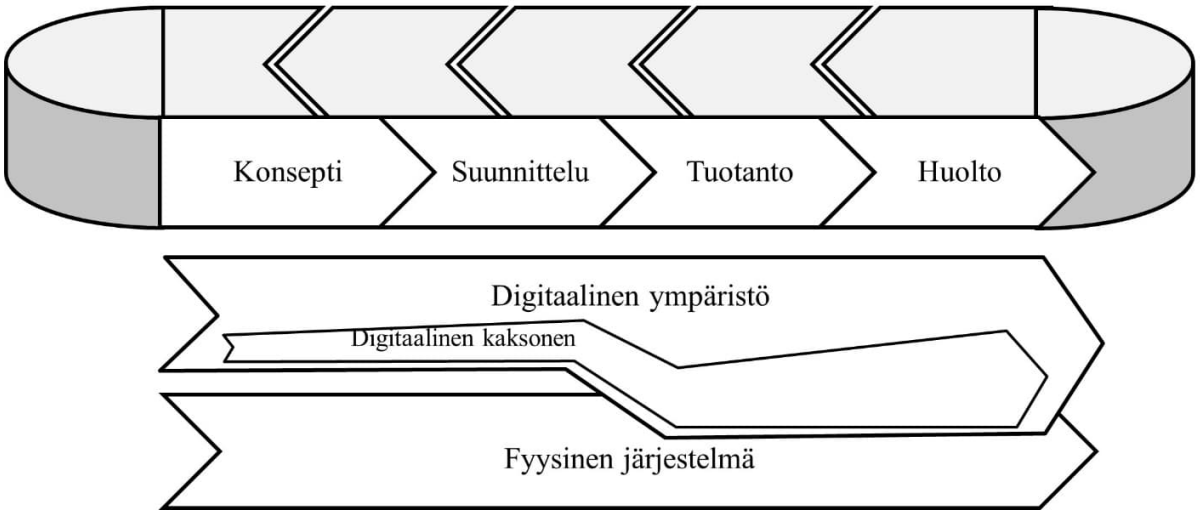
Digitaalinen kaksonen jaetaan pienempiin kokonaisuuksiin sovelluksen ja hierarkian mukaan (Singh et al. 2021). Sovelluksissa jako tehdään tuotteen digitaaliseen kaksoseen, tuotannon digitaaliseen kaksoseen ja suorituskyvyn digitaaliseen kaksoseen. Tuotteen digitaalisella kaksosella varmistetaan lopullisen tuotteen toimivan eri tilanteissa ja virtuaalisella testauksella nopeutetaan tuotteen valmistusta sekä vähennetään prototyyppien määrää. Tuotannon digitaalisella kaksosella validoidaan ja optimoidaan tuotanto ennen varsinaista tuotannon aloitusta. Suorituskyvyn digitaalista kaksosta käytetään päätöksentekoon hyödyntämällä tuotannosta kerättyä ja analysoitua dataa. (Sigh et al. 2021.) Hierarkiatason mukaan digitaalinen kaksonen jaetaan yksikkötasolle, järjestelmä tasolle ja ylimmälle järjestelmätasolle. (Tao, Qi, Wang ja Nee 2019). Yksikkötason

digitaalinen kaksonen koostuu pienimmästä mahdollisesta osasta tuotannossa, esimerkiksi robotista, työkalusta, anturista tai ympäristön muuttujasta. Järjestelmätason digitaalinen kaksonen koostuu yksikkötason digitaalisista kaksosista ja muodostaa tuotantojärjestelmän, esimerkiksi tuotantolinjan tai kokonaisen tehtaan digitaalisen kaksosen. Informaatio liikkuu järjestelmätason digitaalisten kaksosten välillä. Ylimmän järjestelmätason digitaalinen kaksonen koostuu järjestelmätason digitaalisista kaksosista. Ylimmällä tasolla nähdään eri järjestelmätason digitaalisten kaksosten elinkaaren tila ja suorituskyky. Ylimmän tason dataa voidaan käyttää optimointiin ja tuotekehitykseen. (Tao et al.2019.)

Digitaalisten kaksosten yhteydessä käytetään termiä digitaalinen säie. Se kuvastaa, kuinka informaatio liikkuu eri suunnittelijoiden ja osastojen välillä digitaalisesti. (Singh et al.2021.). Eigner et al. (2021) lisäävät digitaalisen säikeen kattavan koko tuotteen elinkaaren. Digitaalinen säie yhdistää tietoa eri lähteistä, kuten PLM-järjestelmistä, digitaalisista malleista, fyysisistä tuotteista tai integroi muita relevantteja tuotetietoja vanhoista IT-järjestelmistä. Digitaalisen säikeen avulla koko tuotteen kehitys-, hankinta- ja tuotantohistoria ovat saatavilla milloin tahansa. (Eigner et al. 2021.)

2.1.1 Digitaalisen kaksosen käyttökohteet suunnittelussa

Liu et al. (2021) toteavat tutkimuksessaan digitaalisen kaksosen sovellusten jakautuvan teollisuudessa suunnitteluun, valmistukseen ja huoltoon. Boschert et al. (2016) kuvaavat tarkemmin, kuinka digitaalinen kaksonen muodostuu näiden vaiheiden aikana rinnakkain fyysisen vastinparin kanssa. Digitaalinen kaksonen on osa digitaalista ympäristöä, joka kehittyy fyysisen järjestelmän kanssa rinnakkain, kuten kuvassa 1 esitetään.



Kuva 1: Digitaalinen kaksonen kehittyy tuotteen elinkaaren eri vaiheiden aikana. (mukailtu Boschert et al. 2016)

Digitaalinen kaksonen pitää sisällään kaiken relevantin informaation ja mallit, joita hyödynnetään ratkaisemaan tuotteen elinkaaren aikana vaiheiden haasteita sekä luomaan uutta arvoa. Digitaalinen kaksonen laajenee koko elinkaarensa ajan ja osa sen sisällöstä liitetään fyysiseen järjestelmään, kuten esimerkiksi automaation ohjausjärjestelmää avustava simulointimalli. (Boschert et al. 2016.)

Konseptivaiheessa hyödynnetään suunniteltavan tuotteen karkeantason määritelmiä sekä kokemuksia aikaisemmista tuotteista. Käytettävissä olevasta datasta ja simulointimalleista koostetaan digitaalisen kaksosen perusta, jota tarkennetaan iteroimalla virtuaalisia prototyyppejä. (Boschert et al. 2016.) Digitaalinen kaksonen tukee iteratiivista suunnittelua konseptivaiheessa ja mahdollistaa informaation jäljitettävyyden suunnittelun edetessä. Suunnittelijat pystyvät tekemään informaatioon perustuvia päätöksiä hyödyntämällä digitaalista kaksosta. (Liu et al. 2021.) Konseptisuunnittelussa hyödynnetään digitaalisen kaksosen keräämää dataa edellisen sukupolven tuotteesta, mikä tekee suunnittelijoiden ja asiakkaan välisestä kommunikoinnista läpinäkyvämpää ja nopeampaa, kun voidaan käyttää olemassa olevaa informaatiota. (Tao, Sui, Liu, Qinglin, Zhang, Song, Guo, Lu ja Nee 2018). Konseptivaiheessa digitaalisessa ympäristössä alkaa muodostua digitaalisen kaksosen prototyyppi, jolla ei ole vielä fyysistä vastinparia (Grieves et al. 2017).

Suunnitteluvaiheessa jatketaan tuotteen yksityiskohtaisemmalla suunnittelulla, jolloin esimerkiksi simulointimallit muuttuvat monimutkaisemmiksi ja niitä hajautetaan eri käyttötarkoituksiin. Informaation ja monimutkaisuuden kasvaessa kaikki tieto tulisi tallentaa keskitetysti yhteen paikkaan kaikkien saataville, jotta informaatio säilyy yhtenäisenä. (Boschert et al. 2016.) Digitaalisen kaksosen avulla testaan tuotetta erilaisissa tilanteissa ja ympäristöissä, minkä avulla validoidaan tavoiteltu toiminnallisuus. Mikäli mallinnus ja simulointi on toteutettu oikein, vähennetään merkittävästi ei-toivottuja ominaisuuksia. (Grieves et al. 2017.) Digitaalinen kaksonen tukee lisäksi virtuaalista testausta (Liu et al. 2021). Se ei liity pelkästään fyysisten tuotteiden tarkasteluun, vaan automaatiojärjestelmän ohjelmakoodi voidaan testata virtuaalisella käyttöönotolla (Boschert et al. 2016). Digitaalisen kaksosen ja virtuaalisen testauksen avulla suunnittelijat näkevät tuotteen toiminnassa ilman, että heidän tarvitsee odottaa fyysisen tuotteen valmistumista ja testausta. Tämä vähentää huomattavasti suunnitteluaikaa ja kustannuksia. (Liu et al. 2021.)

Suunnittelun jälkeen tuote valmistetaan ja digitaalinen prototyyppi saa fyysisen vastinparin, jota kutsutaan digitaalisen kaksosen instanssiksi. Digitaalinen kaksonen alkaa saada informaatiota fyysisestä tuotteesta, kun digitaalinen kaksonen päivitetään vastamaan fyysisen tuotteen toteutusta esimerkiksi muutosten osalta. (Grieves et al. 2017). Valmistuksen aikana fyysistä tuotetta verrataan digitaalisen kaksoseen, jolla varmistetaan valmistettavan tuotteen olevan vaatimusten mukainen (Liu et al. 2021). Lisäksi digitaalinen kaksonen sisältää valmistuksessa tarvittavat tiedot, joiden perusteella fyysinen tuote valmistetaan (Tao et al. 2018).

Valmistuksen jälkeen tuote siirtyy käytettäväksi. Käytön aikana digitaalista kaksosta päivitetään ja täydennetään keräämällä informaatiota fyysisestä tuotteesta. Sitä hyödynnetään esimerkiksi testaamalla tuotteeseen tehtäviä muutoksia ennen varsinaisten muutosten toteuttamista fyysiselle tuotteelle. (Boschert et al. 2016.) Digitaalinen kaksonen on identtinen simulointiympäristö fyysisestä tuotteesta, mitä voidaan käyttää testaukseen ilman riskiä (Liu et al. 2021). Tuotteen käytön aikana data liikkuu digitaalisen kaksosen ja fyysisen tuotteen välillä molempiin suuntiin. Fyysisen tuotteen lähettämällä datalla päivitetään sen hetken tilanne digitaaliseen kaksoseen. Lisäksi digitaalisen kaksosen informaatiota käytetään ennustamaan tuotteen suorituskykyä ja tulevia häiriöitä. (Grieves et al. 2017).

Huoltovaiheessa Liu et al. (2021) laajentavat digitaalisen kaksosen hyödyntämisen ennakoivaan kunnonvalvontaan, jolloin luovutaan aikataulutetuista huoltotoiminnoista. Digitaalinen kaksonen

mahdollistaa poikkeavuuksien tunnistamisen vertailemalla fyysisestä tuotteesta kerättyä informaatiota digitaalisen kaksosen luomaan informaatioon. Lisäksi sitä hyödynnetään virheiden tunnistuksessa ja diagnostiikassa. (Liu et al. 2021.) Digitaalisen kaksosen informaation avulla nähdään tuotteiden oletettu elinkaari, joka mahdollistaa varaosien tarpeen ennakoimisen ja huoltotoimenpiteiden optimoinnin ennen osien rikkoutumista (Boschert et al. 2016). Grieves et al. (2017) huomauttavat elinkaaren lopussa tapahtuvan tuotteen hävittämisen merkityksen. Usein tuotteen hävittämisen yhteydessä, myös informaatio häviää. Uuden sukupolven tuotteet kärsivät osittain samoista ongelmista kuin edeltäjänsä ja nämä ongelmat olisi voitu välttää hyödyntämällä edellisen tuotteen luomaa informaatiota. Vaikka fyysinen tuote joudutaan hävittämään, on informaation säilyttäminen pieni kustannus.

2.1.2 Digitaalisen kaksosen käyttöönoton haasteet

Digitaalinen kaksonen yhdistää informaation eri lähteistä ja yhtenä tavoitteena on pitää tieto ajan tasalla sekä jakaa sitä tehokkaasti eri osastoille. (VanDerHorn et al. 2021). Organisaatioissa esiintyvät siilot ovat kuitenkin suurin este digitaalisen kaksosen käyttöönotolle. Organisaatiot ovat usein jaettu toimintojen, kuten esimerkiksi suunnittelun, insinöörityön, valmistuksen ja tuen mukaan. Tieto jakaantuu luonnostaan näiden siilojen sisälle, eikä niiden välillä ole juurikaan tiedonvaihtoa. (Grieves et al. 2017.) Digitaalisen kaksosen käyttöönottamiseksi vaaditaan yhteistyötä eri sidosryhmien välillä informaation ja mallien jakamiseksi. Tämä vaatii nykyisten toimintatapojen ja ajattelumallien muuttamista, mikä lähtee liikkeelle yrityksen kulttuurin uudistamisesta. (VanDerHorn et al. 2021).

2.1.3 Digitaalisen kaksosen ja virtuaalisen käyttöönoton välinen yhteys

Boschert et al. (2016) mainitsivat virtuaalisen käyttöönoton yhtenä digitaalisen kaksosen käyttökohteena. Mykoniatis ja Harris (2021) lähestyvätkin digitaalista kaksosta virtuaalisen käyttöönoton kannalta. Tutkimuksessa esitellään digitaalinen kaksonen, joka hyödyntää simulointimalleja kuvastamaan kokoonpanolinjaa. Simulointimalleihin yhdistetään kokoonpanolinjan automaatiojärjestelmä, jonka avulla testataan ohjausjärjestelmän toimivuutta simulointimallin avulla. Simuloinnin tulee sisältää tuotantolaitteiden ja ohjausjärjestelmien mallit, jolloin kokonaisuudesta muodostuva digitaalinen kaksonen mahdollistaa virtuaalisen käyttöönoton. (Sobrino, Holubek ja

Velíšek 2021). Lisäksi Ahrens et al. (2018) kuvaavat digitaalisen kaksosen mallintamisen olevan ensimmäinen askel kohti virtuaalista käyttöönottoa. Seuraavassa luvussa kuvataan tarkemmin virtuaalista käyttöönottoa, joka on digitaalisen kaksosen yksi käyttökohde.

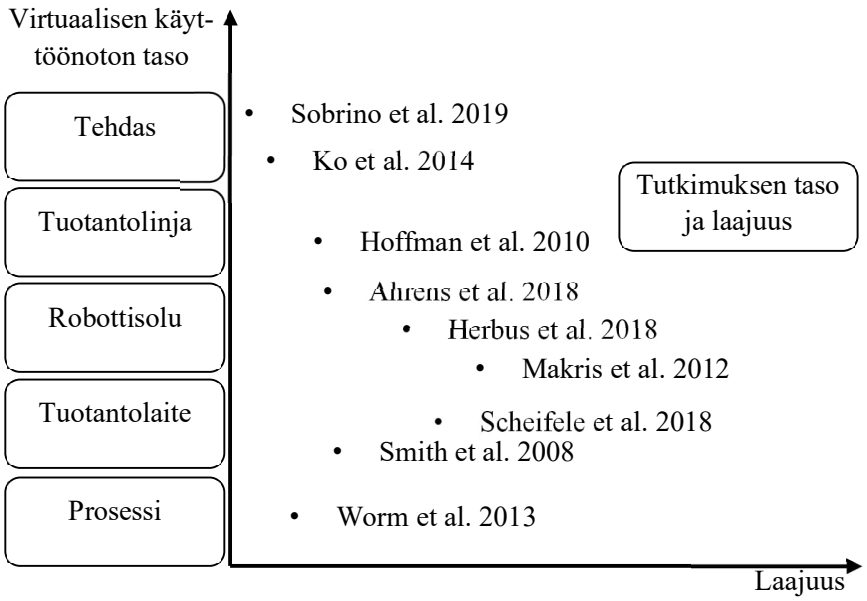
2.2 Virtuaalinen käyttöönotto

Virtuaalisen käyttöönoton alkuperä löytyy pehmeästä käyttöönotosta, jonka arkkitehtuurin Vorderwinkler, Eder, Steringer, ja Schleicher esittelivät vuonna 1999 (Auinger ja Vorderwinkler ja Buchtela 1999). Pehmeässä käyttöönotossa ohjausjärjestelmä liietään simulointimalliin, jonka avulla ohjausjärjestelmä testataan ennen käyttöönottoa. Motivaationa tutkimukselle oli tiedonkulun haasteet eri suunnittelijoiden välillä ja ohjelmakoodin testauksen haasteellisuus ilman tuotantolaitetta. Lisäksi käyttöönottovaihe on kallis ja virheherkkä. Tuotantolaitteiden ollessa käytössä on haastavaa tehdä muutoksia ohjausjärjestelmään pitäen tuotantokatkokset lyhyinä (Auinger et al. 1999.) Tutkimuksen toteutus ei kuitenkaan kattanut koko suunnitteluprosessin vaatimuksia teknisestä näkökulmasta eikä simulointianalyysejä, jotka voidaan nykypäivänä suorittaa virtuaalisen käyttöönoton avulla ja ennakoida todellisen järjestelmän käyttäytymistä ennen käyttöönottoa (Shahim ja Moller 2016).

2.2.1 Aikaisemmat tutkimukset virtuaalisesta käyttöönotosta

Virtuaalisen käyttöönoton taloudellista kannattavuutta ovat tutkineet Reinhart et al. (2007) ja Shahim et al. (2016), joita käsitellään tarkemmin luvussa 2.2.4. Vaikutuksia suunnitteluprosessiin ovat tutkineet Liu, Diedrich ja Suchold (2012), Ko, Ahn ja Park (2013), Oppelt ja Urbas (2014) ja Vermaak et al. (2017) sekä Eguti ja Trabasso (2018), joita tarkastellaan luvussa 2.2.5. Useampi tutkimus selvittää teknologian soveltamista virtuaalisessa käyttöönotossa, joiden laajuus vaihtelee sekä mekaniikan, että automaation osalta. Vertailu teknologiaan keskittyvistä tutkimuksista tason ja laajuuden mukaan on esitetty kuvassa 2, jota käytetään havainnollistamaan tutkimusten eroja.

Tasolla kuvataan tutkimusten käyttökohteita ja laajuuden osalta verrataan simulointimallin kokoja perustuen omaan arvioon. Kuvaan on lisäksi merkitty tämän tutkimuksen taso ja laajuus.



Kuva 2: Osa aikaisempien tutkimusten virtuaalisen käyttöönoton tasoista ja laajuudesta

Tehdastasolla Ko et al. (2014) tutkivat mallipohjien hyödyntämistä diskreettipohjaisessa tapahtumasimulaatiossa. Mallipohjien kehittäminen vaatii asiantuntijuutta simuloinnista, mutta valmiiden mallipohjien käyttö onnistuu luontevasti suunnittelijalta, jolla ei ole syvää tuntemusta simulaation rakentamisesta. Sobrino et al. (2014) esittelevät diskreettipohjaisen tapahtumasimulaation liittämisen automaatiojärjestelmän ohjaukseen. Hoffman et al. (2010) tutkivat virtuaalisen käyttöönottoon tarvittavan ympäristön luomista suunnitteludatasta. Tuloksena syntyi PEMS- ympäristö, jossa ylläpidetään toimilaitteiden simulointimalleja, joiden pohjalta luodaan virtuaalisen käyttöönoton ympäristö mahdollisimman pitkälle automaattisesti. Testijärjestelmänä toimi automaattinen kokoonpanolinjasto. Mallin luomisen etuna on suunnittelutyön vähentyminen, joka mahdollistaa virtuaalisen käyttöönoton hyödyntämisen pienissä ja keskisuurissa yrityksissä. Ahrens et al. (2018) tutkivat mallipohjaisen suunnittelun ja virtuaalisen käyttöönoton hyödyntämistä teollisuudessa. Tutkimuksessa esitellään kolmivaiheinen malli, jonka avulla tutkitaan yrityksen prosessit ja käytetyt työkalut, määritellään uusi suunnitteluprosessi tukemaan mallipohjaista suunnittelua ja virtuaalista käyttöönottoa sekä toteutetaan uuden toimintatavan mukainen käyttöönotto asteittain

pilottiprojektin avulla. Mallin toimivuutta tutkittiin yrityksessä, joka valmistaa automatisoituja robottisoluja. Lopputuloksena syntyi uudistettu prosessi, joka tukee mallipohjaista suunnittelua ja virtuaalista käyttöönottoa. Herbus et al. (2018) esittelevät robottisolun virtuaalisen käyttöönoton toteutuksen, jossa yhdistetään PLC-ohjaus OPC-serverin kautta simulointimalliin. Makris et al. (2012) tutkivat hyötyjä käytännön kautta suorittamalla virtuaalisen käyttöönoton robottisolulle. Kokonaisuudessaan käyttöönottoon käytettävä aika lyheni 15–25 %, josta 90 % syntyi robottiohjelmoinnin tarpeen vähentymisestä käyttöönotossa. Investointikustannusten osalta tuotannon käynnistämisessä säästettiin 15 % työvoimakuluista, jotka normaalisti kuluvat ongelmien selvittämiseen. Kokonaisuutena projektin investointikulut pysyivät minimissään. Tulevaisuudessa robottisoluun tehtävät muutokset pystytään testaamaan virtuaalisesti etukäteen ilman tuotantoseisokin luomaa painetta. Scheifele et al. (2018) selvittivät virtuaalisen käyttöönoton reaaliaikavaatimuksia, jossa simuloinnin sykliaika on noin 1ms. Ympäristön reaaliaikaisuus lisää digitaalisten kaksosten ja virtuaalisen käyttöönoton käyttömahdollisuuksia suunnittelussa ja käyttöönotossa. Smith et al. (2008) tutkivat PLC-ohjaimen I/O-rajapinnan liittämistä simulointimalliin. Sovelluskohteena oli pakkauskone, jonka avulla esitettiin soveltuva toimintatapa PLC-ohjauksen liittämiseksi simulointimalliin. Toimintatapa koostuu seuraavista vaiheista: suunnitellaan PLC-ohjaus ja simulointimalli, konfiguroidaan emulaattori, muodostetaan yhteys PLC-ohjauksen ja emulaattorin välille, ladataan PLC-ohjelma emulaattoriin ja yhdistetään PLC-ohjaus simulaatioon. Worm et al. (2013) selvittivät virtuaalisen käyttöönoton eri laajuuksien etuja vedenkäsittelylaitoksen prosessiautomaation testauksessa. Tutkimuksessa verrattiin kahta virtuaalisen käyttöönoton ympäristöä. Ensimmäisessä ympäristössä simulointiin vedenkäsittelylaitoksen perustoiminnot ja toisessa oli lisänä prosessin tarkempi simulointimalli. Lopputuloksena ensimmäisen ympäristön avulla löydettiin enemmän ohjelmointivirheitä ja todettiin perustoimintojen simuloinnin olevan riittävän tarkka prosessin virtuaalisen käyttöönottoon, kun tavoitteena on löytää ohjelmointivirheet.

2.2.2 Virtuaalisen käyttöönoton määritelmä

Virtuaalisella käyttöönotolla tarkoitetaan virtuaalista mallia, jonka avulla testataan ohjausjärjestelmä rinnakkain valmistuksen ja kokoonpanon aikana (Reinhart et al. 2007). Simulointimalleja hyödynnetään virtuaalisessa käyttöönotossa ja tavoitteena on synkronoida ketjussa tapahtuvat suunnitteluvaiheet (Ahrens et al. 2018). Hoffmann et al. (2010) tarkentavat virtuaalisen käyttöönoton mahdollistavan mekaniikan suunnitteluvirheiden tarkastelun, mikäli simuloinnissa

hyödynnetään 3D-malleja. Mikäli tavoitteena on testata ohjausjärjestelmän toiminta 3D-mallin avulla, tulee koko vaikutusketju mallintaa ja simuloida ohjausjärjestelmästä I/O-rajapinnan, sensoreiden, toimilaitteiden ja käyttöjen kautta mekaniikan liikkeisiin.

Virtuaalisen käyttöönoton toteutuksessa on eri tasoja. Ensimmäisessä tasossa *model-in-the loop* ohjausjärjestelmä ja tuotantolaite testataan kokonaisuudessaan simulointimallina. (Ahrens et al. 2018.) Toisessa tasossa s*oftware-in-the-loop* ohjausjärjestelmä (esimerkiksi PLC) suoritetaan emulaattorissa, joka on kytketty I/O-rajapinnan kautta laitteen simulointimalliin. Etuna on virtuaalisen ajan hyödyntäminen, joka mahdollistaa useamman eri simulointimallin synkronoinnin keskenään. (Reinhart et al. 2007.) Kolmannessa virtuaalisen käyttöönoton tasossa *hardware-in-the-loop* todellisen ohjausjärjestelmän I/O-rajapinta kytketään simulointimalliin. Etuna on ohjausjärjestelmän reaaliaikaisuus, joka asettaa reaaliaikavaatimuksen myös simulointimallille. (Scheifele et al. 2018.) Laajemmissa järjestelmissä esiintyvät HIL- ja SIL- ratkaisut, joita on mahdollista hyödyntää samanaikaisesti. Simulointimalliin liitetään rinnakkain sekä emuloitu ohjausjärjestelmä, että todellinen ohjausjärjestelmä. (Scheifele et al. 2018.)

Näiden lisäksi virtuaalisen käyttöönoton toteutuksessa on eri yhdistelmiä ja käyttötarkoituksia. Hybridikäyttöönotossa yhdistetään HIL-käyttöönotto varsinaisen käyttöönoton kanssa. Käyttöönotossa osa ohjausjärjestelmistä on liitetty simulointimalliin ja osa todelliseen laitteeseen. Käyttöönoton edetessä simulointimallit korvataan todellisilla laitteilla. Toimintamallilla tavoitellaan alempia kustannuksia ja tehokkuutta varsinaisessa käyttöönotossa. (Makris et al. 2012.) Virtuaalisen käyttöönoton synkronisessa simuloinnissa verrataan simulointimallin ja oikean järjestelmän tuloksia keskenään ja etsitään poikkeavuuksia. Eteenpäin simuloinnissa pyritään ennustamaan ohjausjärjestelmän toimintaa tutkimalla prosessiparametrejä asetettujen optimointikriteerien perusteella. (Makris et al 2012.)

2.2.3 Virtuaalisen käyttöönoton arvolupaus

Virtuaalinen käyttöönotto parantaa ohjausjärjestelmän koodin laatua ja vakautta, jotka saavutetaan intensiivisellä testauksella. Toimintatapa mahdollistaa skenaariotestauksen, jota ei voida toteuttaa reaalimaailmassa ilman tuotantolaitteen toimivuuden riskeeraamista. (Reinhart et al. 2007.) Virtuaalinen käyttöönotto on kustannustehokas ratkaisu mekaniikka-, sähkö- ja automaatiosuunnittelun samanaikaiseen toteutukseen ja sen avulla tunnistetaan mahdolliset integraatiovirheet ennen

fyysisen laitteen valmistusta. (Mykoniatis et al. 2021). Hyötyjä ovat esimerkiksi ajan säästö, joka näytettiin toteen 60 henkilön suorittamalla käyttöönotolla. Puolella testiryhmästä oli käytössä virtuaalinen käyttöönotto ja toinen puoli toteutti projektin ilman virtuaalista käyttöönottoa. Käyttöönoton aika lyheni 75 % ja aika-markkinoille 15 % virtuaalisen käyttöönoton avulla. Huomionarvoista on kuitenkin testattavan laitteen suppeus (10 toimilaitetta ja 17 sensoria) sekä valmis virtuaalisen käyttöönoton malli, jonka toteuttamiseen kulunutta aikaa ei huomioitu lopputuloksissa. (Reinhart et al. 2007.) Suunnitteluun ja käyttöönottoon liittyvien parannusten lisäksi virtuaalinen käyttöönotto antaa suunnittelijoille uudenlaisia mahdollisuuksia konseptien analysointiin, järjestelmän suorituskyvyn optimointiin ja operaattorikoulutukseen. Hyötyjen avulla pystytään vastaamaan paremmin asiakkaiden vaatimuksiin ja parantamaan aikataulutuksen luotettavuutta. (Mykoniatis et al. 2021). Yritykset voivat saavuttaa taloudellista hyötyä, mikäli ne ovat valmiita tekemään muutoksia, jotka tukevat virtuaalisen käyttöönoton implementointia osaksi yrityksen toimintaa (Shahim et al. 2016).

2.2.4 Virtuaalisen käyttöönoton taloudellinen hyöty ja mittaaminen

Kuten todettua, virtuaalisen käyttöönoton hyödyt ovat selkeitä parantuneena laatuna ja ajansäästönä. Tulee kuitenkin huomioida, että tuotantokoneen simulointimalli tulee rakentaa etukäteen, jotta virtuaalista käyttöönoton suorittaminen on mahdollista. Mallintamiseen käytetty työmäärä voi ylittää lyhentyneen käyttöönoton ja parantuneen laadun tuomat hyödyt. (Reinhart et al. 2007.) Tanskalaisessa tutkimuksessa Shahim et al. (2016) arvioivat virtuaalisen käyttöönoton arvolupauksia ja taloudellisia hyötyjä haastattelemalla viiden eri automaatioyrityksen edustajaa. Tuloksissa hyödynnettiin laadullisia ja määrällisiä mittareita liittyen aikaan, kustannuksiin ja laatuun. Tuloksissa verrattiin tavallisen käyttöönoton ja virtuaalisen käyttöönoton tuloksia yrityksissä. Virtuaalisen käyttöönoton arvonluonnissa merkittävimmiksi nousivat aikataulun hallinta, sujuvammat käyttöönotot ja ohjausjärjestelmän laadun parantuminen. Monet hyödyistä olivat aineettomia ja vaikeasti mitattavissa, mutta pitkällä aikavälillä virtuaalinen käyttöönotto loi enemmän arvoa yrityksille verrattuna perinteisiin käyttöönottoihin.

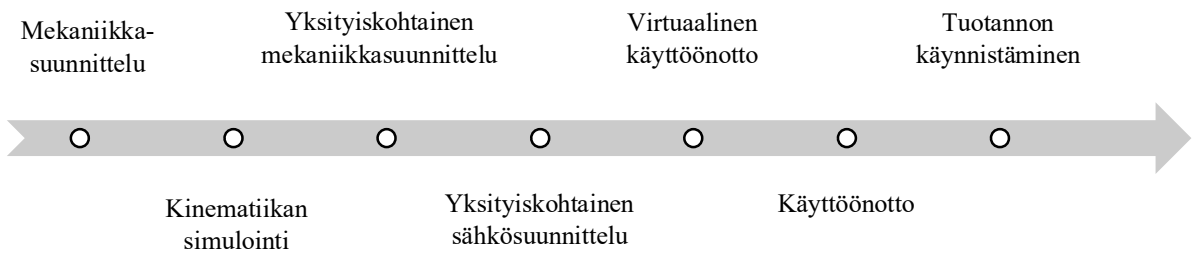
Mittaamisen ongelma projektissa on valinta kahden vaihtoehdon välillä: projektissa käytetään virtuaalista käyttöönottoa tai ei käytetä. Valmistuneen virtuaalisen käyttöönoton projektin kustannushyötysuhteen mittaaminen on mahdotonta, koska kahta identtistä projektia eri valinnoilla ei voida

toimittaa rinnakkain. (Reinhart et al.2007). Kustannus-hyötysuhteen takaamiseksi Reinhart et al. (2007) esittivät mallin, jonka avulla tunnistetaan paras projekti virtuaalisen käyttöönoton suorittamiseen. Mallissa tuotantolinja jaetaan alajärjestelmiin, jotka rajoittuvat yhteen ohjausyksikköön, esimerkiksi PLC:hen sekä suljettuun materiaalivirtaan. Jokaista alajärjestelmää käsitellään mahdollisena virtuaalisen käyttöönoton projektina. Alajärjestelmien mallintamisen työmäärä arvioidaan perustuen mekaaniseen rakenteeseen sekä I/O-muuttujien määrään. Jokaiselle alajärjestelmälle arvioidaan virtuaalisen käyttöönoton hyödyllisyys: alajärjestelmän ohjauksen kontribuutio, alajärjestelmän koko ja vaikutus kokonaisuuden toimintaan. Edellä mainittujen toimenpiteiden jälkeen arvioidaan alajärjestelmän virtuaalisen käyttöönoton kustannus-hyötysuhdetta ja valitaan virtuaaliselle käyttöönotolle soveltuva kohde. Shamin et al. (2016) tuloksissa todetaan, ettei automaatioyrityksillä ollut antaa tarkkoja lukuja mallintamiseen käytetystä työmäärästä. Yritykset olivat kuitenkin vakuuttuneita virtuaalisen käyttöönoton hyödyistä lyhentyneinä käyttöönottoina, jolloin kuluu vähemmän aikaa loppuasiakkaalla. Lisäksi työntekijät testasivat järjestelmiä kotona ja parantunut ohjelman laatu vähensi käytettyjä työtunteja, joka säästi rahaa.

2.2.5 Virtuaalinen käyttöönotto osana suunnitteluprosessia

Tyypillinen tuotantojärjestelmän suunnitteluprosessi muodostuu peräkkäisistä vaiheista, jotka ovat: tuotannon suunnittelu, konseptisuunnittelu, perussuunnittelu, yksityiskohtainen suunnittelu, asennusvaihe, käyttöönotto, tuotanto, huolto ja kunnossapito (Oppelt et al. 2014). Suunnitteluprosessia tulee tarkastella virtuaalisen käyttöönoton näkökulmasta, jotta korkean automaatioasteen tuotantojärjestelmät saavuttavat niille asetetut tavoitteet (Ko et al. 2013). Virtuaalinen käyttöönotto mahdollistaa eri suunnittelijoiden työskentelyn rinnakkain, joka vaikuttaa perinteisen suunnitteluprosessin vaiheisiin. (Eguti et al. 2018).

Liu et al. (2012) esittävät virtuaalisen käyttöönoton suunnitteluprosessin peräkkäisinä toimenpiteinä, joka on esitetty kuvassa 3. Tavoitteena on rakentaa simulointimalli yksinkertaisen mekaniikkamallin avulla ja liittää simulointimalli PLC-ohjauksen kanssa. Ohjelmakoodi testataan virtuaalisella käyttöönotolla ennen varsinaista käyttöönottoa.

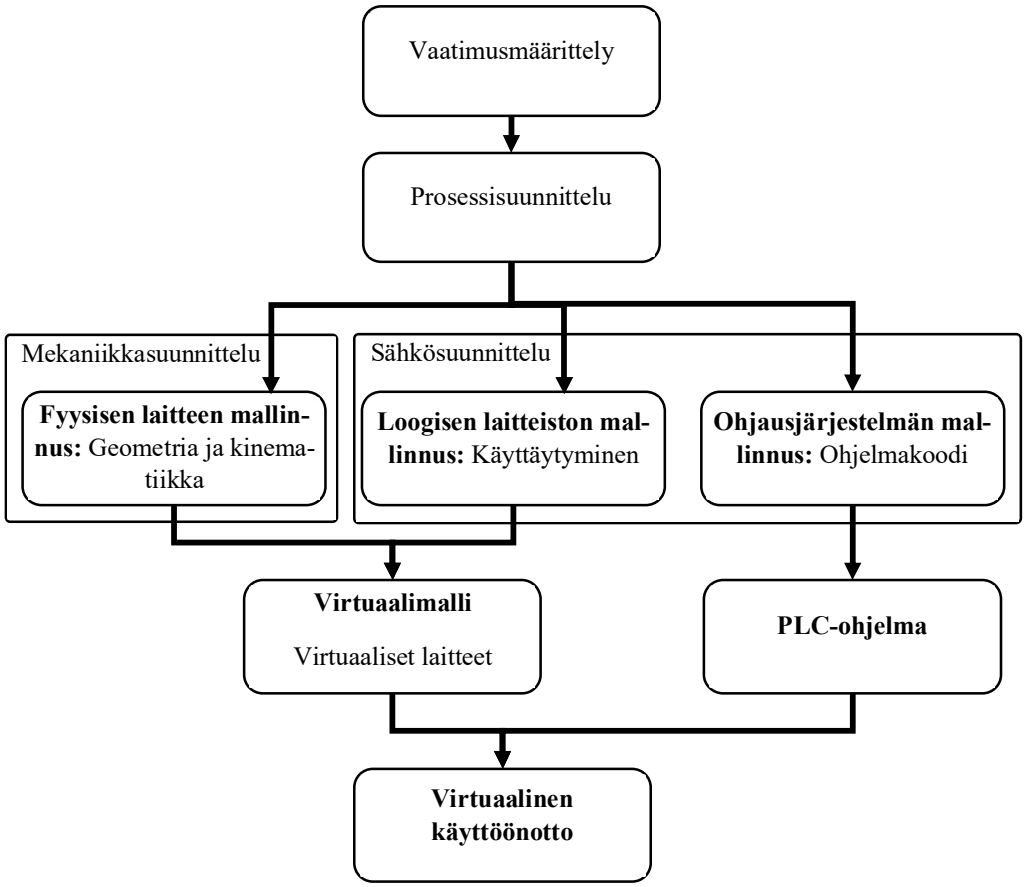


Kuva 3: Virtuaalisen käyttöönoton suunnitteluprosessi peräkkäisinä toimenpiteinä. Mukailtu Liu et al. (2012)

Suunnitteluprosessi on kuitenkin ristiriidassa Eguti et al. (2018) tutkimuksen kanssa, jossa painotetaan lähtötietojen tarkkuutta mekaniikka- ja sähkösuunnittelusta. Mekaniikan 3D-malli on lähtökohta virtuaaliselle käyttöönotolle, jolla toteutetaan mekaniikan simulointimalli. 3D-mallin lisäksi tulee olla määriteltynä esimerkiksi käytetyt sensorityypit, liikkeiden nopeudet ja osien ja työkalujen todelliset mitat. Virtuaalisen käyttöönoton ympäristön valmistuttua, suunnittelijat aloittavat PLC-ohjelman ja turvatoimintojen testauksen rinnakkain valmistuksen kanssa. (Eguti et al. 2018.)

Ko et al. (2013) tarkastelevat virtuaalisen käyttöönoton suunnitteluprosessia omana kokonaisuutena, joka tulee suorittaa rinnakkain mekaniikka-, sähkö, ja automaatiosuunnittelun kanssa.

Ympäristön mallinnus jaetaan kolmeen osioon: fyysisen laitteen mallinnus, loogisen laitteiston mallinnus ja ohjausjärjestelmän mallinnus, kuten kuvassa 4 on esitetty.

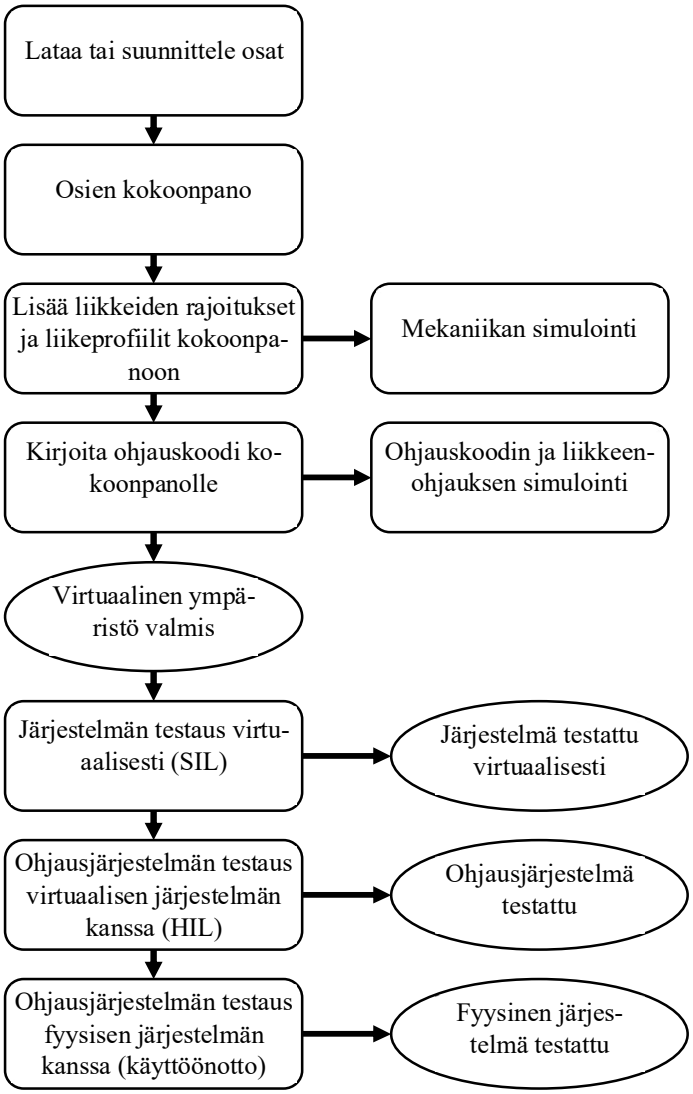


Kuva 4: Virtuaalisen käyttöönoton suunnitteluprosessi, mukailtu Ko et al. (2013).

Jakamalla mallinnus kolmeen osioon, ei ole tarpeen odottaa valmiita suunnitelmia sekä mekaniikka-, että sähkösuunnittelusta, vaan mallinnus voidaan aloittaa rinnakkain näiden suunnitteluvaiheiden kanssa. Mallinnusvaiheen jälkeen simulointiympäristöt yhdistetään kokonaisuudeksi ja liitetään todellisen PLC-ohjauksen kanssa ja suoritetaan virtuaalinen käyttöönotto. (Ko et al. 2013.) Jakamalla virtuaalisen käyttöönoton toteutus geometrian, kinematiikan ja toimilaitteiden mallinnukseen, säästetään kokonaisaikaa suunnittelussa (Ko et al. 2013).

Vermaak et al. (2017). esittävät virtuaalisen käyttöönoton suunnitteluprosessin alkavan 3D-mallien suunnittelusta, jonka jälkeen rakennetaan virtuaalinen ympäristö. Virtuaalinen käyttöönotto suoritetaan kolmivaiheisena testauksena. Ensimmäisessä vaiheessa järjestelmä testataan SIL-ympäristössä. Toisessa vaiheessa simuloituun järjestelmään liitetään fyysinen ohjausjärjestelmä ja

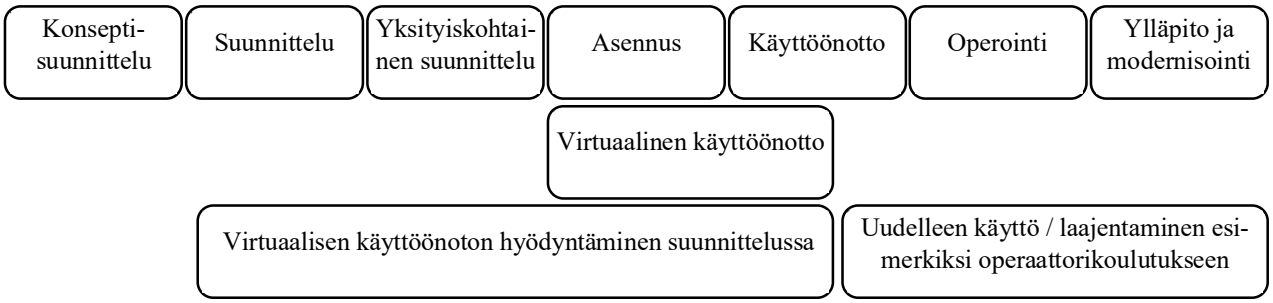
viimeisessä vaiheessa suoritetaan varsinainen käyttöönotto. Suunnitteluprosessi on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5: Vaiheet virtuaalisen käyttöönoton toteuttamiseksi. Mukailtu Vermaak et al. (2017)

Ko et al. (2013), Eguti et al. (2018) ja Vermaak et al. (2017). painottavat lähtötietojen tärkeyttä sekä täsmentävät virtuaalisen käyttöönoton ympäristön suunnittelun alkavan, kun tarvittavat lähtötiedot ovat saatavilla. Virtuaalinen käyttöönotto kuitenkin esitetään yhtenä ylimääräisenä vaiheena suunnitteluprosessissa ennen varsinaista käyttöönottoa. Oppelt et al. (2014) esittelevät virtuaalisen käyttöönottamisen yhdistämisen osaksi suunnitteluprosessia, jolloin se tapahtuu osana

suunnitteluvaiheita ja mahdollistaa virtuaalisen käyttöönoton tehokkaan hyödyntämisen. Virtuaalisen käyttöönoton yhdistäminen suunnitteluun on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6: Virtuaalisen käyttöönoton yhdistäminen osaksi suunnittelua. Mukailtu Oppelt et al. (2014)

Mallien rakentaminen tulee aloittaa pienistä kokonaisuuksista ja skaalata suuremmiksi projektin edetessä. Jokaisessa suunnitteluvaiheessa virtuaalista käyttöönottoa hyödynnetään heti, kun sillä suoritettava testaus on mahdollista. Näin toimimalla virtuaalinen käyttöönotto on osa suunnitteluprosessia ja siitä saatava hyöty maksimoidaan. (Oppelt et al. 2014.) Lisäksi Shahim et al. (2016) ja Oppelt et al. (2014) esittävät virtuaalisen käyttöönoton hyödyntämistä varsinaisen käyttöönoton jälkeen, esimerkiksi operaattoreiden koulutuksessa.

2.3 Siemens Digital Enterprise -tuoteportfolion ohjelmistot digitaalisen kaksosen ja virtuaalisen käyttöönoton toteutukseen

Siemensin Digital Enterprise -tuoteportfoliossa digitaalisen mallin rakentaminen, simulointi ja virtuaalinen käyttöönotto jaetaan neljään eri tasoon: tehdas, tuotantolinja/ robottisolu, tuotantokoneen validointi ja tuotantokoneen optimointi. Taulukossa 2 on esitelty simuloinnin ja virtuaalisen käyttöönoton eri tasot, ominaisuudet ja työkalut.

Taulukko 2: Simuloinnin ja virtuaalisen käyttöönoton tasot ja ominaisuudet, mukailtu (Siemens ja Afry 2020)

Simulointitaso	Ominaisuudet	Työkalu		Prosessin ja toimilaitteiden simulointi	PLC simulointi
Tehdas	Pullonkaula-analyysi Tuotannon skenaariosimulointi Läpimenoajan optimointi Kapasiteetin simulointi Tuotannonohjauksen optimointi Logistiikan optimointi	Plant Simulation	+	SIMIT	PLCSIM Advanced
Tuotantolinja / robottisolu	Sykliaika /läpimenoaika Koneiden sijoittelun suunnittelu Turvaohjelman validointi Törmäystarkastelu Robottien ulottuvuuden tarkastelu Robottien offline-ohjelmointi Ohjelmakoodin validointi	Process Simulate			
Tuotantolaitteen validointi	Sekvenssien analysointi Turvaohjelman validointi Automaatio-ohjelman laadun parantaminen Toimilaitteiden simulointi Mekaniikkasuunnittelun optimointi Törmäystarkastelu	NX Mechatronics Concept Designer			
Tuotantolaitteen optimointi	Säätöpiirien optimointi Komponenttien mitoitus Virtuaalisensoreiden kehitys	Amesim			

Taulukossa 2 esitetyt prosessin ja toimilaitteiden simulointi sekä PLC-simulointi voidaan yhdistää eri simulointitasojen kanssa, jolloin jokaisella tasolla on mahdollista suorittaa kokonaisuudelle virtuaalinen käyttöönotto (Siemens ja Afry 2020).Virtuaalisen käyttöönoton ympäristö rakennetaan asiakkaan käyttötarpeen mukaan ja Digital Enterprise -portfolio mahdollistaa toteutuksen neljällä tasolla eri käyttötarkoituksia varten. Lisäksi ylemmän tason tuloksia voidaan käyttää alemman tason lähtötietoina suurimman hyödyn saavuttamiseksi. (Siemens ja Afry 2020).

3 Projektitoimitukset

Aikaisemmin projektinhallinta keskittyi yksittäisten projektin läpivientiin ja kommunikointi projektien välillä perustui yrityksen rakenteeseen, eikä muutokselle ollut tarvetta. Nykyisessä ympäristössä projekteihin keskittyvät yritykset joutuvat vastaamaan nopeasti muuttuvaan markkinaan, lyhentyneisiin tuotteiden elinkaariin ja asiakkaan vaatimiin kokonaisratkaisuihin. Yritysten tulee muuttaa oma toimintansa joustavaksi ja reagointikykyseksi, jonka avulla vastataan asiakkaan vaatimuksiin, keskitytään ydinosaamiseen, nopeutetaan päätöksentekoa ja lyhennetään toimitusaikoja. (Patzak et al. 2012, s. 451.) Liiketoiminta-alueena projektitoiminta on kasvava alue, jossa projektituotoksilla vastataan asiakkaan asettamiin vaatimuksiin (Mäntyneva 2016, s. 11). Jos yrityksessä suurin osa tuotteista tai palveluista tuotetaan projekteissa ulkoisille tai sisäisille asiakkaille, kutsutaan sitä projektiorientoituneeksi (Backlund ja Sundqvist 2018). Seuraavissa alaluvuissa keskitytään projektin ja toimitusprojektin määritelmiin sekä projektin onnistumisen kannalta merkittäviin tekijöihin.

3.1 Projektin ja toimitusprojektin määritelmä

Projekti on tilapäinen pyrkimys saavuttaa jokin tietty tavoite tietyssä ajassa (Young 2010, s.15). Mäntyneva (2016, s. 12) lisää projektin määritelmään sen ainutkertaisuuden, joka on ajan lisäksi rajoitettu kustannusten ja laajuuden osalta. Projektit voidaan rajata eri tyyppeihin (Kettunen 2003, s. 17; Pelin 2009, s. 33; Mäntyneva 2016, s. 11–12):

- Yrityksen sisäiset kehitysprojektit
- Toimitusprojektit
- Tutkimusprojektit
- Toteutusprojektit
- Rakennusprojektit
- Tuotekehitysprojektit

- Toiminnan kehittämisprojektit
- Investointiprojektit
- Tietojärjestelmäprojektit

Toimitusprojekti toteutetaan asiakkaan toimeksiannosta kertaluontoisena. Toimitusprojekti voi sisältää palvelun, tuotteen tai ratkaisun. (Mäntyneva 2016, s. 13.) Aloitus tapahtuu sopimuksesta asiakkaan kanssa ja päättyy luovutukseen. Toimitusprojektin kannattavuus ja aikataulun pitävyys ovat olennaisia asioita menestymisen kannalta (Pelin 2009, s. 36.) Lisäksi Mäntyneva (2016, s. 13) mainitsee laadun merkityksen ja toteaa projektitoimitusten usein liittyvän tuotantolinjan, tietojärjestelmän tai vastaavaan käyttöönottoon.

3.2 Toimitusprojektin onnistumisen edellytykset

Onnistunut projekti saavuttaa sille asetetut tavoitteet sovitussa aikataulussa ja budjetissa. Lisäksi asiakkaan tiimin ja muiden sidosryhmän jäsenten tulee olla tyytyväisiä. (Patzak et al. 2012, s. 27) Todellisuudessa on haasteellista saavuttaa tekemiseen, aikatauluun ja talouteen liittyvät tavoitteet samanaikaisesti. Usein projektin työkuorma levittäytyy organisaatiossa laajalle ja projekteja tehdään päällekkäin. Tähän yhdistettynä riittämätön suunnittelu ja organisointi haittaavat projektin tavoitteiden saavuttamista. (Mäntyneva 2016, s. 147–152.) Projektin onnistumiselle on eri mittareita ja näkökulmia riippuen siitä katsooko asiaa asiakkaan, projektipäällikön, tiimin, resurssin tai projektin sponsorin näkökulmasta (Young 2010, s. 8–9).

3.2.1 Projektiviestinnän merkitys

Huono viestintä on suurin syy erilaisten konfliktien syntymiselle projektissa (Young 2010, s. 165). Viestintä on jaettavissa sisäiseen ja ulkoiseen viestintään. Viestinnän piiriin kuuluvat projektiryhmän jäsenet, projektin seuranta- ja ohjausryhmä, projektin tilaaja, projektin rahoittaja, tiedotusvälineet sekä mahdolliset viranomaistahot. (Mäntyneva 2016, s. 113). Viestinnän tärkeys kasvaa, kun projektin ympäristö muuttuu monimutkaisemmaksi. On tärkeää implementoida asianmukaiset viestintätavat, rohkaista tiimin jäseniä kommunikoimaan sekä varmistaa tiimin jäsenten saavan projektityönsä suorittamiseen tarvittavat tiedot. Projektit, joissa viestintä epäonnistuu tiedon puutteen tai liiallisen tietotulvan seurauksena esiintyy tehottomuutta sekä motivaation katoamista.

(Patzak et al. 2012, s. 94–95.) Projektinhallinnan kannalta ideoiden ja päivitetyn tiedon jakaminen sekä ongelmien ratkaisu yhdessä ovat tärkeitä viestinnällisiä elementtejä. (Mäntyneva 2016, s. 114). Hyödyntämällä nykyaikaisia ohjelmistoja viestinnän tehokkuutta saadaan kasvatettua luomalla yhteiset käytännöt ja ”kieli”, jotka parantavat kommunikointia ja säästävät huomattavasti aikaa (Young 2010, s. 94–95). Joissakin organisaatioissa viestinnän rajapinnat muodostuvat toimintojen ja osastojen välille, joita toimintakulttuuri muokkaa. Osassa organisaatioita viestintä voi olla hyvin avointa, kun taas toisissa organisaatiossa se on hyvin suppeaa - jopa salailevaa. Varsinkin jos osastoilla on eriävät tavoitteet. Erityisesti teknisemmissä ympäristöissä oletetaan helposti ammattitermistön aukeavan kaikille yksiselitteisesti, mikä saattaa vaikeuttaa viestin perillemenoa. (Mäntyneva 2016, s. 115.) Käytännössä tiimin jäsenet saattavat tehdä päätöksiä ilman, että kommunikoivat niitä muille projektitiimin jäsenille tai alkavat kehittää omia tavoitteita projektille tiedon puutteen takia. Luonnollisesti nämä aiheuttavat ongelmia projektin toteutukselle ja tiimin jäsenten motivaatio alentuu. (Patzak et al. 2012, s. 249–250).

3.2.2 Projektin muutosten hallinta

Projektin edetessä tulee tarve tehdä muutoksia, jotka johtuvat sekä ulkoisista että sisäisistä tekijöistä. Niiden negatiivinen tai positiivinen vaikutus projektin aikatauluun, tuotokseen, kustannuksiin tai laatuun kytkeytyy vahvasti muutoksenhallinnan käytännön toteutukseen. (Mäntyneva 2016, s. 105.) Toimitusprojekteissa voi asiakkaalta tulla muutostoivomuksia projektin sisältöön, joiden syinä ovat esimerkiksi kilpailijoiden toimenpiteet, asiakkaan tarkentuneet tarpeet, ulkoiset muutokset, toiset kehitysprojektit tai uudet innovaatiot. (Pelin 2009, s. 213.) Teknisten muutosten osalta olennainen haaste on hallita muutokset siten, että projekti toteutetaan oikein muuttuneiden vaatimusten mukaan, asiakas hyväksyy projektin ja projekti toteutetaan tehokkaasti muuttuneesta laajuudesta huolimatta (Patzak et al. 2012, s. 297–298). Projektin liiketoiminnallinen arvo on määritelty projektin alkuvaiheessa ja muutosten tarpeellisuus tulee tarkastella sen näkökulmasta. Toisaalta liiketoiminnallinen arvo voi muuttua projektin edetessä, kun lisää informaatiota tulee saataville. (Yaoung 2010, s. 49–50.)

3.2.3 Projektin riskien hallinta

Projekteissa menestyminen riippuu siitä, kuinka hyvin niissä esiintyviä riskejä hallitaan projektin aikana (Young 2010, s. 93). Riskillä tarkoitetaan mahdollista negatiivista poikkeamaa projektin tavoitteista (Pellinen 2009, s. 226). Projektin riskienarviointi alkaa jo projektin alkuvaiheessa ja sitä suoritetaan systemaattisesti projektin edetessä. Riskien hallinnalla pyritään minimoimaan negatiivisten riskien vaikutukset. Tulee myös huomioida, että projektin jäsenillä on eriäviä näkemyksiä riskien vaikutuksista projektin läpivientiin, johtuen heidän omista tavoitteistansa. (Patzak et al. 2012, s. 226–227). Riskien hallinta korostuu erityisesti projekteissa, jotka sisältävät innovaatioita, ovat kooltaan suuria ja vaativat eri osastojen välistä yhteistyötä. Osa pitää riskienhallinnan kustannuksia liian suurina, mutta usein riskien realisoitumisen jälkeen virheiden korjaus myöhemmässä vaiheessa muodostuu kalliimmaksi kuin niiden hallinta. Riskien vaikutusta projektiin tulisi arvioida projektin laadun, kustannusten ja aikataulun näkökulmasta. (Young 2010, s. 114–119

3.2.4 Asiakaslähtöisyys

Projekti on keino saavuttaa asiakkaan asettamien vaatimusten mukainen lopputulos. Nämä vaatimukset toimivat projektin laatutavoitteina, joiden saavuttamisen jälkeen projekti tulee päätökseen. Projektin päätepiste ei ole budjetoidun ajan ja kustannusten täyttyminen. Laadullisten tavoitteiden mittaaminen on haastavaa verrattuna ajan ja kustannusten mittaamiseen, jolloin laadullinen mittaaminen jää usein toisarvoiseksi. (Patzak et al. 2012, s. 161.) Asiakkaan tarpeiden määrittelyn kautta on mahdollista valmistaa tuote, joka vastaa asiakkaan odotuksiin. Mikäli asiakkaan vaatimukset ymmärretään projektin alussa väärin, vaikuttaa se kielteisesti koko projektin läpiviennin ajan. Asiakkaan tarpeet ovat vähimmäisvaatimus, jotka tulee täyttää projektin aikana. Usein asiakkaalla on lisäksi toivomuslista, jota ei välttämättä kommunikoida asiakkaan suunnalta. Asiakas kuitenkin olettaa näiden kohtien täyttyvän. Toivomuslistan kohdat paljastuvat projektin edetessä ja uusia tarpeita syntyy lisää, kun asiakas näkee projektin edistyvän. (Young 2010, s. 60–62.). Projektin aikana tehdään oletuksia asiakkaan tarpeista. Mikäli näitä oletuksia ei varmisteta asiakkaalta, voi virheellisistä oletuksista koitua haasteita, jotka joudutaan ratkaisemaan myöhemmässä vaiheessa. (Young 2010, s. 70.) Monet projektin ongelmista voidaan välttää tekemällä yhteistyötä asiakkaan kanssa. Yhteistyötä vahvistetaan ottamalla asiakas osaksi projektin tiedonvälitystä,

osallistamalla asiakas projektin päätöksentekoon. Jokaisen projektin tavoitteena on asiakastyytyväisyys, joka pohjautuu tuotteen ja toimitusprosessin laatuun. (Patzak 2012, s. 166–168.) Lisäksi Patzak et al. (2012, s. 457) toteavat projekteihin keskittyvissä yrityksissä menestyksen perustuvan teknisten ratkaisuiden laatuun ja sitä kautta asiakastyytyväisyyteen.

4 Raute Oyj:n toimitusprosessin haasteiden kartoitus

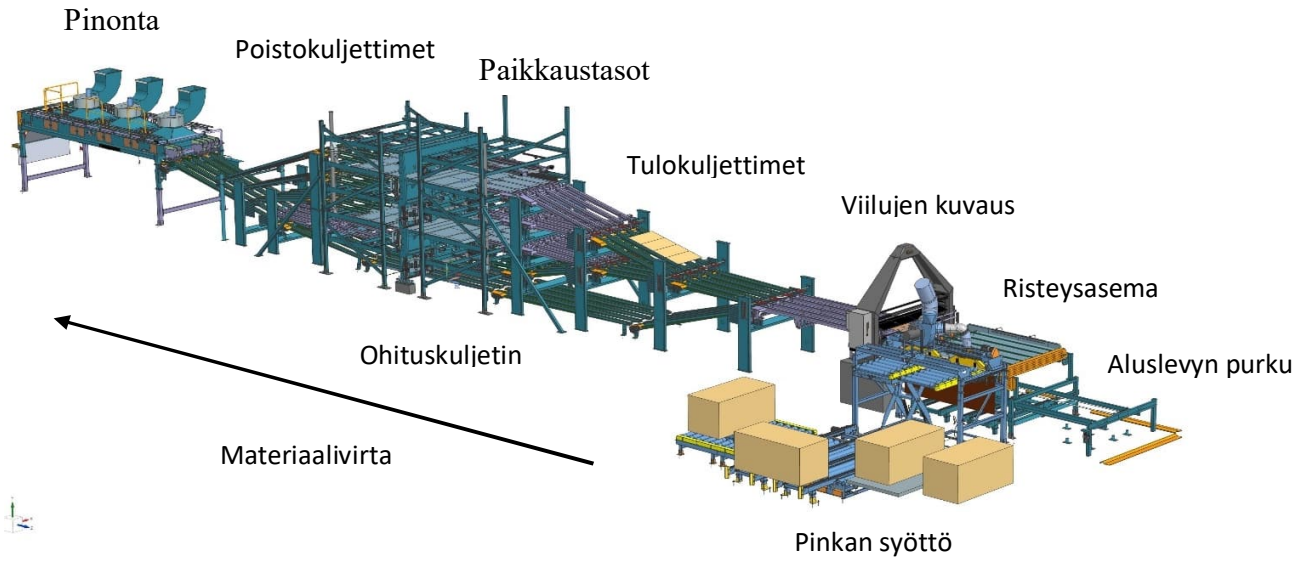
Luvussa käydään läpi kvalitatiivisen puolistrukturoidun haastattelun toteutus, jonka avulla kartoitettiin Raute Oyj:n viilunpaikkauslinjan toimitusprosessi ja siihen liittyvät haasteet. Luvun lopussa tehdään yhteenveto haasteista ja teemoista.

Virtuaalisen käyttöönoton hyödyntäminen toimitusprojektissa vaatii suunnittelua ja toteutusta oikea-aikaisesti. Luvussa 2.2.4 painotettiin kustannus-hyötysuhteen tärkeyttä, jonka avulla voidaan rajata virtuaalisen käyttöönoton kannalta sopiva kokonaisuus. Projektin alkuvaiheessa tulee tehdä riittävä selvitys tarpeista ja virtuaalisen käyttöönoton teknisestä toteutuksesta, joiden avulla arvioidaan työmäärä ja saavutettavat hyödyt. Simulointimallin tulee valmistua oikea-aikaisesti ja ottaa osaksi suunnittelua, jotta virtuaalisesta käyttöönottoa pystytään hyödyntämään ennen varsinaista käyttöönottoa. Virtuaalinen käyttöönotto ei ratkaise vain yhden suunnitteluosaston, esimerkiksi automaation, haasteita, vaan siihen tulee myös osallistua sähkö-, mekaniikka-, turva- ja automaatiosuunnitteluosastojen. Luvussa 2.1.1 esitetyn Grieves et al. (2017) näkemyksen mukaan käyttöönoton jälkeen tuotantolinjan digitaalinen prototyyppi voidaan täydentää digitaaliseksi kaksoseksi luomalla yhteys fyysiseen tuotantolinjaan, jota kutsutaan digitaalisen kaksosen instanssiksi. Tämän jälkeen digitaalista kaksosta voi hyödyntää esimerkiksi huoltoliiketoiminnassa.

4.1 Raute Oyj:n nelitasoisen viilunpaikkauslinjan ja toimitusprosessin esittely

Raute Oyj:n nelitasoinen viilunpaikkauslinja edustaa tehokkainta ja automaation osalta pisimmälle vietyä ratkaisua viilun paikkauksessa. Kuvassa 7 on esitelty nelitasoisen viilunpaikkauslinja pääpiirteissään. Tuotantolinjan alkupäässä viilupinkat otetaan vastaan trukilta kahdesta eri suunnasta tai automaattiselta siirtokuljettimella. Pinkan syötön jälkeen pinkoista puretaan yksittäiset viilut risteysasemalle, jonka jälkeen kameranäkö kuvaa jokaisen viilun paikattavat kohdat. Tulokuljettimilla viilut jaetaan eri paikkaustasoille tai ohituskuljettimelle. Paikkaustasoilla viilut keskitetään mekaanisesti, jonka jälkeen viilut poimitaan pneumaattisella tarttujalla ja siirretään xyz-portaalirobotilla paikkaustyökalulle. Paikkaustyökalut ovat asennettu kiinteäasti ja xyz-portaalirobotti hoitaa viilujen liikuttamisen oikeaan paikkaan paikkausta varten. Paikkauksessa poistetaan haluttu kohta, esimerkiksi oksa, ja paikataan reikä viilurainasta valmistetulla paikalla. Paikkauksen

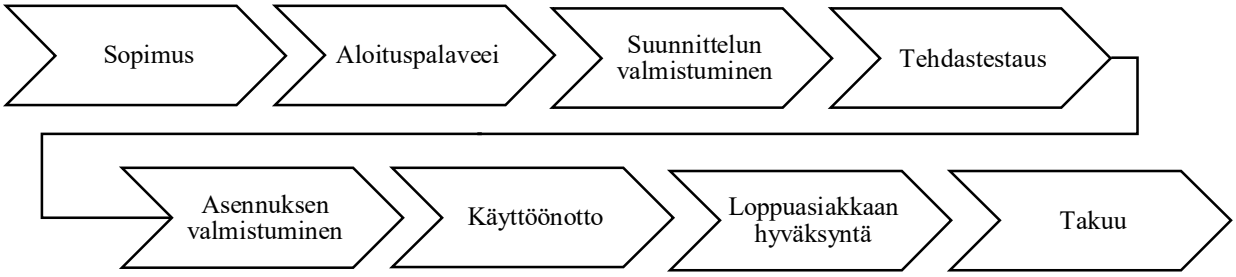
jälkeen viilut siirretään poistokuljettimilla viilujen pinontaan, josta valmiit pinkat käydään hakemassa siirtokuljettimella pois.



Kuva 7: Raute Oyj:n nelitasoisten viilunpaikkauslinjan osat ja materiaalivirta.

Nelitasoinen viilunpaikkauslinjan kapasiteetti on 12 000kpl paikkoja tunnissa ja tuotantolinjan operointiin riittää yksi henkilö. Samalla tuotantolinjalla voidaan ajaa eri viilukokoja. Lopputuotteena syntyy paikattu tasalaatuinen viilu. (Raute 2021b.)

Raute Oyj hyödyntää projektitoimituksissa vakiintunutta toimitusprosessia, jonka päävaiheet ovat esitetty kuvassa 8. Jokainen vaihe pitää sisällään määrätyt toimenpiteet, jotka tulee suorittaa ennen kuin voidaan siirtyä seuraavaan vaiheeseen.



Kuva 8: Raute Oyj:n toimitusprosessin päävaiheet

Raute Oyj dokumentoi ja seuraa toimitusprosessin eri vaiheiden etenemistä osana projektitoimitusta. Standardoidun toimintatavan avulla tehostetaan toimituksia sekä keskitetään projektin läpiviennin kannalta oleellinen informaatio yhteen paikkaan. Toimitusprosessin eri vaiheita, toimenpiteitä ja haasteita tarkastellaan yksityiskohtaisemmin luvuissa 4.3.1–4.3.6.

4.2 Puolistrukturoidun haastattelututkimuksen toteutus

Luvut 4.3–4.5 keskittyvät ensimmäiseen alatutkimuskysymykseen: Minkälaisia haasteita sisältyy toimitusprojektiin? Tutkimuksen osa toteutetaan kvalitatiivisena puolistrukturoituna haastatteluna, josta käytetään myöhemmin nimeä teemahaastattelu.

Teemahaastattelussa valitaan yksi yhteinen aihe, joka tarkentuu haastatteluiden edetessä. Teemahaastattelussa ei ole rajattu haastateltavien määrää, eikä tarkkoja kysymyksiä, vaan edetään keskeisten teemojen varassa, jotka ovat kaikille haastateltaville samoja. (Hirsjärvi ja Hurme 2015, s. 48.) Tämä tuo tutkittavien näkökulmat esiin teemoista ja mahdollistaa asioiden yksityiskohtaisen ymmärtämisen. Haastattelun pohjalta saadaan asetettua haastateltavan puhe osaksi laajempaa kokonaisuutta. (Creswell. 2014, s. 186).

Kvalitatiivisessa tutkimuksessa valitaan yksi tukittava aihe, jota lähdetään rajaamaan tarkemmilla kysymyksillä. Tutkimuksen edetessä, myös tarkentavat kysymykset voivat vaihtua, jotta saadaan mahdollisimman hyvä ymmärrys tutkittavasta aiheesta. (Creswell. 2014, s. 139–140.) Raute Oyj:n projektitoimituksessa ei ole vastaavaa nelitasoista paikkalinjaa, joka olisi toimitettu ja käyttöönotettu. Saatavilla ei ole mitattua dataa nelitasoisen paikkalinjan toimituksesta, joten kvantitatiivinen tutkimus rajattiin pois. Projektitoimituksen haasteiden kartoituksessa haluttiin tutkia projektihenkilöiden kokemuksia ja muodostaa niistä kokonaisuus. Tästä syystä valittiin kvalitatiivinen lähestymistapa.

Kvalitatiivisessa tutkimushaastattelussa tulee säilyttää joustavuus haastatteluiden edetessä, jotta voidaan saavuttaa tarvittava ymmärrys tutkittavasta aiheesta. Haastatteluiden edetessä voi olla tarpeen muokata tutkimuksen suuntaa, lisätä tai poistaa haastateltavia tai muuttaa haastatteluiden teemaa. (Rubin ja Rubin. 2005. s 35). Lähtökohtana voi olla alustava suunnitelma, josta keskustellaan haastateltavien kanssa ymmärryksen lisäämiseksi. Näin voidaan tarkentaa haastattelun teemaa ja haastateltavien henkilöiden joukkoa (Hirsjärvi et al. 2015, s. 59). Haastateltavat valitaan siten, että

he pystyvät kuvaamaan mahdollisimman hyvin tutkittavaa aihetta ja lisäämään näin tutkijan ymmärrystä aiheen tiimoilta. (Creswell. 2014, s. 189).

Haastatteluita varten suunnitellaan haastattelurunko kysymysten esittämistä ja tilaisuuden läpivientiä varten. Haastattelurungon tulisi sisältää haastattelun päätiedot, ohjeet haastattelijalle, kysymykset ja niiden mahdollinen tarkentaminen sekä lopussa yhteenveto ja kiitokset haastateltavalle hänen ajastaan ja panostuksestaan. (Creswell, 2014, s.194).

Kvalitatiivisen tutkimuksen analyysissa kerätty aineisto tulisi jakaa viidestä seitsemään eri teemaan. Analyysin tekeminen voidaan aloittaa jo haastatteluiden aikana ja sitä voidaan käyttää loppuraportin narratiivina. (Creswell. 2014, s. 195.) Tällä tarkoitetaan sitä, että analyysivaiheessa etsitään aineistosta sellaisia nousevia aiheita, jotka ovat yhteisiä haastateltaville (Hirsjärvi et al. 2015. s. 173). Raute Oyj:n projektitoimituksessa esiintyvät eri teemat asetettiin projektitoimituksen aikajanalle eri vaiheisiin. Analyysin lopputuloksena muodostui kokonaiskäsitys projektitoimituksen haasteiden kumuloitumisesta eri vaiheille.

Tutkimushaastattelu aloitettiin keskustelemalla projektiliiketoiminnan johtajan kanssa yleisellä tasolla projektitoimitusten haasteista sekä määriteltiin haastateltavat henkilöt.

Suunnitteluun ja valmistamiseen liittyvä osaaminen on moniulotteista, ja usein jopa henkilöitynyttä. Oikean osaamisen hyödyntäminen oikeaan aikaan on haastavaa, kun suunnittelu ja tuotanto ovat ajallisesti pitkä prosessi. -Projektiliiketoiminnan johtaja

Keskustelussa nousi esille osaamisen olevan hyvin henkilöitynyttä, joka osaltaan vahvisti teemahaastattelun tarvetta eri suunnittelijoiden kanssa. Projektiliiketoiminnan johtaja nosti esille haasteiden kumuloituvan käyttöönottoon, mikä vaikeuttaa käyttöönottojen tehostamista.

Haastateltaviksi valittiin henkilöt, joilla katsottiin olevan merkittävä rooli projektin onnistumisessa ja toisaalta näkemystä projektitoimituksen haasteista. Haastateltavia tuli yhteensä seitsemän henkilöä ja heidän toimenkuvansa olivat: projektipäällikkö, tuotepäällikkö, pääsuunnittelija, sähkö- ja automaatiosuunnittelija, turvasuunnittelija, PLC-ohjelmointi ja huoltoliiketoiminta. Jokainen haastattelu oli pituudeltaan yhden tunnin ja toteutettiin Teams-työkalun avulla etätyöskentelynä. Haastattelut nahoitettiin myöhempää litterointia ja analyysia varten. Haastatteluita varten muodostettiin haastattelurunko (liite 1), jota hyödynnettiin varsinaisen haastattelun aikana. Mikäli haastattelussa nousi esille teeman kannalta merkittävä asia, syvennettiin osa-aluetta tarvittava määrä ja

palattiin myöhemmin takaisin haastattelurunkoon. Haastattelut oli jaettu kahteen osioon. Ensimmäisessä osiossa keskityttiin haastateltavan henkilön toimenkuvaan ja vastuualueisiin Raute Oyj:llä. Toisessa osiossa kartoitettiin henkilön osuutta paikkalinjan projektitoimituksessa ja siihen liittyvissä haasteissa.

Haastateltavien eri näkemykset haasteista pyrittiin validoimaan seuraavan henkilön haastattelun yhteydessä. Esimerkiksi, jos mekaniikkasuunnittelija kertoo haasteeksi, kuinka mekaaniset muutokset vaikuttavat automaatio-ohjelman toimintaan, voidaan tämä väittämä tarkistaa automaatio-ohjelman suunnittelijalta. Tavoitteena oli löytää suurimmat yhteiset haasteet projektitoimituksessa, jotka projektiliiketoiminnan johtajan mukaan kumuloituvat eri suunnitteluvaiheesta toiseen ja saattavat viivästyttää koko projektitoimitusta. Lisäksi haluttiin ymmärtää haasteiden riskitekijöitä. Jos haasteena on esimerkiksi erilaisten skenaarioiden testaus käyttöönotossa, voi siihen liittyä suuri riski törmäyksestä. Tämän seurauksena kyseisen haasteen ratkaiseminen on mielekästä kahdesta syystä: käyttöönottoa tehostetaan testaamalla erilaisia skenaarioita etukäteen ja samalla päästään eroon merkittävästä riskistä.

4.3 Tutkimushaastattelun tulokset ja projektitoimituksen haasteet eri vaiheissa

Seuraavissa alaluvuissa käydään läpi haastattelututkimuksen tulokset toimitusprosessin mukaisessa kronologisessa järjestyksessä. Jokaisesta toimitusprosessin vaiheesta kuvataan niissä tehtävät toimenpiteet ja vaiheeseen liittyvät haasteet. Tuloksia luettaessa tulee huomioida, että haastatteluissa keskityttiin pääosin projektitoimitusten haasteisiin ja niiden syihin. Tuloksissa ei käydä läpi projektitoimituksissa tapahtuvia onnistumisia. Lisäksi haastateltavat kertoivat kokemuksiaan eri projekteista, eivätkä kaikki haasteet esiinny yhtä aikaa yhdessä projektitoimituksessa.

4.3.1 Sopimus ja projektitoimituksen aloituspalaveri

Haastatteluihin perustuen sopimusvaiheessa käydään läpi tarjous, sopimukset, muodostetaan projektiryhmä ja budjetti. Aloituspalaverissa avataan sisäiset työnumerot, sovitaan tapaamiset, käydään prosessikuvaus asiakkaan kanssa läpi, tehdään aikataulut ja tarvittavat dokumentit. Haastatteluissa nousi esille asiakastarpeen ymmärtämisen tärkeys ja toisaalta oman toimitussisällön havainnollistaminen asiakkaalle.

Heti alussa on ymmärrettävä, mitkä ovat asiakkaan odotukset ja asiakkaiden on ymmärrettävä miten me teemme oman työmme. -Haastateltava 1

Myyntivaiheessa teknologiapuolelta ovat mukana tuotepäällikkö ja pääsuunnittelija. Tuotepäällikkö vastaa laitteen toiminnallisuuksista ja pääsuunnittelija mekaanisista muutoksista. Yhdeksi haasteeksi nousi esille ovaalinmuotoinen paikka, joka liittyy lopputuotteen laadullisiin ominaisuuksiin. Lisäksi nelitasoiselle paikkaustasolle on suunniteltu kokonaan uusi aluslevyjen poistolaite, jota ei ole aikaisemmin testattu.

Joskus toivoisi automaatiosuunnittelun olevan mukana jo tarjousvaiheessa tuomassa omia mielipiteitään esille. Automaatio tulee mukaan vasta, kun kaupat ja prosessikuvaus on tehty. -Haastateltava 4

Haastatteluissa nousi esille, että automaatiosuunnittelija ei ole juurikaan myynti- ja sopimusvaiheessa mukana. Tämä aiheuttaa haasteita projektitoimituksen myöhemmässä vaiheessa, kun jo sovitut ratkaisut eivät onnistu olemassa olevilla ohjelmilla ja osan muutoksista olisi voinut toteuttaa järkevämmin automaation näkökulmasta.

Mekaniikkapuolen uudet toiminnallisuudet vaativat tietenkin muutoksia (ohjelmakoodissa). Automaation näkökulmasta suunnittelun voisi tehdä järkevämmin. -Haastateltava 4

Yhteenvetona todetaan, että myynti- ja sopimusvaiheessa tehdään projektitoimituksen kannalta merkittäviä päätöksiä, kuten aikataulu ja budjetti. Toisaalta haastatteluissa nousi esille, että ensimmäiset teknologiaan liittyvät haasteet alkavat kumuloitua heti sopimuksen allekirjoittamisen jälkeen.

4.3.2 Suunnittelun valmistuminen

Kolmannessa vaiheessa varmistetaan projektitoimituksen resurssit, käytettävät komponentit, tehdään yksityiskohtainen mekaniikkasuunnittelu, aloitetaan turva-, sähkö- ja automaatiosuunnittelu, hyväksytetään koneen pääpiirustus asiakkaalla sekä varmistetaan käyttöönoton resurssit. Haastatteluiden mukaan aloituspalaverin jälkeen suunnittelijoiden työkuorma lähtee kasvamaan ja suurempi osa toteuttavasta projektiorganisaatiosta tulee mukaan projektitoimitukseen. Aikaisemmin todettiin osaamisen olevan henkilöitynyttä ja tähän tuli vahvistusta haastatteluiden edetessä. Tavoitteena on keskittää projektin tiedot yhteen paikkaan, mutta edelleen osa tiedosta kulkee

suunnittelijalta toiselle ja dokumentit jäävät päivittämättä. Lisäksi mainittiin hiljainen tieto, joka jää suunnittelijoille, mutta sitä ei dokumentoida missään.

Suunnittelupäällikön kanssa oli jo sovittu asiasta. Otin tilauslomakkeesta tietoja, jotka olivat jo vanhentuneet. Jouduttiin tekemään uudelleen suunnittelua. -Haastateltava 3

Asioita tulisi dokumentoida enemmän. Asioista puhutaan, mutta sitä ei näy missään. Hiljainen tieto jää ihmisille. -Haastateltava 4

Suunnitteluvaiheessa nousi esille läpinäkyvyyden puute suunnittelijoiden välillä. Läpinäkyvyydellä eri suunnittelijoiden välillä viitataan tiedonkulun haasteisiin. Jokainen suunnittelija työstää omaa osuuttaan tuotantolinjasta, mutta ei omaa täyttä ymmärrystä siitä missä vaiheessa muut suunnittelijat etenevät.

Toivoisin läpinäkyvyyttä automaatioon. Tiedettäisiin mitä on oikeasti tehty. -Haastateltava 2

Myynti- ja sopimusvaiheessa toivottiin automaatiosuunnittelun saavan enemmän läpinäkyvyyttä, jotta suunnittelija voisi tuoda omia näkemyksiään paremmin esille ja välttää turhat ohjelmamuutokset projektin edetessä. Myynti- ja sopimusvaiheessa ei kuitenkaan nähdä tarpeelliseksi automaation mukaan ottamista, mutta kuitenkin toivotaan automaatiosuunnittelijalta enemmän läpinäkyvyyttä oman työn edistymisestä.

Turvasuunnittelu aloitetaan ennen sähkösuunnittelua. Turvasuunnittelu sisältää tuotantolinjan jakamisen eri turva-alueisiin, joiden sisällä olevat laitteet voidaan pysäyttää turvallisesti tarpeen vaatiessa. Lisäksi suunnitellaan linjan suojaaminen turva-aidoilla, valoverhoilla ja tehdään laskennat koneen turvatoimintoja varten. Tuotantolinjan turvatoiminnallisuudet toteutetaan turvaohjelmalla, joka suoritetaan PLC-ohjelman rinnalla. Haastattelussa nousi esille turvasuunnittelun kytkeytyvän sekä mekaniikkasuunnitteluun että sähkö- ja automaatiosuunnitteluun. Mekaniikkasuunnittelun muutokset vaikuttavat turvasuunnitteluun esimerkiksi turva-aitojen sijoittelun osalta. Sähkösuunnittelussa tulee huomioida valitut turvatoimilaitteet ja automaatiosuunnittelijan pitää huomioida omassa turvaohjelmassaan tapahtuneet muutokset. Vaikka turvasuunnitteluun vaikuttavat toisten suunnittelijoiden tekemät ratkaisut, ovat turvasuunnittelun perusratkaisut hyvin standardisoituja.

Turvaratkaisut ovat hyvin standardoitu. Perusratkaisut ovat hyvin samantapaisia. - Haastateltava 5

Oman haasteensa turvasuunnittelulle antaa eri variaatioiden määrä. Ovien, valoverhojen, turva-alueiden ja kuljettimen lukumäärä sekä paikka vaihtelee projektista toiseen. Seurauksena turvasuunnitelmaa joudutaan muuttamaan useaan kertaan kuten haastatteluissa selvisi.

Mekaniikkasuunnittelu ei ole vielä ihan valmis. Asiakas ei ole kertonut kaikkea tai saattaa muuttaa suunnitelmiaan. Tässä vaiheessa turvasuunnittelu on vielä veivailua ja joudutaan tekemään muutoksia. Mekaniikkasuunnittelun muutokset näkyvät aina turvasuunnittelussa. -Haastateltava 5

Muutokset heijastuvat myös automaatiosuunnitteluun, jossa osa muutoksista tulee hieman myöhässä tai jopa yllätyksenä.

Turvapuoleen tehdään muutoksia viime tingassa. Ei tiedetä muutoksista etukäteen. - Haastateltava 7

Haasteiden lukumäärä kasvaa projektitoimituksen kolmannessa vaiheessa, kun projektiryhmä kasvaa, käynnistetään eri suunnitteluvaiheita ja työskennellään limittäin. Erityisesti korostui suunnittelijoiden välinen yhteys. On selkeä tarve ymmärtää muiden suunnittelijoiden ratkaisuja paremmin, jolloin voi huomioida muutokset omissa ratkaisuissa. Mekaniikkasuunnittelu vaikuttaa suoraan turva-, sähkö- ja automaatiosuunnitteluun. Toisaalta osa mekaniikkasuunnittelun ratkaisuista voitaisiin toteuttaa paremmin automaation näkökulmasta. Suunnittelijoiden yhteinen tavoite on saada toimiva kokonaisuus vastaamaan asiakkaan tarpeita, mutta ratkaisuja tehdään kuitenkin omassa rajatussa ympäristössä, eikä välttämättä ymmärretä vaikutuksia kokonaisuuteen.

4.3.3 Tehdastestauksen toteutus Raute Oyj:n tiloissa

Neljännessä vaiheessa suunnittelu on saatu valmiiksi, valmistus on saatu päätökseen, Nastolassa testattavat osuudet kokoonpannaan, testataan sekä suoritetaan tehdastestin vaatimat koeajot. Eri haastatteluissa nousi esille tehdastestauksen tärkeys projektitoimituksessa. Kyseisessä vaiheessa nähdään ensimmäisen kerran osa tuotantolinjan toimivuudesta sekä miten eri suunnittelijoiden tekemät ratkaisut toimivat kokonaisuutena. Nelitasoisesta paikkalinjasta kasataan tehdastestejä varten alkupään tulokuljettimet, neljä paikkaustasoa ja loppupään kuljettimet. Tehdastestien

ulkopuolelle jäävät tuotantolinjan alkupään pinkansyöttö ja loppupään viilujen pinoaminen. Tehdashallissa ei ole riittävästi tilaa kokonaisen tuotantolinjan kokoonpanolle. Osittaisen testauksen seurauksena turva jää usein tehdastestien ulkopuolelle.

Asiakkaan luona käyttöönotossa vasta oikeasti testataan. Nastolassa ei testata turvapuolta juurikaan, ehkä vain noin 5–10 % turvaprojekteista. -Haastateltava 5

Haastatteluissa selvisi, että joissakin tapauksissa turvapuolen ratkaisu on kasattu tehdastestausta varten ja näissä projekteissa on ollut vähemmän haasteita varsinaisessa käyttöönotossa toimivan turvaohjelman ansiosta. Pääsääntöisesti tämä kuitenkin jätetään pois suuren työkuorman, tilanpuutteen ja aikataulupaineiden takia.

Yksi yhteinen esille noussut teema haastateltavien välillä olivat aikataulupaineet. Haastatteluissa selvisi osien myöhästymisen, laatuongelmien tai suunnitteluvirheiden viivästyttävän koekäytön aloittamista.

Linjan kasaus lähtee liikkeelle keskirungosta, jos se on myöhässä aikataulusta, niin heti tulee viivästymisiä. -Haastateltava 3

Asiat alkavat kumuloitua helposti. Mikäli ensimmäinen kasattava osuus viivästyy, heijastuu sen vaikutukset muihin kokoonpanoihin ja lyhentää tehdastestaukseen käytettävää aikaa. Takaraja testaukselle on tuotantolinjan toimituspäivämäärä Raute Oyj:ltä loppuasiakkaalle. Tähän on määritelty sakkopykälä, jonka seurauksena toimitusajankohdasta joustetaan hyvin harvoin

Tehdastestauksessa tarkistetaan paikkalinjan mekaaniset asennukset, sähköiset kytkennät, testataan automaatio-ohjelmat sekä ajetaan varsinaista tuotantoa testimateriaalilla. Jokaiselle osa-alueelle on varattu ajankohta ja testaukset toteutetaan tietyssä järjestyksessä. Esimerkiksi automaatio-ohjelmia ei voida testata ennen mekaanisia ja sähköisiä asennuksia. Haastatteluiden mukaan aikataulupaineet kasaantuivat erityisesti automaatio-ohjelmien testaukseen.

Koekäyttöön liittyen, joskus tuntuu, että meiltä lähtevät koneet liian aikaisin maailmalle ja joudutaan varautumaan vikojen korjaukseen käyttöönotossa. -Haastateltava 4

Haastateltava 4 kiteytti aikataulupaineiden vaikutukset. Joskus tuotantolinjat joudutaan toimittamaan loppuasiakkaalle liian aikaisin, minkä seurakusena käyttöönotolle joudutaan varmaan enemmän aikaa tai käyttöönottoresurssia.

Kokonaisuutena neljännessä vaiheessa nousi tähänastisista vaiheista eniten haasteita ja erilaisia teemoja näiden ympäriltä. Moni näistä liittyi aikatauluun. Nastolan toimituspäivästä ei jousteta, eikä kaikkia testejä ehditä toteuttamaan. Muita esille nousseita teemoja olivat puutteet koekäytön laajuudessa. Linja kasataan vain osittain, jonka seurauksena esimerkiksi pinkantuontiin liittyvää skenaariotestausta ei voida toteuttaa. Kapasiteettiajot saattavat jäädä puutteelliseksi materiaalin puutteen ja linjan kokoonpanon vajavaisuuden takia. Tehdastestaus on loppuasiakkaalle ensimmäinen konkreettinen tilaisuus nähdä tuotantolinja osittain toiminnassa. Haastatteluissa selvisi, että osa loppuasiakkaista vierailee tehdastestissä ja seurauksena saattaa tulla lisätoiveita tuotantolinjan toiminnallisuuksiin, mikä kumuloituu varsinaiseen käyttöönottoon.

Mitä aikaisemmin on tiedossa mitä uunista tulee ulos, sen parempi. Ongelmat kumuloituvat käyttöönottoon asti. -Haastateltava 2

Haastatteluissa korostui testaamisen tarpeellisuus ja sen vähyydestä aiheutuvien haasteiden kumuloituminen myöhempiin vaiheisiin.

4.3.4 Asennuksen valmistuminen loppuasiakkaalla

Viidennessä vaiheessa tehdastestin jälkeen linja puretaan, pakataan ja toimitetaan loppuasiakkaalle kasausta varten. Samalla käydään sisäinen palautekeskustelu ja hoidetaan toimitukseen liittyvät dokumentit kuntoon sekä sovitaan loppuasiakkaan kanssa linjan toimituksesta tehtaalle.

Haastatteluissa nousi esille projektitiimin hajaantuminen muille projekteille. Tästä käytettiin nimitystä suvantovaihe. Suvantovaiheen aikana eri suunnittelijat korjaavat tehdastesteissä esiin nousseita virheitä siinä määrin, kuin se ilman varsinaista tuotantolinjaa on mahdollista. Muutosten testaus jää loppuasiakkaan luona suoritettavaksi. Korjausten jälkeen suunnittelijat siirtyvät toisten projektien työstämiseen. Suvantovaihe kestää tässä projektitoimituksessa noin kaksi kuukautta. Yhtenä haasteena nousi esille henkilöiden vaihtuvuus. Kun projektitiimi hajaantuu, ei välttämättä saada käyttöönottoon samoja henkilöitä, jotka suorittivat tehdastestauksen Nastolassa.

4.3.5 Käyttöönoton suorittaminen loppuasiakkaalla

Kuudes vaihe kattaa asennukseen liittyvät tapaamiset loppuasiakkaan kanssa, mekaniikka- ja sähköasennusten aloituksen sekä valmiiksi saattamisen, käyttöönottosuunnitelman, toteutuksen ja

hyväksynnän. Aikaisemmin todettiin monen asian kumuloituvan suunnittelusta ja tehdastestauksesta käyttöönottoon asti ja asia kyettiin vahvistamaan eri haastateltavien välillä.

Käyttöönoton sujuvuuteen vaikuttavat lisäksi Raute Oyj:stä riippumattomat tekijät. Haastatteluissa nousi esille yhteystyö paikallisten toimijoiden kanssa. Ei välttämättä ole tehty asioita oikeassa järjestyksessä ja aikataulussa. Tämä vaikuttaa suoraan Raute Oyj:n suorituskykyyn, kun esimerkiksi käyttöönottajat joutuvat odottamaan asennusten valmistumista. Esille nostettiin myös mekaniikkasuunnittelussa syntyneet virheet, jotka paljastuvat osittain vasta käyttöönotossa. Muita viivästyksiä varsinaiselle käyttöönotolle aiheuttavat virheelliset sähkökytkennät.

Vaikka tuotantolinja testataan osittain Nastolassa, jää käyttöönottovaiheeseen yleensä vielä korjattavaa.

Käyttöönottoon jää virheitä, ehkä jopa puolet. -Haastateltava 4

Yhtenä asiana suureen määrään virheitä nostettiin tuotantolinjan osuudet, joita ei testata Nastolan tehdastestissä. Käyttöönottajalle voi selvitä vasta asiakkaan luona lopullisten kuljettimien paikka ja toimintaperiaate tuotantolinjassa. Toisena haasteena nostettiin esille poikkeustilanteiden hallinta. Tehdastestit Nastolassa suoritetaan ilman alkupään viilupinkan tuontia ja muutenkin vajavaisella materiaalivirralla. Kun loppuasiakkaalla nostetaan linjanopeutta ja aloitetaan syöttämään materiaalia, on haasteena erilliset materiaalivirassa syntyvät poikkeustilanteet.

Esimerkiksi, jos ajetaan kahdesta pinkasta tuotetta ja toinen ei tulekaan, niin miten hallitaan poikkeustilanne? -Haastateltava 2

Haastatteluissa ilmeni eri skenaarioiden testaus turvaohjelman puolella, jotka ilmenevät vasta käyttöönotossa. Lisäksi osa poikkeustilanteista paljastuu vasta kuukausien käytön jälkeen sopivassa tilanteessa. Tämä koski sekä koneen normaalia ohjausta, että turvapuolen ohjausta.

Aikaisemmin todettiin tehdastestissä olevan aikataulupainetta ja sama teema nousi esille käyttöönottovaiheessa.

Korjaukset tehdään paikan päällä kiireessä. Silloin ohjelmistotestaus ja ulkoasu on toissijainen asia. -Haastateltava 7

Kommentilla viitataan automaatio-ohjelman testaukseen ja virheiden korjaukseen. Haastatteluissa todettiin haasteen siirtyvän myöhemmässä vaiheessa huoltoliiketoiminnan hoidettavaksi. Huoltokäyntien yhteydessä siistitään ja korjataan ohjelmakoodia käyttöönoton jäljiltä.

Yhtenä teemana nousi esille asiakastyytyväisyys, johon vaikuttaa käyttöönoton onnistuminen loppuasiakkaan luona.

Asiakkaan tyytyväisyyteen vaikuttaa eniten, miten hyvin asiakkaan odoteukset täyttyvät viimeistään käyttöönottovaiheessa. -Haastateltava 1

Aikaisemmin nostettiin esille myyntivaiheessa asiakastarpeen ymmärtämisen tärkeys. Myyntivaiheessa luodaan tarjous vastaamaan loppuasiakkaan tarpeisiin, josta syntyy odotusarvo tuotantolinjan toiminnasta. Käyttöönotossa nämä odotukset lunastetaan. Haastatteluissa selvisi loppuasiakkaan esittävän uusia vaatimuksia käyttöönoton aikana, kun tuotantolinja nähdään kokonaisuudessaan toiminnassa omassa tuotantoympäristössä. Näiden toiveiden toteuttaminen vie aikaa, mutta vaikuttaa toisaalta asiakastyytyväisyyteen positiivisesti, jos ne pystytään toteuttamaan halutulla tavalla.

Kokonaisuutena luovutusvaiheessa haasteiden määrä nousee merkittävästi edeltävän suvantovaiheen jälkeen. Asiakkaan luona käyttöönotossa on aikataulupaineita. Tuotanto tulee saada ajettua ylös sovitussa aikataulussa. Toisaalta käyttöönotossa valmistaudutaan korjaamaan niin mekaanisia kuin sähkö- ja automaatiovirheitäkin, joita on mahdollisesti jäänyt tehdastestauksen jälkeen korjattavaksi. Osa tuotantolinjasta testataan ensimmäisen kerran loppuasiakkaan luona. Lisäksi käyttöönoton aikatauluun vaikuttavat Raute Oyj:stä riippumattomat tekijät, jotka osaltaan viivästyttävät käyttöönoton etenemistä ja luovat lisää aikataulupainetta. Tärkein tehtävä on lunastaa asiakkaan odotukset ja täyttää myyntivaiheessa tehdyn sopimuksen kohdat toimitettavan tuotantolinjan osalta.

4.3.6 Loppuasiakkaan hyväksyntä ja takuu

Hyväksyntävaihe on viimeinen loppuasiakkaan luona tapahtuva toimenpide ennen projektin siirtymistä huoltoliiketoiminnalle. Hyväksynnän aikana suoritetaan SAT-testit, dokumentoidaan tulokset, otetaan varmuuskopiot linjan ohjelmista ja pidetään operaattorikoulutukset.

Haastatteluissa nousi esille kapasiteettiajojen suorittaminen eri tuotteilla. Aina ei ole mahdollista testata eri tuotevariaatioita hyväksyntäajojen yhteydessä. Syynä voi olla esimerkiksi materiaalin uupuminen.

Välttämättä kaikkia sopimustuotteita ei olla päästy ajamaan läpi (hyväksyntäajossa). -Haastateltava 7

Tämän seurauksena tuotantolinjalle saattaa jäädä joitakin poikkeustilanteita, jotka aiheuttavat linjan pysähtymisen testaamattomalla tuotteella tulevaisuudessa. Kyseiset tilanteet hoidetaan jälkikäteen huoltoliiketoiminnan toimesta, mitkä kuuluvat yleisesti takuun piiriin ja työllistävät huoltoliiketoimintaa useiden kuukausien ajan.

Toinen esille noussut teema oli operaattoreiden koulutus. Koulutus tapahtuu sekä luokkahuonekoulutuksena, että paikan päällä varsinaisella tuotantolinjalla. Haastatteluissa todettiin sen olevan ajoittain hieman haasteellista, kun se annetaan käyttöönoton yhteydessä. Osaltaan kiireessä pidetty koulutus saattaa hidastaa tuotantolinjan omistajuuden siirtymistä loppuasiakkaalle, kun tuotantolinjan operaattorit kokevat itsensä epävarmoiksi tuotantolinjaa käyttäessä. Raute Oyj:n pätevillä kouluttajilla ei ole aina halukkuutta matkustaa projektien perässä pitämään koulutuksia asiakkaille.

4.4 Haasteiden ryhmittely eri teemojen alle

Kuten luvussa 4.2 esitettiin, haastatteluiden tulokset jaettiin eri teemoihin ja haastattelumateriaalista tunnistettiin seitsemän erilaista teemaa haasteiden ryhmittelyn tuloksena. Lisäksi haastateltavien henkilöiden esiintuomat haasteet sijoitettiin projektitoimituksen eri vaiheille. Jokaiselle teemalle annettiin oma tunnistenumero (ID), joka helpottaa tiedon hyödyntämistä myöhemmässä analyysissä. Teemat ovat esitelty taulukossa 3.

Taulukko 3: Haasteiden teemat

ID	Teema
1	Asiakkaan odotukset
2	Kiire
3	Suunnittelu
4	Ulkoiset haasteet
5	Tuotetiedonhallinta
6	Testaus
7	Henkilöstö

Asiakkaan odotuksilla viitataan asiakkaalle luotuun odotusarvoon linjan toiminnasta, kapasiteetista ja lopputuotteen laadusta, jotka korreloivat asiakastyytyväisyyden kanssa. Lisäksi teemaan kuuluu, kuinka asiakas kokee Raute Oyj:n toimintatavat ja viestinnän projektitoimituksen aikana. Kiireen alle lisättiin haasteita, kuten esimerkiksi erilaiset viivästymiset, huono laatu tai liian optimistinen aikataulu. Suunnittelun alla ovat esimerkiksi suunnitteluvirheet, prosessikuvauksen ongelmat sekä tiedonkulkuun, läpinäkyvyyteen ja koulutusmateriaalin liittyvät haasteet. Ulkoisilla haasteilla viitataan Raute Oyj:stä riippumattomiin haasteisiin, kuten esimerkiksi alihankkijoiden tai loppuasiakkaan toimintaan. Tuotetiedonhallinnan haasteisiin kuuluvat erilaiset tiedon tallentamiseen, päivittämiseen ja hakemiseen liittyvät haasteet. Testauksen puutteella viitataan haasteisiin, jotka syntyvät esimerkiksi testimateriaalin puutteesta, liian lyhyestä tai suppeasta testauksesta. Viimeisenä teemana on henkilöstö, jonka haasteina ovat esimerkiksi motivaation tai osaamisen puute.

Projektitoimituksen ensimmäisessä vaiheessa korostuivat asiakkaan odotukset ja suunnittelun teemat. Sopimusvaiheen ja aloituspalaverin teemat ja haasteet ovat esitelty taulukossa 4.

Taulukko 4: Sopimusvaiheen ja aloituspalaverin teemat ja haasteet

Sopimus / Aloituspalaveri		
Teema	ID	Haaste
Asiakkaan odotukset	1	Asiakas ei osaa kertoa mitä haluaa, kun uusi tuote kyseessä
	1	Paikan laatu
	1	Asiakas pitää saada ymmärtämään miten Raute toimii
	1	Asiakastarpeiden ymmärtäminen
Suunnittelu	3	Automaatio ei ole mukana myyntivaiheessa
	3	Tuotekulun ymmärtäminen

Asiakkaan odotuksissa korostuu konkreettisen viestinnän haastavuus. Suunnittelun osalta mainittiin automaation puute myyntivaiheessa ja asiakkaan tuotekulun ymmärtäminen linjan ympärillä. Molemmat haasteet kumuloituvat myöhemmässä vaiheessa suunnitteluun ja varsinaiseen käyttöönottoon.

Projektitoimituksen kolmannessa vaiheessa korostuvat sekä suunnittelu, että tuotetiedon hallintaan liittyvät haasteet, kuten taulukosta 5 selviää.

Taulukko 5: Suunnittelun valmistumisen aikaiset teemat ja haasteet

Suunnittelun valmistuminen		
Teema	ID	Haaste
Asiakkaan odotukset	1	Asiakkaat eivät ymmärrä turvaratkaisuiden sähköteknisistä kuvista, he ymmärtävät vain minkä näkevät
Suunnittelu	3	Mekaniikkasuunnittelu vaikuttaa turvasuunnitteluun
	3	Turvasuunnitelmaan tulee muutoksia (kuljettimet erilaisia)
	3	Edellisen automaatioprojektin muokkaus nykyiseen sopivaksi
	3	Mekaniikan voisi suunnitella fiksummin automaation näkökulmasta
	3	Prosessikuvauksen käytön parantaminen
Tuotetiedon hallinta	5	Manuaalista työtä tiedon haussa
	5	Dokumentoinnin puute, hiljainen tieto jää ihmisille
	5	Tiedon päivittyminen suunnittelun edetessä ja muutosten yhteydessä

Asiakkaan odotuksiin liittyy turvatekniikan suunnittelu. Haasteltava 5 kertoi suunnitelman muuttuvan useasti suunnitteluvaiheessa, mutta toisaalta asiakas ei osaa vielä kommentoida turvasuunnitelmaa kovin tarkasti teknisten dokumenttien avulla. Myös suunnitteluteeman alla korostui turvasuunnitelma. Lisäksi mainitaan haasteena automaatio-ohjelmoinnin kopiointi vanhoista projekteista. Haastatteluissa selvisi tähän olevan kehitysprojekti, jossa määritellään projektipohjat, joita ylläpidetään keskitetysti. Toimintapa poistaa tarpeen kopioida automaatio-ohjelmat vanhoista projekteista ja käytössä on aina viimeisin versio kyseiselle projektille. Mekaniikka- ja automaatiosuunnittelun välinen yhteys tuli esille, kun mekaniikkamuutosten todettiin vaikuttavan automaatio-ohjelman toteutukseen. Tuotantolinjan prosessikuvausta käytetään sekä mekaniikka- että automaatiosuunnittelussa ja sen käyttöastetta voisi parantaa. Tuotetiedon hallinnassa todettiin olevan manuaalista työtä, joka hidastaa suunnittelua. Kaksi haasteltavaa mainitsi dokumentoinnin puutteen hieman eri muodoissa.

Tehdastestauksen yhteydessä teemoina korostuivat kiire ja testaus. Kiireestä johtuen joudutaan vähentämän testausta, koska tuotantolinja tulee toimittaa asiakkaalle sovittuna päivänä sakon uhalla. Kiire taas syntyy myöhästymisistä kokoonpanon osalta tai erilaisista komponenttien viivästyksestä. Uutena aiheena esille nousi henkilöstöön liittyvä teema. Haasteena on sitouttaa projektitiimi tehdastestaukseen. Taustalla on projektihenkilöiden vaihtuvuus projektitoimituksen aikana, jolloin projektin suunnittelija ei välttämättä ole itse tekemässä tehdastestausta. Tämän koettiin liittyvän erityisesti automaatiosuunnitteluun, jolloin tehdastestaukseen osallistuvalla automaatiosuunnittelijalla ei välttämättä ole tarvittavia projektin lähtötietoja. Taulukossa 6 on yhteenveto tehdastestauksen teemoista ja haasteista.

Taulukko 6: Tehdastestauksen teemat ja haasteet

Tehdastestaus		
Teema	ID	Haaste
Kiire	2	Koeajoon kuuluu kokoonpano. Kokoonpanon aloitus myöhästyy. Esim. osat myöhässä
	2	Koeajossa liian vähän aikaa
	2	Myöhästymiset syövät koekäyttöaikaa
	2	Viiveet linjan kasauksessa
	2	Testataan kiireellä uusia muutoksia
Suunnittelu	3	Uusien laitteita saatetaan joutua muokkaamaan
	3	Automaation läpinäkyvyys. Vaikuttaa siltä, että tehdastestiin tullaan keskeneräisillä ohjelmilla
Testaus	6	Ei testata turvaohjelmaa, vain noin 5–10 % laitteista testataan tehdastestissä
	6	Koneet lähtevät liian keskeneräisinä maailmalle
	6	Kyseisen projektin ohjelmakoodia ei ole vielä testattu muissa projekteissa
	6	Pinkan syöttö ja purku puuttuvat koeajosta
	6	Pinkka puuttuu materiaalivirrasta. Manuaalista työtä syntyy, kun siirretään viiluja
	6	Alku- ja loppupää eivät ole mukana koekäytössä
	6	Uusia laitteita ei testata ennen koekäyttöä
Henkilöstö	7	Projektissa työskenteleviä henkilöitä ei sitouteta Nastolan koekäyttöön

Taulukossa 7 on esitetty viidennen vaiheen teemat ja haasteet. Haasteluissa vaihetta kuvattiin suvantovaiheeksi, jolloin projektille ei juuri tapahdu suunnittelijoiden toimesta mitään, mikä näkyy selkeästi haasteiden teemassa ja lukumäärässä.

Taulukko 7: Asennuksen valmistumisen vaiheen teemat ja haasteet

Asennuksen valmistuminen		
Teema	ID	Haaste
Ulkoiset tekijät	4	Kytkentävirheet
	4	Toimituksesta puuttuu jotain, unohdettu esimerkiksi pakata osa tuotteista
	4	Alihankkijoiden osaaminen

Kuudennessa vaiheessa on haastateltavien mukaan eniten haasteita. Taulukossa 8 on esitetty yhteenveto projektitoimituksen käyttöönottovaiheesta.

Taulukko 8: Käyttöönottovaiheen teemat ja haasteet

Käyttöönotto		
Teema	ID	Haaste
Asiakkaan odotukset	1	Asiakkaan silmien edessä korjaaminen aiheuttaa mainehaittaa
	1	Ymmärretty väärin asiakkaan odotuksia
	1	Laatuvaatimukset lopputuotteelle
	1	Asiakkaan uudet vaatimukset käyttöönotossa
	1	Asiakkaan odotusten täyttyminen
Kiire	2	Ohjelman korjaukset tehdään kiireessä ja ovat huonolaatuisia
	2	Turvapuutosten korjaaminen ja testaaminen hidasta
	2	Käyttöönotot liian pitkiä
	2	Toiset projektit, resurssipula
Suunnittelu	3	Koulutusmateriaali ei ole systemaattista
	3	Mekaanisia suunnitteluvirheitä
	3	Koulutuksen pitäminen, ei ole selkeää tapaa
	3	Turvan muutokset, esimerkiksi turva-aidan lisääminen
	3	Suunnitteluvirheet kumuloituvat käyttöönottoon
Ulkoiset tekijät	4	Käyttöönottajat menevät liian aikaisin paikalle ja joutuvat odottamaan, että muut asiat valmistuvat
Testaus	6	Poikkeustilanteiden testaus on vajavaista turvapuolella
	6	Turvaohjelmasta löytyy puutteita testauksessa
	6	Tuotteen laatuhaasteet, ei toimi linjassa oikein, esim. imukupit eivät saa kiinni
	6	Pinkan purussa tai syötössä uusia kuljettimia, joista ei ollut tietoa
	6	Käyttöönottoon jää puolet ohjelmistovirheistä
	6	Käyttöönotossa saadaan suurin osa virheistä kiinni ohjelmakoodista
	6	Poikkeustilanteiden hallinta
	6	Ohjelmaa ei voida kirjoittaa valmiiksi ennen käyttöönottoa
Henkilöstö	7	Ihmisten matkustushalukkuus laskee
	7	Käyttöönottajien kokemuksen puute

Projektitoimituksen käyttöönotossa esiintyvät kaikki teemat paitsi tuotetiedon hallinta ja suurin osa haasteista kumuloituu varsinaiseen käyttöönottoon. Asiakkaan odotukset korostuivat

myyntivaiheessa ja uudelleen käyttöönoton vaiheessa. Suunnitteluteemassa korostui uutena asiana koulutuksen pitäminen, joka tapahtuu käyttöönoton yhteydessä. Muuten haasteet ovat vastaavia kuin tehdastestauksessa, mutta ovat kumuloituneet varsinaiseen käyttöönottoon. Eniten teemoista korostui testaus. Moni haasteista esiintyi tehdastestauksesta, jossa ei kuitenkaan ehditty testata riittävästi ja samat haasteet esiintyivät varsinaisessa käyttöönotossa. Viimeisenä teemana korostuu henkilöstö ja siinä haasteina olivat kokemuksen puute ja matkustushalukkuus. Mikäli käyttöönotot pitkittyvät ja ovat kuormittavia, vähentää se työntekijöiden matkustushalukkuutta käyttöönottoon. Resurssipulan takia käyttöönottoon lähetetään joskus työntekijöitä vähällä kokemuksella.

Projektitoimituksen käyttöönoton jälkeen seuraa hyväksyntävaihe. Mikäli käyttöönotossa on ollut paljon haasteita, viivästyttävät ne hyväksyntäajoa. Taulukossa 9 on loppuasiakkaan hyväksyntävaiheen teemat ja haasteet.

Taulukko 9: Loppuasiakkaan hyväksyntävaiheen teemat ja haasteet

Loppuasiakkaan hyväksyntä		
Teema	ID	Haaste
Asiakkaan odotukset	1	Asiakkaan viilun heikko laatu
	1	Paikan laatu
Testaus	6	Kaikkia tuotteita ei päästä ajamaan tuotantolinjalla

Teemoina esiintyivät asiakkaan odotukset ja testaus. Hyväksyntävaiheessa täytetään asiakkaan vaatimukset, jotka ovat määritelty sopimusvaiheessa. Teemana testaus seuraa käyttöönotosta, mikäli testausta ei ole pystytty suorittamaan riittävän laajasti kaikilla eri tuotteilla.

Viimeisessä vaiheessa projektitoimitus siirtyy Raute Oyj:n huoltoliiketoiminnan ylläpidettäväksi. Takuuvaiheessa tuotetiedon hallinta esiintyi teemana uudestaan, jolla viitataan dokumentaation puutteeseen sekä tarkistuspohjaan, jota voitaisiin hyödyntää takuun yhteydessä. Kokonaisuudessaan teemat ja haasteet ovat esitetty taulukossa 10.

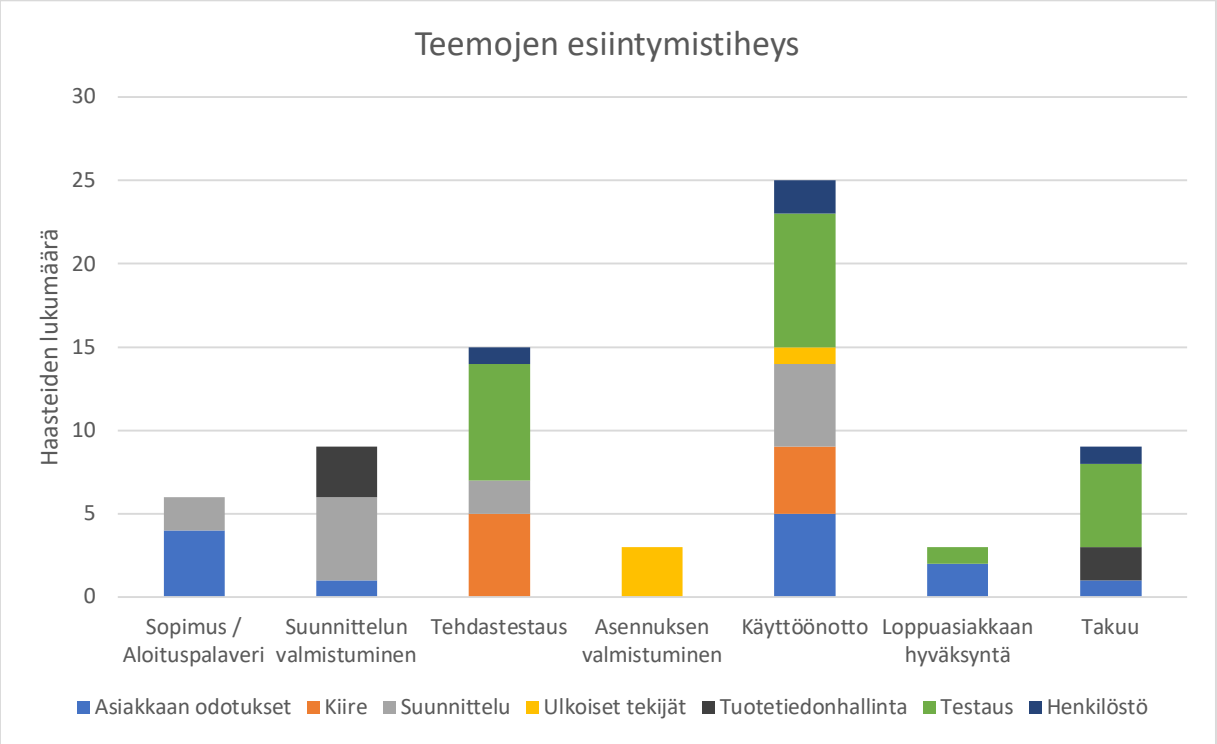
Taulukko 10: Takuuvaiheen teemat ja haasteet

Takuu		
Teema	ID	Haaste
Asiakkaan odotukset	1	Asiakas haluaa lisää kapasiteettia
Tuotetiedon hallinta	5	Dokumentaation puute vikatilanteista
	5	Paikkalinjalle ei ole valmista tarkistuspohjaa (referenssimittaukset)
Testaus	6	Ohjelmien testaus haastavaa
	6	Ohjelmointivirheet kuormittavat useita kuukausia käyttöönoton jälkeen
	6	Ohjelmavirheitä jää käyttöönotosta
	6	Turvaratkaisuun jää usein korjattavaa
	6	Käyttöönoton jälkeen huomattu puutteita tuotantoa ajettaessa
Henkilöstö	7	2–5 vuotta kestää koulutus huoltoliiketoimintaan

Vaiheessa korostuu selkeästi testaus, joka kumuloituu käyttöönotosta. Käyttöönotossa todettiin korjauksia suoritettavan kiireessä, mikä osaltaan selittää teeman esiintymistä takuuvaiheessa uudestaan. Tuotantolinjan takuun aikana teemoina esiintyvät lisäksi asiakkaan odotukset ja henkilöstöön liittyvät haasteet.

4.5 Teemojen ja haasteiden esiintymistiheys projektitoimituksessa

Haasteiden teemoittelun jälkeen luotiin kaavio 1, josta selviää teemoihin kuuluvien haasteiden lukumäärä projektitoimituksen edetessä. Kaavio auttaa ymmärtämään kuinka teemat muuttuvat eri vaiheissa ja antaa selkeän kokonaiskuvan projektitoimituksen haasteista sekä eri vaiheiden kuormittavuudesta.



Kaavio 1: Teemojen esiintymistiheys projektitoimituksessa

Projektitoimitusta kokonaisuutena tutkittaessa voidaan todeta teemojen esiintymistiheyden nousevan sopimuksesta tehdastestaukseen tasaisesti. Alussa haasteet liittyvät eniten asiakkaan odotuksiin ja vaihtuvat sitten suunnittelun, kiireen ja testauksen puutteen teemoihin lähestyttäessä tehdastausta. Kaaviosta nähdään projektin suvantovaihe, kun tuotantolinja toimitetaan asiakkaalle. Kaikkein eniten eri teemat korostuvat käyttöönottovaiheessa, jossa suoritetaan käyttöönotto tuotantolinjalle. Teemoina esiintyvät tasaisesti testaus, suunnittelu, kiire ja asiakkaan odotukset. Varsinaisessa hyväksynnässä korostuvat asiakkaan odotukset, jotka tulee täyttää tuotantolinjan hyväksyntäajoilla. Takuuvaiheessa korostuu jälleen testaus.

4.6 Haasteiden ratkaisu virtuaalisella käyttöönotolla

Toisena alatutkimuskysymyksenä on: Voidaanko haasteet ratkaista virtuaalisen käyttöönoton avulla ja miten mitata syntyvä hyöty? Teemahaastattelun pohjalta määriteltiin tavoitteet virtuaaliselle käyttöönotolle, joihin perustuen valittiin sopiva tekninen ratkaisu.

Tavoitteiden muodostaminen aloitettiin suunnitteluun liittyvästä teemasta ja sen haasteista. Haastatteluissa mainittiin mekaniikkasuunnittelun vaikuttavan niin automaation kuin turvan suunnitteluun ja toisaalta mekaniikkasuunnittelun voi joissain tapauksissa toteuttaa järkevämmin automaation näkökulmasta. Toisaalta automaatiolle toivottiin parempaa läpinäkyvyyttä ja valmiusastetta ennen koekäyttöä Nastolassa. Näihin löydöksiin perustuen tuotantolinjan virtuaalisen käyttöönoton tulee sisältää mekaniikka-, sähkö-, turva- ja automaatiosuunnittelun osa-alueet sekä yhdistää ne testattavaksi kokonaisuudeksi.

Yksi virtuaalisen käyttöönoton arvolupauksista on testauksen parantaminen, kuten luvussa 2.2.3 esitetään. Testaus -teema esiintyi eniten tehdastestauksessa ja luovutusvaiheessa. Tuotantolinjan virtuaalisen käyttöönoton avulla pitää pystyä testaamaan turvatekniikka, tuotantolinjan alku- ja loppupään laitteet, erilaiset poikkeustilanteet, ohjelmakoodi sekä poikkeustilanteet tuotannossa. Erityistä huomiota tulee kiinnittää uusien laitteiden testaukseen, kuten esimerkiksi aluslevyn purkulaite, joita ei ole aikaisemmin valmistettu. Näiden tavoitteiden saavuttamisella vähennetään tehdastestauksessa ja luovutuksessa esiintyvien haasteiden lukumäärää testauksen puutteen osalta.

Yhtenä teemana haastatteluissa nousi esille kiire, joka esiintyi tehdastestauksessa ja luovutusvaiheessa. Kiire syntyi tyypillisesti osien tai kokoonpanon viivästymisestä ennen tehdastestausta, jonka seurauksena testaukseen käytettävä aika lyheni. Testauksen vähyys aiheutti edelleen kiirettä luovutusvaiheessa. Kiirettä pyritään vähentämään näistä kahdesta vaiheesta lisäämällä testausta virtuaalisen käyttöönoton avulla projektitoimituksen aikaisemmassa vaiheessa rinnakkain valmistuksen kanssa sekä tuotantolinjan toimituksen aikana. Virtuaalisen käyttöönoton ympäristön tulee olla käytettävissä hyvissä ajoin ennen tehdastestausta, jolloin osa mahdollisista suunnitteluvirheistä pystytään korjaamaan etukäteen, kuten on esitetty luvussa 2.2.5.

Asiakasvaatimusten osalta yhdeksi tavoitteeksi nostettiin konkreettisempi asiakasviestintä. Luvussa 3.2.4 kerrottiin asiakkaan toivomuslistasta, joka tarkentuu projektin edetessä asiakkaan nähdessä projektin edistyvän. Tästä johtuen virtuaalisen käyttöönoton ympäristön tulee olla visuaalinen, jonka avulla näytetään tuotantolinjan toiminta ja ratkaisut loppuasiakkaalle aikaisemmassa vaiheessa. Tavoitteena on saada loppuasiakas esittämään omia näkemyksiään ja vaatimuksiaan tuotantolinjalle projektitoimituksen alkuvaiheessa. Mitä aikaisemmin saadaan selville loppuasiakkaan vaatimukset ja niihin voidaan reagoida, sitä tyytyväisempi asiakas on projektitoimituksen loppuvaiheessa**.** Lisäksi luvussa 3.2.4 mainittiin projektin päättyvän, kun asiakkaan laadulliset

tavoitteet saavutetaan. Virtuaalisen käyttöönoton yhtenä tavoitteena on parantaa ohjelmakoodin laatua, jonka avulla vastataan asiakkaan vaatimuksiin pysymällä käyttöönotossa aikataulussa ohjelmakoodin toimivuuden osalta.

Henkilöstön osalta mainittiin matkustushalukkuuden laskevan ajan myötä. Tavoitteena on tehostaa käyttöönottoa, jolloin loppuasiakkaan luona pysytään aikataulussa ja työntekijät eivät kuormitu pidentyneestä käyttöönotosta. Loppuasiakkaan luokse matkustavat käyttöönottajat voivat harjoitella tuotantolinjan toimintaa toimistolla digitaalisen mallin avulla ennen matkustamista käyttöönottoon. Teemoista tuotetiedon hallinta ja ulkoiset tekijät rajattiin digitaalisen kaksosen tavoitteiden ulkopuolelle.

4.6.1 Virtuaalisen käyttöönoton mittaaminen projektitoimituksessa

Virtuaaliselle käyttöönotolle määriteltiin mittarit, joiden tarkoituksena on antaa tietoa virtuaalisen käyttöönoton vaikutuksesta projektitoimitukseen. Tiedon avulla on helpompi tehdä päätöksiä virtuaalisen käyttöönoton hyödyntämisestä muissa projekteissa, tuotekehityksessä tai huoltoliiketoiminnassa. Reinhart et al. (2007) mukaan virtuaalisen käyttöönoton projektille tulee valita tavoite ajan, kustannusten ja laadun väliltä. Haastatteluiden perusteella suurimmat haasteet liittyvät aikaan ja laatuun. Haasteet painottuvat tehdastestaukseen ja projektin luovutukseen loppuasiakkaalle, joten on luontevaa valita nämä kaksi vaihetta mitattavaksi kohteeksi, joka hieman poikkeaa Reinhart et al. (2007) näkemyksestä. Tehdastestin osalta mittariksi valittiin koekäyttötunnit, jotka sisältävät suunnittelutunnit, tuotantolinjan kokoonpanon Nastolassa ja koekäyttöön kuluvan ajan. Luovutuksen osalta mittariksi valittiin automaation käyttöönottotunnit. Mittareilla seurataan budjetin toteutumista ajan suhteen. Virtuaalisen käyttöönoton toteutukselle valittiin lisäksi laadullinen mittari. Laadun osalta päädyttiin dokumentoimaan virtuaalisen käyttöönoton avulla tehdyt löydökset ja korjaukset tuotantolinjan toiminnassa. Näiden mittareiden avulla arvioidaan tehostaako virtuaalinen käyttöönotto suunnittelua ja käyttöönottoa projektitoimituksessa.

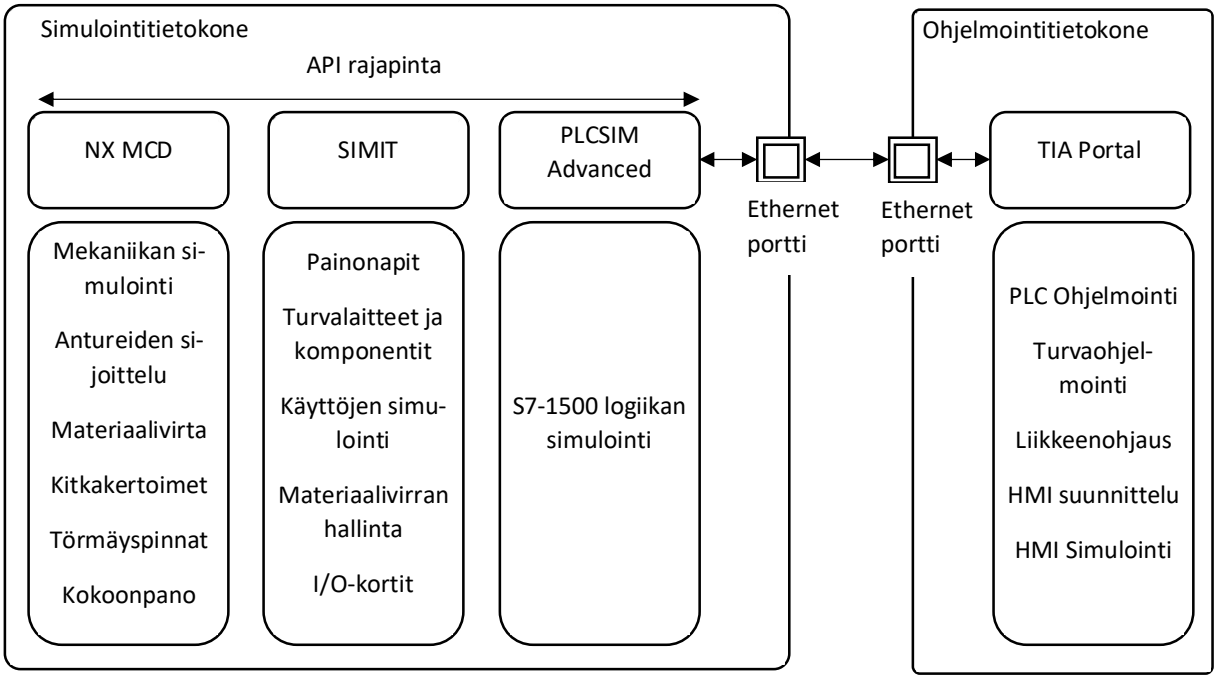
5 Virtuaalisen käyttöönoton tekninen toteutus

Luvussa esitellään virtuaalisen käyttöönoton tekninen toteutus pääpiirteittäin Raute Oyj:n nelitasoiselle paikkalinjalle. Mallia rakentaessa huomioitiin tavoitteet ja mahdolliset tekniset rajoitukset toteutukselle. Toteutus suunniteltiin sopimaan osaksi Raute Oyj:n suunnitteluprosessia ja virtuaalisen käyttöönoton ympäristö valmistui automaatiosuunnittelun loppuvaiheessa. Virtuaalinen käyttöönotto suoritettiin rinnakkain valmistuksen kanssa. Teknisen toteutuksen osalta ei käydä yksityiskohtaisesti mallintamisen vaiheita läpi, vaan keskitytään laajan kokonaisuuden mallintamiseen sekä hyviin käytäntöihin simulointimallin optimoinnissa.

5.1 Virtuaaliseen käyttöönoton ohjelmistot ja ympäristön toteutus

Raute Oyj:n nelitasoisen paikkalinjan virtuaalisen käyttöönoton yhdeksi tavoitteeksi määriteltiin mekaniikka-, sähkö- turva,- ja automaatiosuunnittelun yhdistäminen. Tavoitteena on tarkastella riittävän yksityiskohtaisesti mekaniikan toimintaa, antureiden sijoittelua ja tuotteiden liikkeitä tuotantolinjalla esimerkiksi aluslevynpoistolaitteen osalta. Tuotantolinjan ohjaukset tulee tapahtua tuotannossa käytettävän automaatio-ohjelman mukaan. Lisäksi tavoitteisiin määriteltiin turvalaitteet, kuten valoverhot, turvalukot ja hätäseis-painikkeet, sekä itse turvaohjelman testaus virtuaalisessa käyttöönotossa. Tavoitteiden lähtökohtana on tehostaa suunnittelua ja vähentää erityisesti tehdastestauksen ja käyttöönoton haasteita.

Virtuaalisen käyttöönoton ympäristön valinnassa päädyttiin tuotantolaitteen simulointitasoon. (katso taulukko 2), joka vastaa suurimpaan osaan tavoitteista. Nelitasoisella paikkalinjalla ei ole käytössä robotteja, eikä tavoitteena ole tuotannon sykliaikojen tutkiminen. Näistä syistä tuotantolinjan simulointitaso (katso taulukko 2) hylättiin ympäristöä valittaessa, vaikka nimi viittasi sen sopivuuteen virtuaalisen käyttöönoton ympäristönä. Tuotantolaitteen simulointitasoon yhdistettiin toimilaitteiden ja automaation simulointi, jolloin simuloidaan kokonaisratkaisu mekaniikka-, sähkö-, turva- ja automaatiosuunnittelun osalta. Virtuaalisen käyttöönoton ympäristö ja siinä käytettävät työkalut ovat esitetty kuvassa 9.

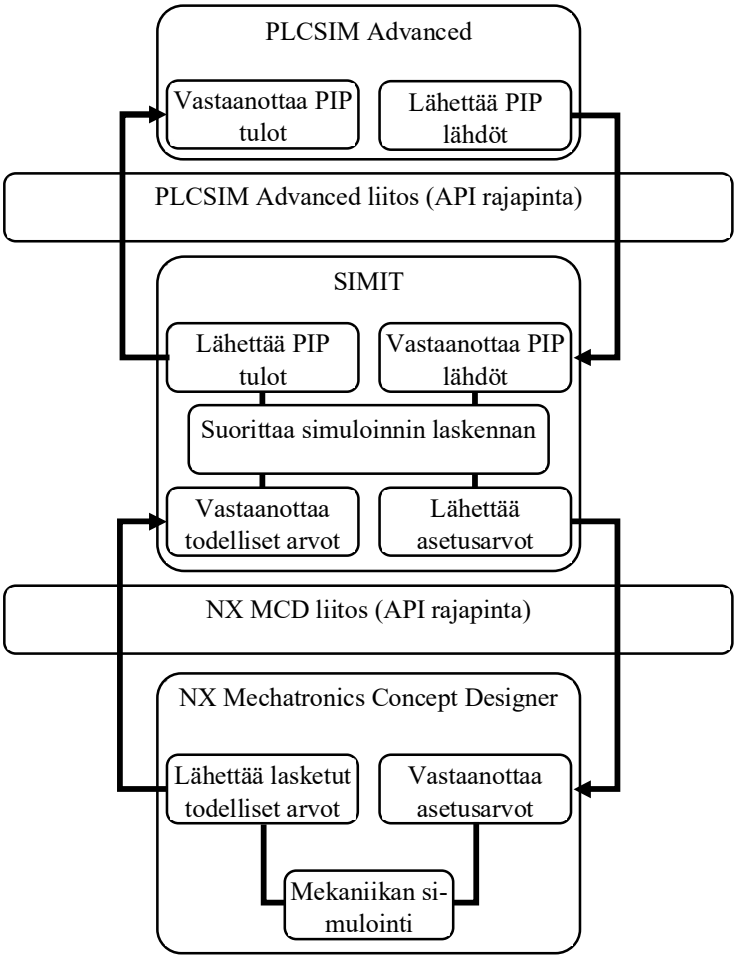


Kuva 9: Virtuaalisen käyttöönoton ympäristö ja käytetyt työkalut

Käytettävät työkalut jaettiin kahden tietokoneen välille: simulointi ja ohjelmointi. Simulointitietokoneessa käytetään tuotantolinjan simulointiin tarvittavia työkaluja ja ohjelmointitietokoneella suoritetaan tuotantolinjan PLC-koodin ohjelmointi ja käyttöliittymän suunnittelu. Ympäristön avulla optimoidaan simulointitietokoneen laskentateho simulointia varten. Automaatio-ohjelman suunnittelijat testaavat ohjelmakoodin, turvaohjelman ja käyttöliittymän toiminnan omalta tietokoneelta. Yhteys ohjelmointikoneesta otetaan verkkoportin kautta simulointikoneeseen, jossa S7-1500-logiikka simuloidaan PLCSIM Advanced-työkalussa. Ohjelmointikoneelta ladataan käyttäjän tekemät ohjelmat simuloidulle logiikalle, jossa ohjelmakoodi suoritetaan kuten oikeassa logiikassa. Liittämällä simulointitietokone yrityksen verkkoon, on ympäristön käyttö mahdollista etäyhteyksien kautta.

Simulointitietokoneen sisällä työkalut keskustelevat valmiiden API-rajapintojen kautta. PLCSIM Advanced simuloi S7-1500-logiikan toiminnallisuudet, kuten kommunikointi, turva ja liikkeenohjaus. API-rajapinnan kautta vaihdetaan logiikan I/O-tiedot SIMIT-työkalun kanssa. SIMIT-työkalulla luetaan logiikan I/O-tilatiedot ja simuloidaan automaatiojärjestelmän profinet-kommunikointi, I/O-kortit, turvapuolen I/O-kortit, käyttötekniikka, toimilaitteet ja prosessi. SIMIT-työkalu

kirjoittaa API-rajapinnan kautta asetusarvot NX MCD-työkaluun, jotka ohjaavat mekaniikan simulointia. Simuloinnin jälkeen työkalu kirjoittaa todelliset arvot takaisin SIMIT-työkalulle ja sieltä takasin PLCSIM Advanced-työkalulle. Kuvassa 10 on esitelty simulointityökalujen välinen tiedonvaihto yksityiskohtaisesti.



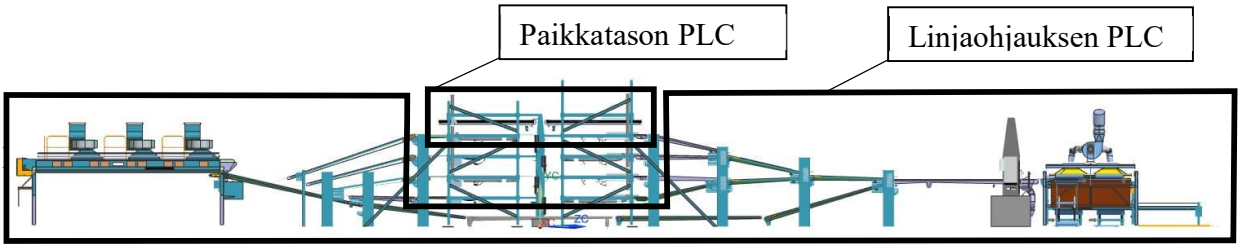
Kuva 10: Tiedonsiirto PLCSIM Advanced, SIMIT ja NX MCD -työkalujen välillä, mukailtu (Siemens 2020a)

SIMIT synkronoi työkalujen välisen kommunikoinnin ja laskenta suoritetaan kuvan 10 mukaisessa järjestyksessä. Laskennan sykliaika määräytyy PLC:n profinet-väylän kiertoajan mukaan. Etuna synkronisella kommunikoinnilla on simulointimallin toistettavuus, mikä varmistaa asioiden tapahtuvan oikeassa järjestyksessä. Synkronointia käytettäessä simulointiaika voi vaihdella reaaliaikaan verrattuna, mutta se ei vaikuta simuloinnin tuloksiin.

5.2 Virtuaalisen käyttöönoton laajuus ja suunnitteluprosessi

Mallin rakentaminen virtuaalista käyttöönottoa varten aloitettiin tutustumalla Raute Oyj:n nelitasoisen paikkalinjan teknisiin ratkaisuihin ja niiden toteuttamiseen virtuaalisen käyttöönoton ympäristössä. Nelitasoinen paikkalinja koostuu yhdestä linjaohjauksen PLC:stä sekä neljästä paikkatason PLC:stä. Linjaohjauksen PLC hoitaa niemensä mukaisesti linjanohjauksen ja kommunikoi paikkatasojen PLC-ohjausten kanssa. Linjaohjauksen PLC:llä on oma HMI, josta ohjataan tuotantolinjaa. Paikkatason PLC hoitaa xyz-manipulaattoreiden ohjaukset, viilun tasaamisen, paikkauksen ja poisviennin.

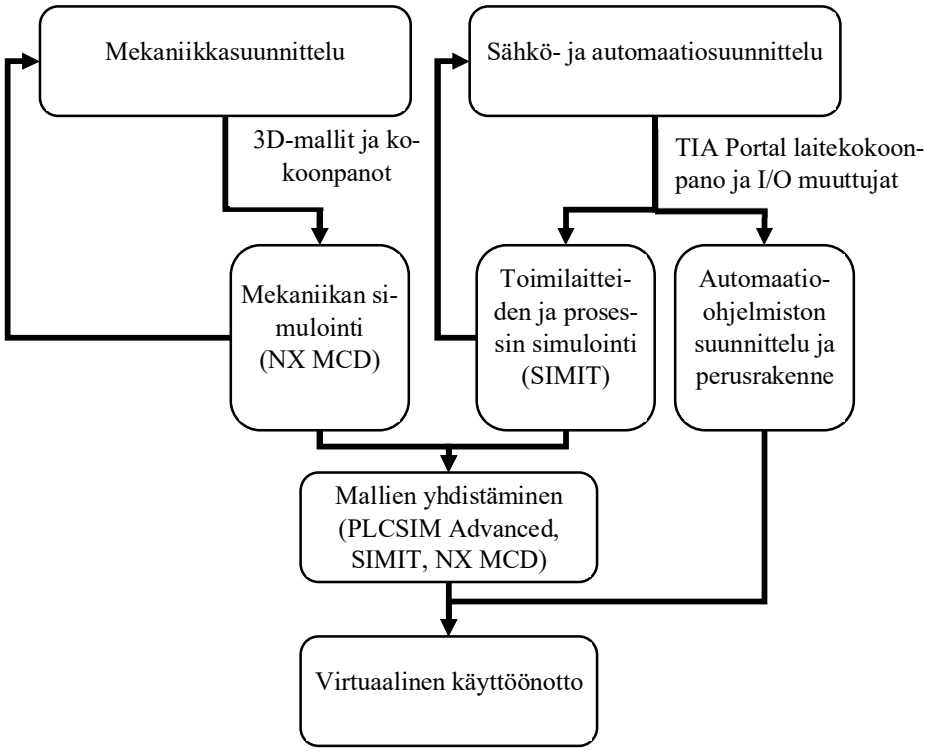
Tuotantolinja on kokonaisuudessaan huomattavan iso ja sitä päätettiin rajata virtuaalisen käyttöönoton osalta. Rajauksessa mukailtiin luvussa 2.2.4 esitettyä Reinhart et al. (2007) mallia. Viilunpaikkauslinja päätettiin rajata linjaohjauksen PLC:hen sekä yhteen paikkaustasoon. Rajauksen syynä on työmäärän suhde hyötyyn. Jokainen paikkataso on kopio suhteessa toisiinsa ja ne ovat pisimmälle standardoitu mekaniikan, sähkön ja automaation osalta, joten simuloinnin lisäarvo ei ole kovin merkittävä. Sen sijaan linjaohjauksen PLC-ohjelmaan joudutaan tekemään enemmän muutoksia. Projektissa kuljettimien lukumäärä on muuttunut, aluslevynpoistoon on tehty muutoksia ja pinkkojen tuonti on suunniteltu sopimaan asiakkaan tehtaan tarpeisiin. Kuvassa 11 on esitetty simuloitava kokonaisuus ja PLC-ohjaukset.



Kuva 11: Linja- ja paikkatason PLC-ohjaukset sekä virtuaalisen käyttöönoton laajuus

Rajauksen avulla saadaan suljettu materiaalikierto virtuaaliseen käyttöönottoon ja testattua kokonaisuuden kannalta merkittävimmät toiminnallisuudet. Simuloitava kokonaisuus virtuaalista käyttöönottoa varten pitää sisällään kaksi PLC:tä, 1200 I/O pistettä, yhteensä 40 kappaletta servovahvistimia ja taajuusmuuttajakäyttöjä sekä käyttöliittymän linjaohjaukselle. Lisäksi mallinettaan turvapuolen painonapit, lukot ja valoverhot.

Luvussa 2.2.5 painotettiin lähtötietojen tärkeyttä virtuaalisen käyttöönoton ympäristön suunnittelussa ja käytiin läpi virtuaalisen käyttöönoton yhdistäminen osaksi suunnitteluprosessia. Osana toteutusta huomioitiin Raute Oyj:n suunnitteluprosessi ja kuinka siihen liitetään virtuaalinen käyttöönotto osaksi suunnittelua. Virtuaalisen käyttöönoton ympäristön toteutus tarvitsee lähtötietiedot mekaniikka-, sähkö-, ja automaatiosuunnittelusta. Kuvassa 12 on esitetty valitun virtuaalisen käyttöönottoympäristön yleinen suunnitteluprosessi.



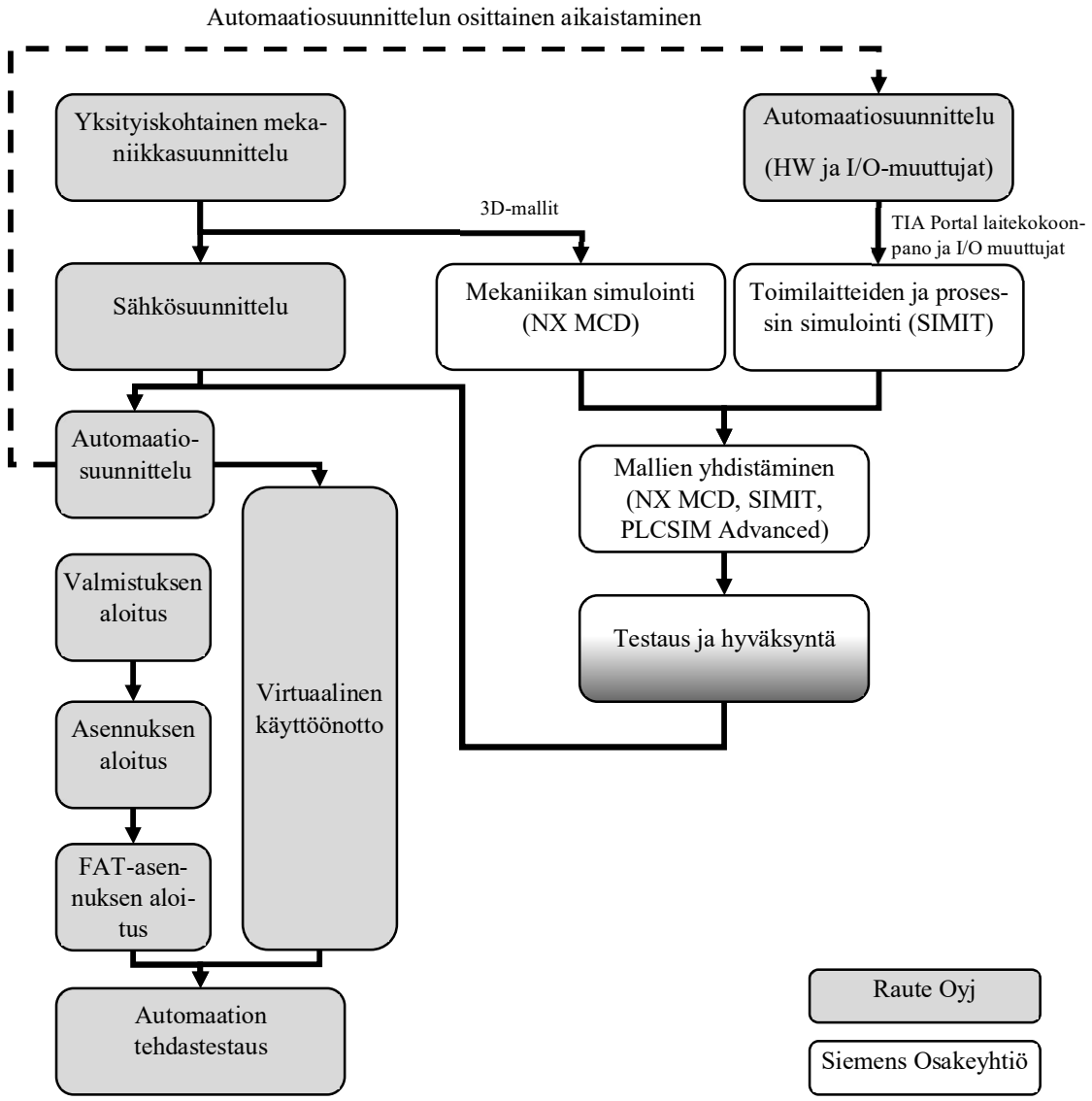
Kuva 12: Virtuaalisen käyttöönotto ympäristön suunnitteluprosessi

Mekaniikkasuunnittelusta lähtötiedoiksi tarvitaan koneen tai tuotantolinjan 3D-kuvat. Kuvissa tulee olla mallinnettu mekaniikka, liikuteltava materiaali ja sensoreiden paikat. NX MCD tukee useamman eri suunnittelutyökalun tiedostomuotoja sekä suunnittelutyökalujen välisessä tiedonsiirrossa käytettäviä 3D-tiedostomuotoja, joista suorituskyvyn kannalta paras tiedostomuoto on JT-formaatti. 3D-mallien lisäämisen jälkeen aloitetaan mekaniikan simulointi. Työkalulla määritellään mekaniikan kinematiikka, sensoreiden toiminta, törmäyspinnat, kitkakertoimet ja liikuteltavat materiaalit. Simulointi testataan työkalun omalla sekvenssieditorilla ja mahdolliset mekaniikkasuunnittelun muutostarpeet pystytään korjaamaan suunnitteluvaiheessa.

Sähkö- ja automaatiosuunnittelusta lähtötiedoiksi tarvitaan TIA Portal -projekti, johon on määritelty I/O-kortit, turvapuolen I/O-kortit, I/O-muuttujat, kytkimet, profinet-väylä, liikkeenohjaus, logiikka ja HMI. PLC-ohjelmaa ei tarvita lähtötiedossa. TIA Portal -projektin lähtötiedot luetaan automaattisesti SIMIT-työkaluun, jonka jälkeen aloitetaan toimilaitteiden ja prosessin simulointi. SIMIT-ympäristöllä testataan I/O-rajapinta automaatioympäristöön sekä automaatiokomponenttien parametrit SIMIT-mallin valmistuttua. Testauksella todetaan automaatio-ohjelman toimilaitteiden toteutuksen oikeellisuus ja pystytään tekemään tarvittavat muutokset sähkö- ja automaatiosuunnitteluun suunnitteluvaiheessa.

Mallien yhdistämisvaiheessa liitetään mekaniikan simulointi toimilaitteiden ja prosessin simuloinnin kanssa, jolloin saadaan käyttöön virtuaalisen käyttöönoton ympäristö. Yhdistämisen jälkeen automaatiosuunnittelija hyödyntää virtuaalisen käyttöönoton ympäristöä automaatio-ohjelmiston testauksessa. Samalla nähdään mekaniikan, turvan ja automaation toiminta yhdessä. Tulokset analysoidaan ja tehdään tarvittavat muutokset mekaniikka-, sähkö-, turva- ja automaatiosuunnitteluun.

Raute Oyj:n projektitoimituksessa virtuaalisen käyttöönoton liittäminen osaksi suunnittelua toteutettiin mukaillen luvussa 2.2.5 esitettyä Ko et al. (2013) mallia rinnakkaisesta suunnittelusta huomioiden työkalujen vaatimat lähtötiedot sekä virtuaalisen käyttöönoton ympäristön toteutuksen palveluna Siemens Osakeyhtiön toimesta. Lisäksi hyödynnettiin Vermaark et al. (2017) ja Oppelt et al. (2014) näkemyksiä SIL-ratkaisusta ja virtuaalisen käyttöönoton yhdistämisestä osaksi suunnittelua. Raute Oyj:n suunnittelussa ensimmäinen vaihe on mekaniikan yksityiskohtainen suunnittelu, jota seuraa hieman limittäin sähkö- ja automaatiosuunnittelu. Raute Oyj:n suunnitteluprosessin osalta automaatiosuunnittelua tuli aikaistaa osittain alkamaan mekaniikkasuunnittelun kanssa yhtä aikaa, jotta virtuaalisen käyttöönoton ympäristö saatiin valmistumaan ajoissa projektitoimitukseen kuten kuvassa 13 on esitetty.



Kuva 13: Virtuaalisen käyttöönoton ympäristön toteutus palveluna osana Raute Oyj:n suunnitteluprosessia

Lähtötietojen lisäämisen jälkeen mekaniikan ja toimilaitteiden sekä prosessin simulointi toteutettiin rinnakkain kahden suunnittelijan toimesta. Ensimmäinen suunnittelija vastasi mekaniikan simuloinnista ja toinen toimilaitteiden ja prosessin simuloinnista. Mallien yhdistämisestä ja ympäristön testauksesta vastasi toimilaitteiden ja prosessin simuloinnin toteuttaja. Testauksen ja hyväksynnän jälkeen ympäristö siirrettiin Raute Oyj:n suunnittelijoiden käyttöön osaksi projektitoimitusta. Virtuaalinen käyttöönotto toteutettiin osana automaatiosuunnitteluja ja rinnakkain valmistuksen sekä tuotantolinjan kokoonpanon kanssa.

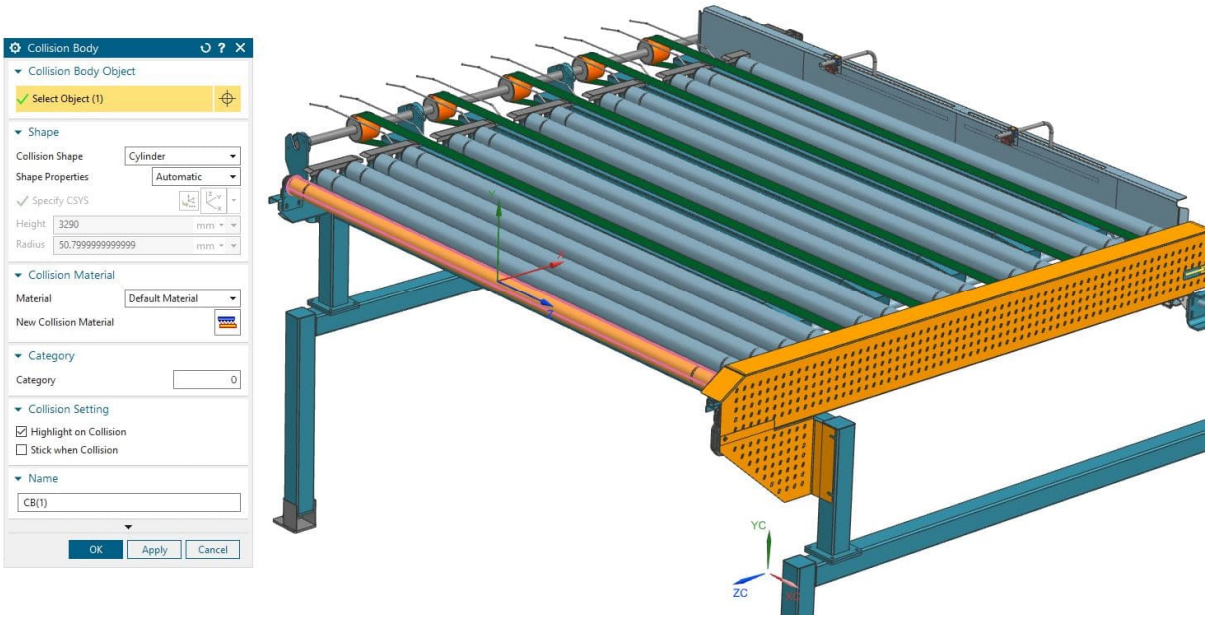
5.2.1 Mekaniikan simuloinnin laajuus ja optimointi

Raute Oyj:n mekaniikkasuunnittelijat käyttävät Creo-suunnitteluohjelmistoa. Creo-tiedoston avaaminen NX MCD-työkalulla vaatii erillisen lisenssin, johon ei investoitu tässä tutkimuksessa. Sen sijaan käytettiin yleistä STEP214-tiedostomuotoa, joka on suunniteltu tiedonsiirtoon eri työkalujen välillä. Haittapuolena STEP214-tiedostossa on manuaalisen työn määrä. Mikäli 3D-suunnittelussa tehdään jälkeenpäin muutoksia, pitää muutokset tallentaa erilliseen STEP214-tiedostoon. NX MCD-työkalussa uudet 3D-mallit tulee päivittää manuaalisesti sekä siirtää mekaniikan simulointi päivitettyyn 3D-malliin. Tässä tutkimuksessa tavoitteena on ymmärtää virtuaalisen käyttöönoton tuomat hyödyt, joten manuaalinen työ hyväksyttiin tässä vaiheessa.

Tuotantolinjan pääkokoonpano piti sisällään noin 30 000 erilaista osaa 3D-mallissa. Ennen STEP214-tallennusta Creo-työkalulla poistettiin kaikki pienet osat, kuten pultit ja mutterit. Näin toimimalla saatiin kevennettyä tiedostojen siirtoa työkalujen välillä. Tavoitteena oli tuoda kokoonpano mahdollisimman täydellisenä NX MCD-työkaluun, jossa voidaan karsia simuloinnin kannalta epärelevantit osuudet pois, esimerkiksi tuotantolinjan perustukset. Etuna on se, että jatkossa on mahdollista laajentaa 3D-mallia NX MCD-työkalussa tarpeen mukaan. NX MCD-ympäristössä käytettiin Advanced assembly-työkalua, jolla kevennetään suurien kokoonpanojen käsittelyä ja latausaikoja. Lisäksi käytettiin Suppression-ominaisuutta, jonka avulla ladataan vain virtuaalisen käyttöönoton kannalta oleelliset kokoonpanot. Simuloinnin rakentaminen muuttui nopeammaksi, kun osien lukumäärä väheni noin 1100 kappaleeseen. Fysiikan laskenta suoritetaan niille osuuksille, jotka työkalulla valitaan osaksi simulointia. Tämä tarkoittaa kappaleelle massan antamista *rigid body*, törmäyspinnan määrittelyä *collision body* tai törmäysanturin määrittelyä *collision sensor*.

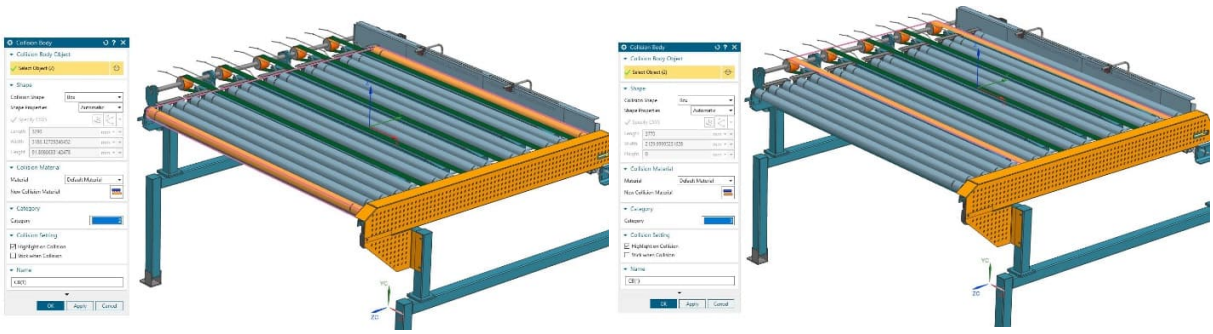
Mekaniikan simuloinnissa huomioitiin kokonaisuuden laajuus ja sen vaikutus suorituskykyyn. Mallintamisessa tulee käyttää harkintaa, kuinka yksityiskohtaisesti mekaniikan simuloi. Esimerkkinä voidaan ottaa tuotantolinjan alkupäässä sijaitseva risteysasema, jossa yksittäiset viilut syötetään pinkasta z-suunnassa ja risteysaseman jälkeen jatkavat matkaa x-suunnassa. Z-suunnassa on 14 kappaletta rullapyöriä ja x-suunnassa viisi kappaletta hihnakuljettimia, jotka nostamalla saadaan otettua viilusta kiinni ja vietyä kohti viilun kuvantamista. Mikäli jokainen rulla simuloidaan omana kappaleena, tulee jokaiselle määritellä massa, vapausaste ja törmäyspinta. Samat

toiminnallisuudet tulee tehdä hihnakuljettimille. Kuvassa 14 on törmäyspinnan määrittely yhdelle rullalle, joka tulee monistaa jokaiselle omanaan.



Kuva 14: Yksittäisen rullan törmäyspinnan määrittely mekaniikan simuloinnissa

Kyseisessä tapauksessa törmäyspinta voidaan määritellä alikokoonpanoon yksittäiselle rullalle. Mikäli kuljettimen kaikki rullat ovat identtisiä, kopioi työkalu ominaisuudet automaattisesti lopuille rullille kokoonpanossa. Suorituskyvyn kannalta tehokkaampi ja nopeampi simulointitapa on tehdä sekä rullille, että hihnakuljettimille, ainoastaan yksi törmäyspinta ja hyödyntää törmäyspinnan kategorian valintaa. Oletuksena työkalu tekee jokaiselle törmäyspinnalle kategoriaan 0, joka törmää kaikkien törmäyspintojen kanssa. Risteysaseman tapauksessa voidaan rullakuljettimille määrittää kategoria 2 ja hihnakuljettimille kategoria 3, jolloin ne eivät törmää keskenään ja hihnakuljettimet voidaan nostaa rullakuljettimen törmäyspinnan läpi. Kun viilut määritellään kategorialla 0, törmäävät ne kaikkien muiden pintojen kanssa. Kuvassa 15 on määritelty rulla- ja hihnakuljettimen törmäyspinnat ja hyödynnetty kategoria valintaa.



Kuva 15: Törmäyspintojen yksinkertaistaminen kategoriavalinnan avulla

Mallinnustavalla törmäyspintojen lukumäärä risteysasemalla vähenee alkuperäisestä 19 kappaleesta kahteen kappaleeseen. Samalla yksinkertaistetaan simulointia, joka oli tässä tapauksessa hyväksyttävää. Riittää, että viilu liikkuu rullakuljetinta pitkin, pysähtyy päätyvasteelle, anturit näkevät viilun ja PLC ohjaa hihnakuljettimet ylös ja käynnistää kuljettimet siirtämään viilun kuvantamiseen. Tarvittaessa risteysasema voidaan irrottaa omaksi simulointikokonaisuudekseen, mikäli mekaniikan simuloinnin tarkastelu halutaan tehdä yksityiskohtaisesti rulla rullalta.

Samaa periaatetta käytettiin tuotantolinjan muiden osien simuloinnissa. Törmäyspinnat ja liikuteltavat osat pidettiin mahdollisimman yksinkertaisina kokonaisuuksina kuitenkin niin, että tarvittava tarkkuus säilyy virtuaalisen käyttöönoton tavoitteiden mukaan. Tarvittaessa yksinkertaistetusta simulointitoteutuksesta pystytään tekemään yksityiskohtaisempi, mikäli tälle syntyy todellinen tarve. Taulukossa 11 on esitetty tuotantolinjan mekaniikan simulointilaajuus NX MCD-ominaisuuksien lukumäärän mukaan.

Taulukko 11: NX MCD- työkalulla tehty mekaniikan simuloinnin laajuus

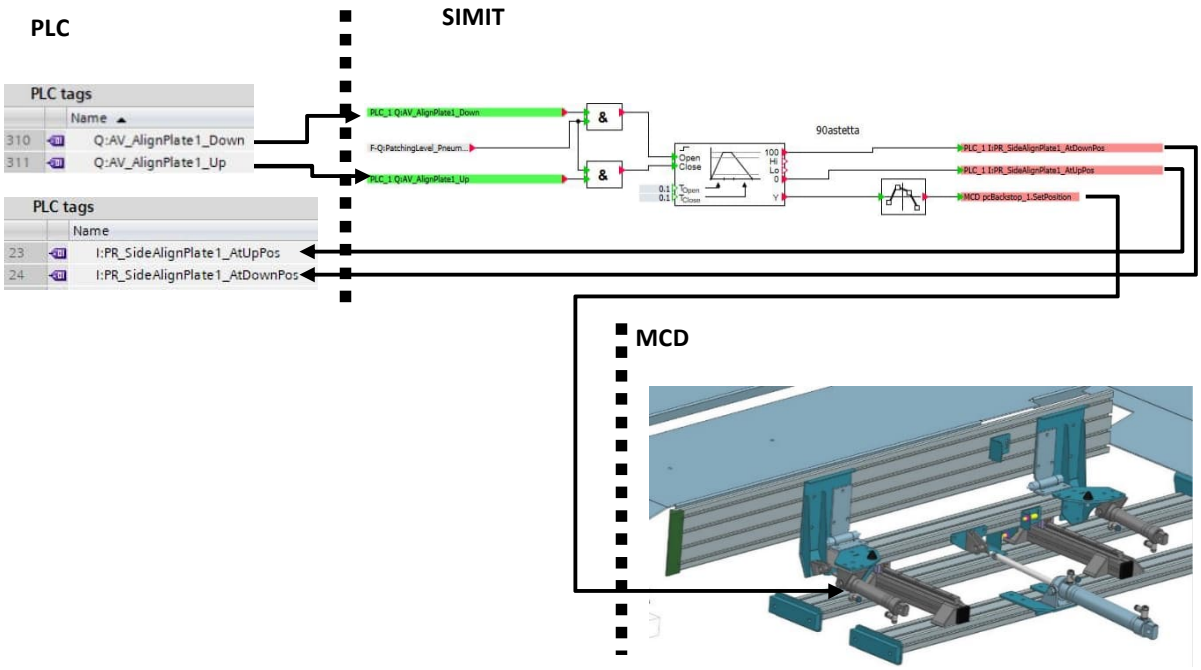
Lukumäärä	Ominaisuus	Esimerkkejä
100	Kappaleiden määrittely (Rigid body)	Xyz-portaalin liikkuvat osakokonaisuudet, kääntyvät vasteet, materiaalivirta
90	Törmäyspinta (Collision body)	Vasteet, kuljettimien pinnat
80	Nopeus / paikkaohjattu liike (Speed / Position control)	Taajuusmuuttajat, servot
90	Törmäysanturi (Collision sensor)	Induktiiviset, optiset anturit
36	Kuljetinpinta (Transport surface)	Kuljettimet
76	Liitokset (Joints)	Mekaniikan kinematiikka
27	Kappaleiden luonti/hävitys (Object source /Object sink)	Viilujen ja viilupinojen luominen sekä hävittäminen mallissa

Muita huomioitavia asioita mallin laajuuteen ja suorituskykyyn liittyen oli simulointitarkkuuden muuttaminen. Työkalun asetuksissa voi määrittää *Step Time*-asetuksen s, jonka tahdissa fysiikan laskenta suoritetaan. Suuri arvo parantaa suorituskykyä, mutta heikentää tarkkuuta. (Siemens 2020b). Oletuksena arvo oli 0,001, joka nostettiin arvoon 0,003. Lisäksi tehtiin valinta *Use parrallel calcluation*, joka keskittää laskentatehon törmäyksiin ja kinematiikan laskentaa. Tämä parantaa virtuaalisen käyttöönoton reaaliaikaisuutta, mutta voi hidastaa simulointia. (Siemens 2020b). Toinen valinta oli *Randomize Solving Order*, jolloin kinematiikka lasketaan satunnaisessa järjestyksessä. Lisäksi graafista näkymää kevennettiin visualisoinnin tarkkuutta alentamalla.

5.2.2 Toimilaitteiden ja prosessin simuloinnin laajuus sekä optimointi

SIMIT-työkalulla simuloitavia toimilaitteita tuotantolinjalla olivat sylinterit, taajuusmuuttajat, servovahvistimet, painonapit, kytkimet, hätäseispainikkeet, turvalukot, I/O-kortit ja turvapuolen I/O-kortit. Simulointimallin ollessa laaja tulee suorituskyky huomioida myös SIMIT-mallintamisessa. Virtuaalisen käyttöönoton tavoitteeksi määriteltiin kuinka mekaniikka, sähkö ja automaatiosuunnittelu toimivat kokonaisuutena. Tämän pohjalta määriteltiin toimilaitteiden simulointitarkkuus SIMIT-työkalulla.

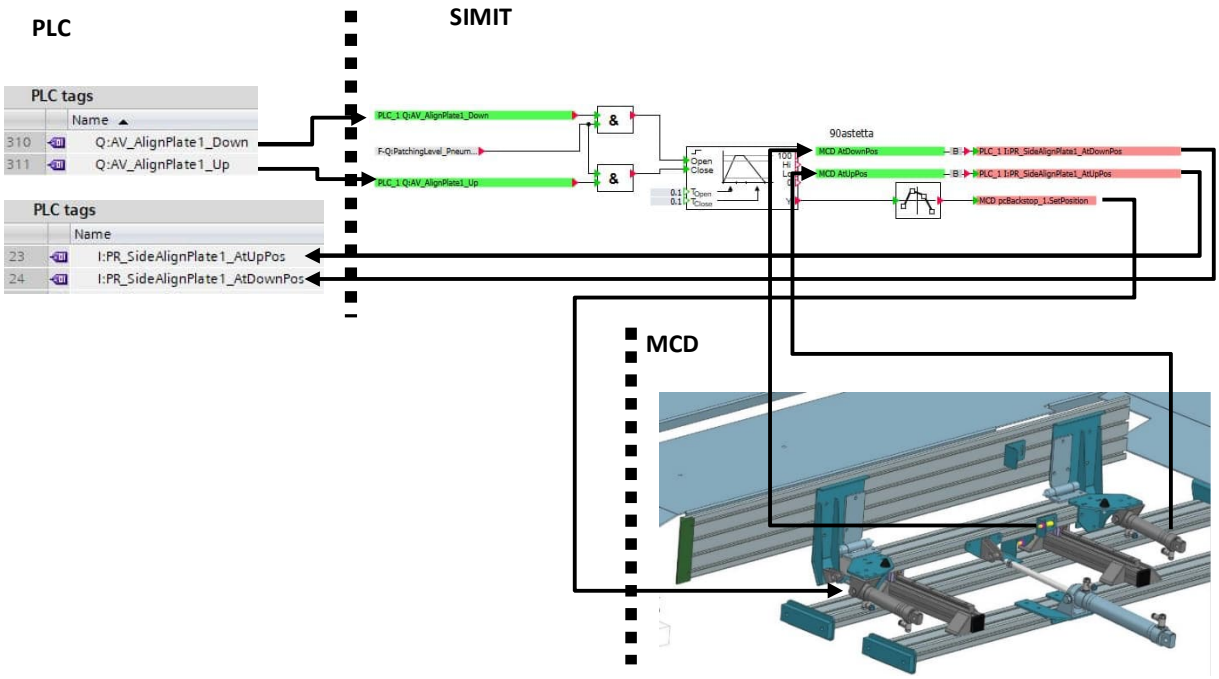
Paineilmasylinterit mallinnettiin pääosin SIMIT-ympäristössä. NX MCD-mallin ollessa laaja, on suorituskyvyn kannalta edullisempaa mallintaa SIMIT-ympäristössä mahdollisimman paljon toimilaitteiden käyttäytymistä. Kuvassa 16 on esitetty paineilmasylinterin mallintaminen SIMIT ja NX MCD-ympäristöissä sekä kytkentä PLC-muuttujiin.



Kuva 16: Paineilmasylinterin mallinnus virtuaalisen käyttöönoton ympäristössä

SIMIT-työkalun kirjastosta löytyy valmiit komponentit osalle toimilaitteista. Kuvan 16:n toteutuksessa on käytetty venttiililohkoa auki / kiinni komennoilla ja lähtöpuolen auki / kiinni tilatiedoilla sekä paikkatieto skaalattuna 0–100. SIMIT-malliin on kytketty PLC-lähdöt ohjaamaan sylinteriä auki / kiinni ja tuotu rajatiedot venttiililohkolta takaisin PLC:n tuloihin. NX MCD-mallille viedään vain sylinterin paikkatieto, jolloin nähdään sylinterin liikkuminen 3D-ympäristössä. Liikematka on skaalattu millimetreiksi SIMIT-ympäristössä. Venttiilin lukitustiedoiksi on kerätty turvaohjelman tilatiedot. Sylinteriä ei voida liikuttaa, mikäli turvapiiriä ei ole kuitattu ja paineilmaa ei ole sallittu. Mallintamistapa on suorituskyvyn kannalta hyvä, mutta ei mahdollista esimerkiksi sylinterin mekaanista törmäystarkastelua 3D-ympäristössä. Realistisempi tapa simuloida sylinteri toimilaitteena on kirjoittaa SIMIT-työkalusta paikkaohje NX MCD-ympäristössä mallinnetulle sylinterille, jolle on lisäksi määritelty sylinterin päätyrajat. Mekaanisen törmäyksen tapahtuessa sylinteri ei pääse päätyrajalle ja nähdään kuinka PLC-ohjelma reagoi poikkeustilanteeseen. NX

MCD-ympäristöön lisättäisiin tässä tapauksessa kaksi kappaletta törmäysantureita ja törmäyspinnat, joilla aktivoidaan anturit. Tarkempi simulointimalli on esitetty kuvassa 17.



Kuva 17: Sylinterin realistisempi simulointimalli verrattuna kuvan 16 toteutukseen

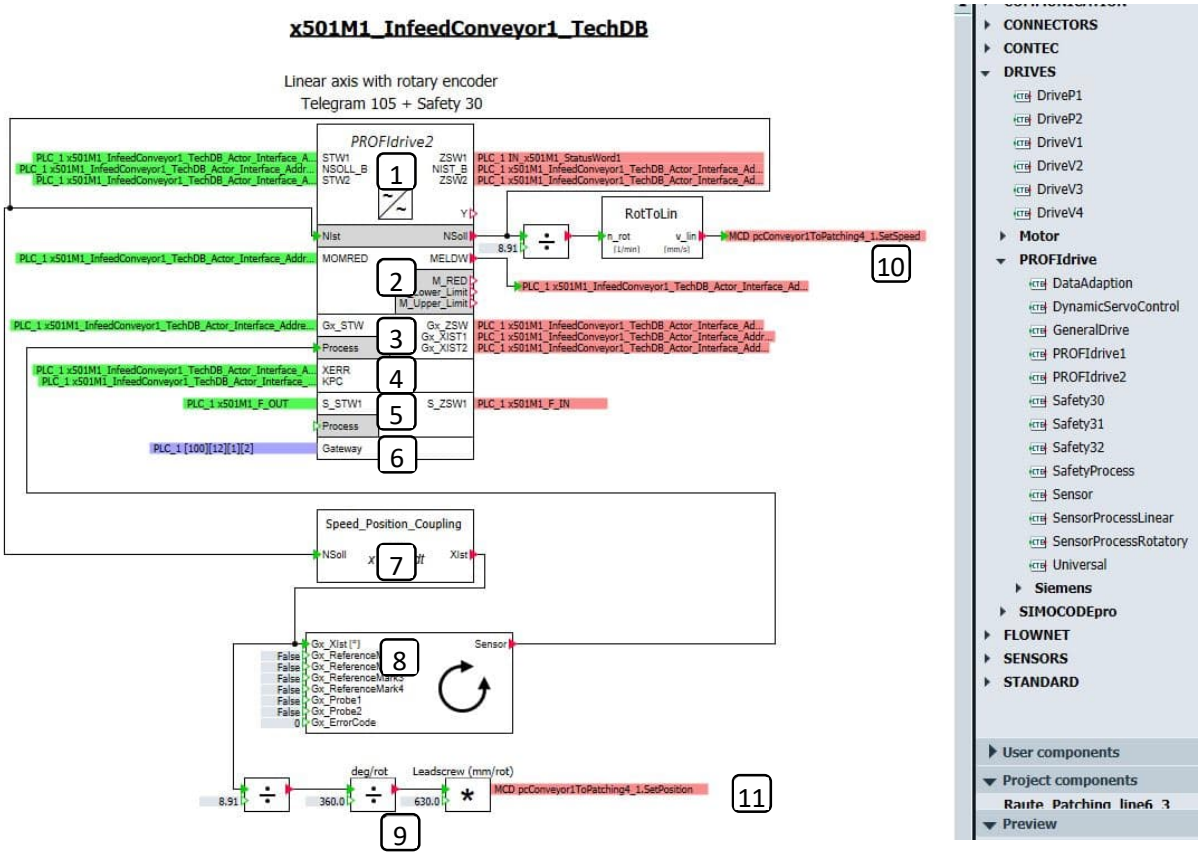
Tulee kuitenkin huomioida, että lisätyt toiminnallisuudet NX MCD- ja SIMIT-ympäristöissä vaativat lisää laskentatehoa sekä vaativat enemmän työtä. Näin yksityiskohtaiselle simuloinnille ei ollut tarvetta viilunpaikkauslinjan virtuaalisessa käyttöönotossa. Yksinkertaistetussa mallissa mekaaniset törmäystilanteet simuloidaan manuaalisesti katkaisemalla signaalin kulku SIMIT-ympäristöstä PLC:lle ennen liikkeen valmistumista esimerkiksi painonapilla.

Liikkeenohjauksen osalta SIMIT-ympäristössä mallinnettiin servovahvistimet sekä taajuusmuuttajat. Tuotantolinjalla servovahvistimeksi oli valittu Siemensin S120-sarjan tuotteet ja kommunikointisanomaksi oli valittu PROFIdrive-telegram 105 sekä turvasanomaksi PROFIsafe-telegram 30. Taulukossa 12 on esitetty ohjaussanomien rakenne.

Taulukko 12: PROFIdrive-telegram 105 ja PROFIsafe -telegram 30 ohjaussanomat (Siemens 2021 ja Siemens t2014).

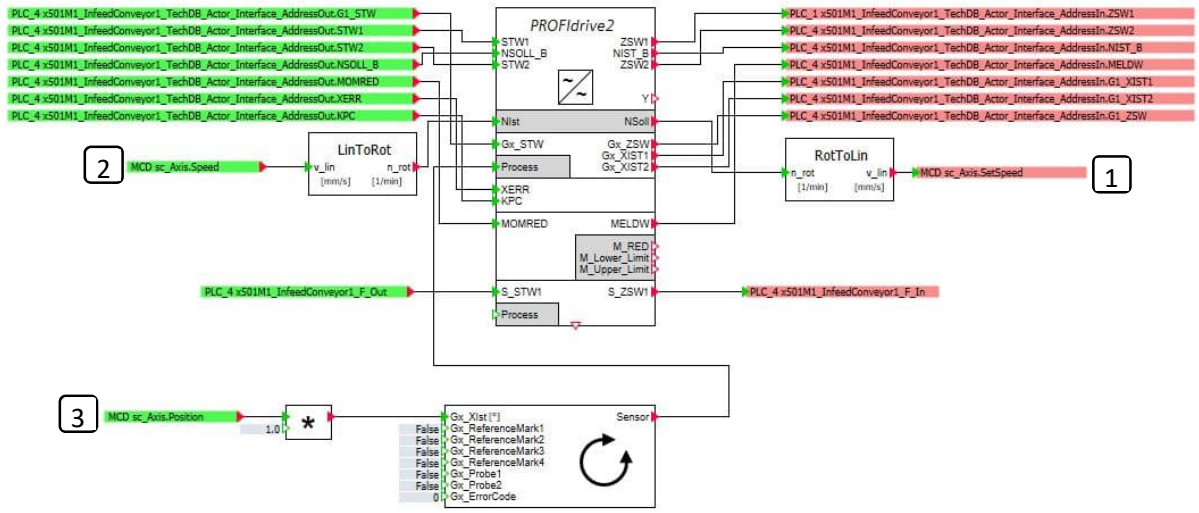
	PLC Lähdöt	Kuvaus	PLC Tulot	Kuvaus
1	STW1	Ohjaussana 1 (16bit)	ZSW1	Tilasana 1 (16bit)
	NSOLL_B	Nopeuden asetusarvo (16/32bit)	NIST_B	Nopeusarvo (16/32bit)
	STW2	Ohjaussana 2 (16bit)	ZSW2	Tilasana 2 (16bit)
2	MOMRED	Momenttirajoitus (16bit)	MELDW	Viestisana (16bit)
3	G1_STW	Enkooderin asetussana 1 (16bit)	G1_ZSW	Enkooderin tilasana (16bit)
			G1_XIST1	Enkooderin aktuaali paikka-tieto 1 (32bit)
			G1_XIST2	Enkooderin aktuaali paikka-tieto 2 (32bit)
4	XERR	Paikkatiedon poikkeama (32bit)		
	KPC	Paikkasäädön vahvistuskerroin (32bit)		
5	S_STW1	Turva ohjaussanoma (16bit)	S_ZSW1	Turva tilasana (16bit)

Servovahvistimien mallinnuksessa käytettiin SIMIT-työkalun valmiita kirjastokomponentteja, joista muodostetaan PLC:n liikkeenohjauksessa käyttämät sanomat. Kuvassa 18 on esitetty valmis simulointimalli S120-servovahvistimelle sekä PROFIdrive-telegram 105 ja PROFIsafe-telegram 30 kommunikoinnille. Numeroilla 1-5 osoitetaan taulukon 12 ohjaussanomien simulointikomponenttien sijainti kuvassa 18.



Kuva 18: Kommunikointisanoman PROFIdrive-telegram 105 simulointi SIMIT-työkalussa

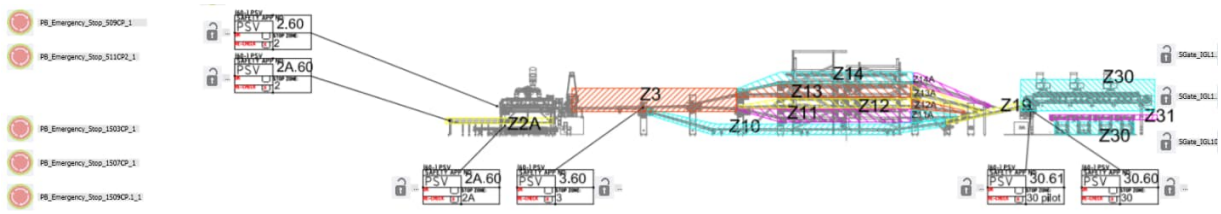
Ohjaussanoman simulointimalli koostuu seuraavista kirjastokomponenteista: PROFIdrive2 (1), MomentumReduction (2), Sensor (3), DynamicServoControl (4), Safety30 (5) ja Gateway (6). Sanoman lisäksi akselin paikoitus laskettiin SIMIT-työkalulla ja palautettiin takaisin PLC:lle. Paikoituksessa käytettävät kirjastokomponentit ovat: Speed_Position_Coupling (7), RotationSensor (8) sekä mekaniikan laskenta (9). NX MCD-työkalulle kirjoitettiin akselin nopeus (10) ja paikkaohje (11), jolloin 3D-ympäristössä nähdään akselin reaaliaikainen liike. Paikoituksen toteuttamiseen SIMIT-ympäristössä päädyttiin kokonaisuuden suorituskyvyn varmistamiseksi. Tarkempi simulointimalli saadaan kirjoittamalla SIMIT-työkalusta nopeuspyyntö (1) suoraan NX MCD-työkalussa mallinnetulle akselille, joka palauttaa liikkeen sen hetkisen nopeuden (2) ja paikkatiedon (3) takaisin SIMIT-työkaluun. Tarkempi simulointimalli on esitetty kuvassa 19.



Kuva 19: Kommunikointisanoman PROFIdrive-telegram 105 simulointi SIMIT-työkalussa ja paikoitus NX MCD ympäristön kautta.

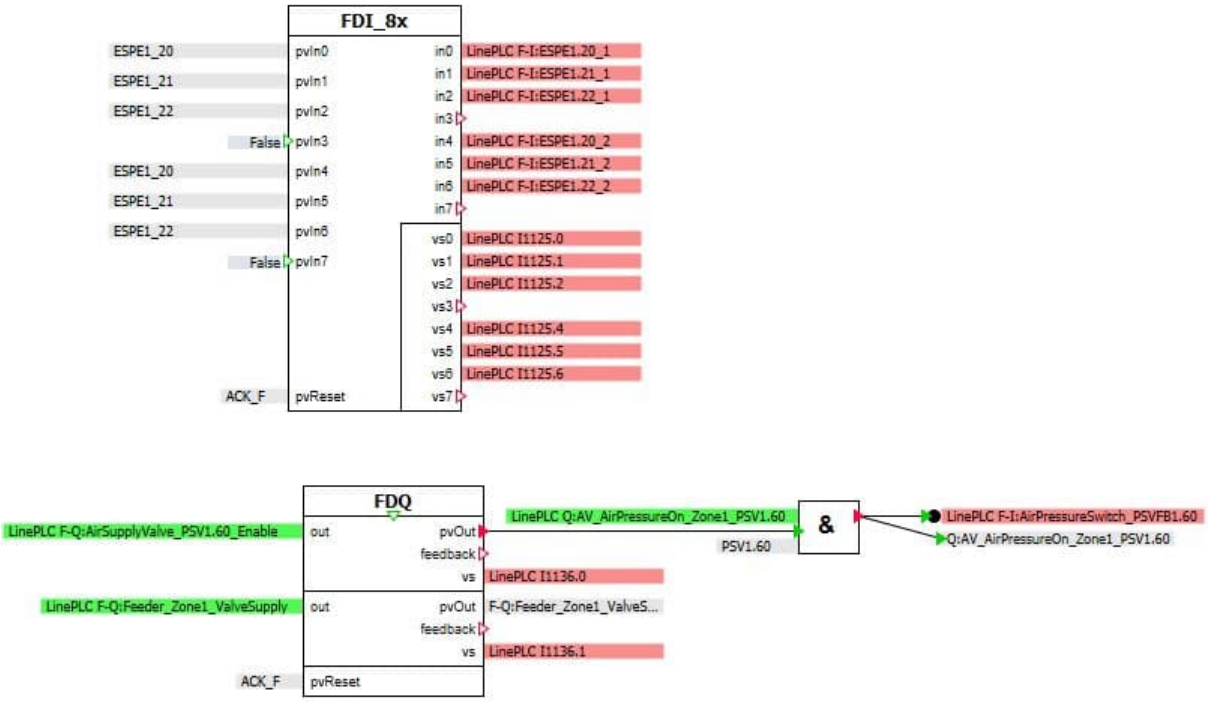
Tarkemmalla simulointimallilla saavutetaan liikkeiden realistisempi käyttäytyminen. Esimerkiksi mekaniikan törmäystilanteessa akselin liike pysähtyy 3D-ympäristössä, jolloin paikka-arvo pysähtyy ja nopeusarvo laskee. Tilanteesta syntyy jättämävirhe PLC:n liikkeenohjaukseen, jonka tulee pysäyttää liike asetettujen raja-arvojen täyttyessä. Yksinkertaistetulla mallilla ei saavuteta kyseistä tilannetta. Kuvassa 10 esitettiin, kuinka tieto liikkuu eri työkalujen välillä. Mikäli paikoitus kierrätetään NX MCD-työkalun kautta, vaatii se luonnollisesti enemmän laskentatehoa simuloinnin toteuttamiseen. Yksinkertaistetulla mallilla paikoitus tehdään SIMIT-työkalussa ja säästetään yksi simulointikierros NX MCD-työkalun kautta. Yksinkertaistus oli hyväksyttävä, kun ratkaisua verrataan virtuaalisen käyttöönoton tavoitteisiin. Mikäli simulointimallia halutaan tarkentaa ja laskentateho riittää, voidaan malliin tehdä tarvittavat muutokset jälkikäteen. Samaa periaatetta käytettiin myös muissa liikkeenohjauksen simulointimalleissa.

Turvapuolen toimilaitteiden, kuten hätäseispainikkeiden ja lukkojen simulointi toteutettiin kokonaisuudessaan SIMIT-työkalulla. Selkeyden vuoksi turvasimuloinnin avuksi otettiin tuotantolinjan erilaisia leikkauskuvia, joihin oli valmiiksi määritelty turva-alueet. Turva-aluille määriteltiin toimilaitteet, joita käytettiin virtuaalisen käyttöönoton aikana. Kuvassa 20 on esitetty yksi näkymä turvatoimintojen testauksesta.



Kuva 20: Turvatoimintojen simulointi ja testaus SIMIT-ympäristössä

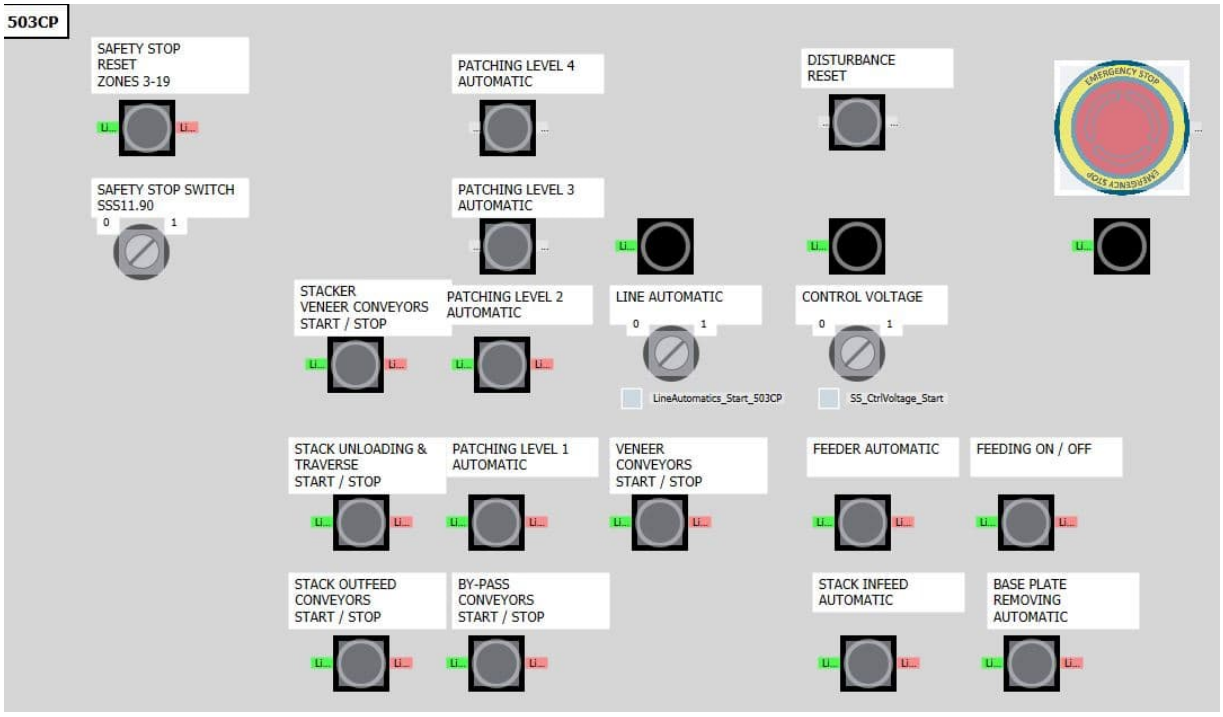
Turvalukkojen tilatiedot esitettiin visuaalisesti harmaalla ikonilla. Yhdistämällä simulointi turvasuunnitelmaan oli suunnittelijoiden helpompi omaksua virtuaalisen käyttöönoton turvapuolen simuloinnin käyttö. Samalla toiminnallisuuksien testaus selkeytyi. Testaaja pystyi tarkistamaan sijainnin kuvasta sekä toimilaitteiden paikkatiedoista. Hätäseispainikkeet kytkettiin SIMIT-mallin turvapuolen I/O-kortin simulointimalliin. Korteille oli käytettävissä valmiit simulointimallit, joista löytyivät valmiiksi tarvittava diagnostiikka sekä poikkeustilanteiden simulointi. Turvakorttien simulointimalli on esitetty kuvassa 21.



Kuva 21: Turvapuolen I/O-kortin valmis simulointimalli

Turvakortteihin oli kytketty SIMIT-työkalun sisäisillä muuttujilla toiminnot, kuten hätäseispainikkeet ja turvakortin lähdöt olivat kytketty PLC:n tuloihin. Diagnostiikan osalta turvakortit simuloivat jokaisen tulon tilasanoman. Asettamalla tilasanoman pois päältä simuloinnin aikana, nähdään järjestelmän reagointi esimerkiksi anturin vikaantuessa. Sama toiminnallisuus on turvapuolen lähtökorteissa.

Tuotantolinjan ohjauspulpetit visualisoitiin SIMIT-työkalussa riittävällä tarkkuudella. Tuotantolinjaa voidaan operoida simulointiympäristössä kuten oikeaa laitetta. Ohjauspulpetin mallinnus on esitetty kuvassa 22.



Kuva 22: Ohjauspulpetin simulointimallin visualisointi

SIMIT-mallin laajuudeksi muodostui 16213 simulointimerkkiä. Merkit lasketaan yhteen simulointipiirien tuloista ja lähdöistä sekä simulointimallien sisäistä tilamuuttujista. Esimerkiksi ja-piiri kahdella tulolla ja yhdellä lähdöllä kuluttaa kolme simulointimerkkiä. Käyttöjen simulointimallit kuluttivat eniten simulointimerkkejä, yhteensä 65 % koko mallista.

5.2.3 Automaatioympäristön simulointi

Automaation simuloinnilla tarkoitetaan tässä yhteydessä tuotantolinjan logiikan simulointia. Virtuaalisen käyttöönoton laajuus rajattiin linjaohjauksen PLC:hen sekä yhteen paikkatason PLC:hen. Linjaohjauksen hoitaa SIMATIC S7-1500-tuoteperheestä 1517F-malli ja paikkatason ohjauksen hoitaa 1517TF-malli.

Molemmat logiikat simuloitiin PLCSIM Advanced -työkalun avulla. Työkaluun käynnistettiin molempien logiikoiden emulaattori yhtä aikaa ja molemmille logiikoille ladattiin omat ohjelmat, kuten oikeiden laitteiden kanssa. Logiikoiden välinen kommunikointi tapahtui PN/PN I/O-kortin kautta ja signaalien kytkentä toteutettiin SIMIT-ympäristössä. TIA-Portal-työkalusta tulee sallia PLC-ohjelman simulointi, mutta muuten ei tarvitse tehdä muutoksia varsinaiseen ohjelmakoodiin.

6 Tulokset

Tässä luvussa vastataan kolmanteen tutkimuskysymykseen: mitkä ovat virtuaalisen käyttöönoton vaikutukset projektitoimituksen eri vaiheisiin ja aikataulutukseen. Ensimmäisessä alaluvussa käsitellään virtuaalisen käyttöönoton vaikutuksia projektitoimitukseen ja toisessa alaluvussa käsitellään määrällisten ja laadullisten mittareiden tuloksia. Viimeisessä alaluvussa esitetään projektitoimituksen haasteiden ratkaisu virtuaalisen käyttöönoton avulla.

6.1 Virtuaalisen käyttöönoton vaikutukset projektitoimitukseen

Virtuaalisen käyttöönoton avulla siirrettiin testauksen painopiste pois tehdastestauksesta ja käyttöönotosta projektitoimituksen alkuvaiheeseen. Testauksen hajautus pidemmälle aikavälille paransi projektitoimituksen laatua, kun testausta suoritettiin enemmän ja laajemmalle kokonaisuudelle ilman kiireen tunnetta. Virtuaalinen käyttöönotto lisäsi projektitoimitukseen joustavuutta, kun suunnittelijat testasivat kokonaisuuden toimivuutta digitaalisella mallilla, joka ei ole riippuvainen valmistuksessa tapahtuvista viiveistä. Testausta pystyttiin jatkamaan tuotantolinjan purkamisen jälkeen ja toimituksen aikana loppuasiakkaalle ennen käyttöönottoa, jolloin projektitiimi ei hajaantunut suvantovaiheen aikana, vaan jatkoivat työskentelyä tuotantolinjan digitaalisen mallin kanssa.

Suunnitteluprosessin, resurssien ja aikataulutuksen osalta muutokset olivat pieniä, kun virtuaalisen käyttöönoton ympäristö toteutettiin palveluna rinnakkain Raute Oyj:n oman suunnitteluprosessin kanssa. Suurin muutos oli automaatiosuunnittelun osittainen aikaistaminen lähtötietojen tuottamiseksi. Projektitoimitukselle lisättiin kaksi virtuaalista tehdastestausta, johon osallistuivat mekaniikka-, sähkö-, automaatio- ja turvasuunnittelija sekä projekti- ja tuotepäällikkö. Virtuaalisessa tehdastestauksessa hyödynnettiin Raute Oyj:n tehdastestissä käyttämää dokumenttipohjaa, jota laajennettiin alkuperäisestä, koska virtuaalinen käyttöönotto mahdollisti esimerkiksi laajemman skenaariotestauksen kuin varsinainen tehdastesti. Virtuaalisessa tehdastestauksessa keskityttiin erityisesti niihin osa-alueisiin, joita ei kokoonpanna Raute Oyj:n tiloissa tehdastestausta varten. Virtuaalisessa ympäristössä luotiin kaikki erilaiset yhdistelmät materiaalivirran syötössä ja testattiin, kuinka automaatio-ohjelma suoriutuu eri skenaarioista. Mekaniikkasuunnittelun osalta

tarkasteltiin antureiden sijoittelua, mahdollisia mekaanisia törmäyksiä, vasteiden sijoittelua ja materiaalivirran käyttäytymistä. Turvasuunnitelmasta testattiin osa turva-alueiden toiminnallisuuksista, kuten hätäseis painikkeet, kuittaukset ja turvaohjelman toiminta. Käyttöliittymästä tarkastettiin työjonon ja diagnostiikan toiminta. Virtuaalisen käyttöönoton avulla parannettiin suunnittelijoiden välistä yhteistyötä ja lisättiin läpinäkyvyyttä kokonaisuuden edistymisestä. Virtuaalisen tehdastestauksen ulkopuolelle rajattiin lopullisen tuotteen laatu eli viilun paikkauksen onnistuminen. Virtuaalisella tehdastestauksella saatiin testattua tuotantolinjan toiminnallisuuksia etukäteen, jolloin tehdastestauksessa jäi enemmän aikaa mekaanisten asennusten ja sähkökytkentöjen tarkasteluun. Lisäksi tehdastestauksessa keskityttiin lopullisen tuotteen laatuun.

Tuotantolinjan tehdastestauksen aloitus viivästyi Nastolassa valmistuksessa tapahtuneiden viivästymisien seurauksena. Automaation tehdastestaukselle jäi aikaa kaksi viikkoa alkuperäisen neljän viikon sijaan. Lyhentynyt tehdastaus korosti virtuaalisen käyttöönoton tarvetta projektitoimitukselle, kun toiminnallisuudet pystyttiin testaamaan digitaalisen mallin avulla.

Virtuaalisen käyttöönoton ympäristöä hyödynnettiin asiakaskommunikoinnissa. Virtuaalisen tehdastestauksen osuuksista nauhoitettiin videot, jotka jaettiin loppuasiakkaalle tarkasteltavaksi. Viestinnällä lisättiin konkretiaa tuotantolinjan suunnittelun edistymisestä sekä siitä, kuinka tuotantolinja tulee toimimaan loppuasiakkaan tiloissa.

6.2 Määrällisten ja laadullisten mittareiden tulokset

Virtuaalisen käyttöönoton määrälliseksi mittariksi valittiin koekäyttötunnit, jotka pitävät sisällään suunnitteluun käytetyt tunnit sekä käyttöönoton osalta automaation käyttöönottotunnit. Laadullisen mittarin osalta projektitoimituksen edetessä kirjattiin löydökset ja korjaukset, joita tehtiin virtuaalisen käyttöönoton ympäristön avulla.

Määrällisen mittarin osalta alitettiin tunnit 4,7 % verran. Kokonaisuutena projektiryhmä oli tyytyväinen parannuksiin, joskin odotusarvo oli korkeammalla. Positiivinen kokemus jäi uusien ominaisuuksien testauksesta sekä painopisteen siirtymisestä suunnitteluvaiheeseen, jossa kokonaisratkaisu voidaan testata virtuaalisen käyttöönoton avulla.

Laadullisten mittareiden osalta arviointi on haastavampaa, koska näkemys perustuu henkilöiden arvioon löydöksen vaikutuksesta projektitoimituksen läpivientiin. Automaatiosuunnittelija totesi

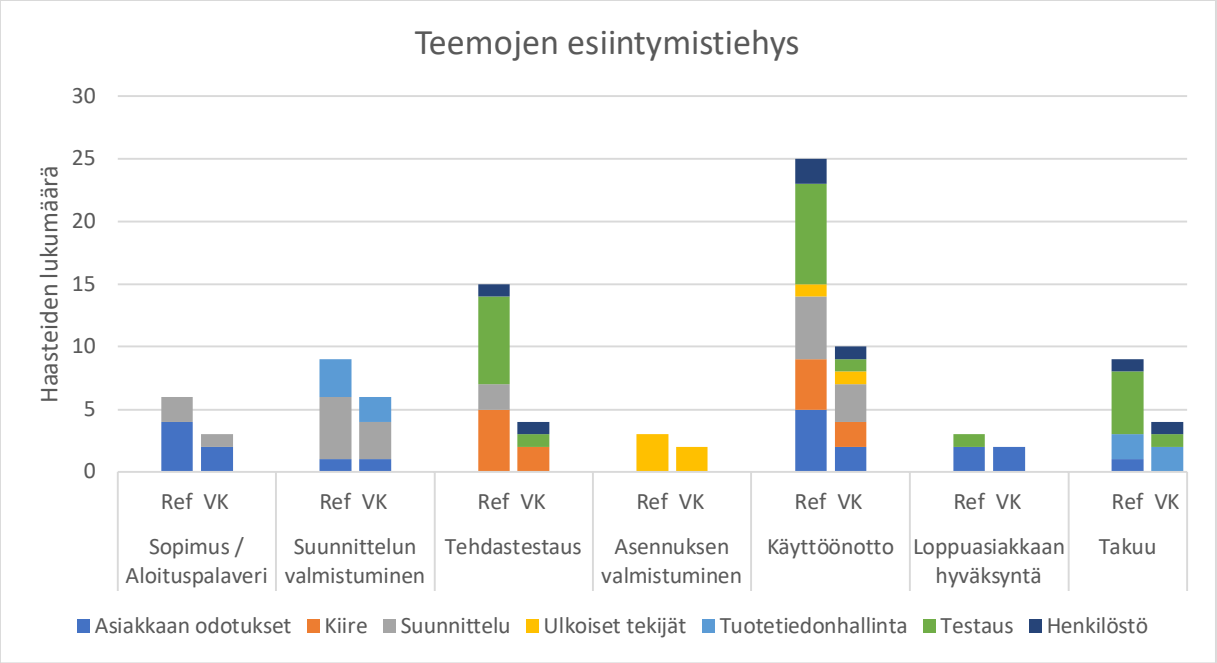
virtuaalisen käyttöönoton tehostavan ohjelmakoodin kirjoittamista ja testaamista, koska oman ohjelmakoodin toimivuudesta saa välittömästi visuaalisen palautteen. Esimerkkinä voidaan pitää pinkantuontiohjelmaa, joka suunniteltiin ja testattiin virtuaalisen käyttöönoton ympäristön avulla. Automaatiosuunnittelijan arvio oli noin 40 h säästö suunnitteluajassa. Pinkantuontiskenaarioissa testattiin tilanteita, jotka olisivat olleet vaikeita testata loppuasiakkaan luona käyttöönotossa. Viilupinkat painavat noin 500 kg ja niiden siirtely eri skenaarioihin on vaikeaa ja vie sekä resursseja että aikaa tuotannolta. Virtuaalisen käyttöönoton avulla testatut poikkeustilanteet, jotka normaalisti ilmenevät käyttöönoton jälkeen tuotantoa ajettaessa, eivät enää kuormita huoltoliiketoimintaa, joka vähentää takuukäyntien tarvetta loppuasiakkaan luona. Poikkeustilanteiden lisäksi virtuaalisen käyttöönoton avulla korjattiin tuotantolinjassa löytyneitä virheitä, kuten pinkan ulosajo manuaalitilassa, siirtorekisterin toiminta, työjonon toiminta, manipulaattorin törmäyksen estäminen viilun oikaisuvasteeseen sekä muita pienempiä virheitä. Uusien ominaisuuksien testaaminen tehostui, kun virtuaalinen käyttöönotto mahdollisti kokonaisuuden testauksen materiaalivirran kanssa. Virheiden korjaus ja uusien ominaisuuksien testaus olisi vienyt enemmän aikaa ja resursseja loppuasiakkaan luona. Sujuva käyttöönotto parantaa Rauten Oyj:n mainetta yrityksenä.

Käyttöönotosta saatu palaute kertoi siellä löytyneen vielä lisää poikkeustilanteita, joita ei ollut testattu virtuaalisella käyttöönotolla tai tehdastestissä. Esimerkiksi pinkansyötössä trukkikuski ei aina tuo pinkkaa samaan kohtaan, eivätkä pinkat ole täsmällisiä kuutioita, kuten digitaalisessa mallissa. Vaikka virtuaalisessa käyttöönotossa testattiin eri materiaalivirran skenaarioita, olisi pinkkoja tämän lisäksi pitänyt siirtää sivusuunnassa hieman eri kohtiin, jotta olisi voitu testata ohjelmakoodin reagointi materiaalivirran poiketessa suunnitellusta.

6.3 Projektitoimituksen haasteiden ratkaisu virtuaalisen käyttöönoton avulla

Luvussa 4.6 esiteltiin yhteenveto Raute Oyj:n projektitoimituksen haasteista, niiden teemoista ja esiintymistiheydestä eri vaiheissa. Yhtenä tavoitteena oli ratkaista projektitoimituksen haasteita virtuaalisen käyttöönoton avulla ja onkin mielekästä verrata alkuperäisiä haasteita tutkimuksen aikana saavutettuihin tuloksiin. Kaaviossa 2 on yhteenveto alkuperäisistä haasteista ja vertailu haasteisiin, jotka jäivät jäljelle virtuaalisen käyttöönoton hyödyntämisen jälkeen. Tulokset ovat saatu vertailemalla tutkimuksen laadullisen mittarin tuloksia alkuperäisiin haasteisiin. Mikäli

virtuaalinen käyttöönotto auttoi ratkaisemaan tietyn haasteen projektitoimituksesta, on se poistettu kaaviosta.



Kaavio 2 Haasteiden esiintymistiheyden muutos virtuaalisen käyttöönoton jälkeen (Ref viittaa teemahaastattelun tuloksiin ja VK viittaa virtuaaliseen käyttöönottoon)

Sopimus ja aloituspalaverin vaiheessa teemoina esiintyivät asiakkaan odotukset ja suunnitteluun liittyvät haasteet. Projektitoimituksen aikana digitaalista mallia hyödynnettiin asiakaskommunikoinnissa, jonka avulla lisättiin loppuasiakkaan ymmärrystä kokonaisratkaisusta. Ymmärryksen kasvaessa loppuasiakas kykeni esittämään tarkempia kysymyksiä ja samalla pystyttiin kartoittamaan asiakastarpeita kattavammin. Yhtenä haasteena oli loppuasiakkaan tuotekulun ymmärtäminen, mikä oli mahdollista havainnollistaa molemmille osapuolille digitaalisen mallin avulla.

Virtuaalisella käyttöönoton digitaalisella mallilla pystytään vastaamaan loppuasiakkaan odotuksiin liittyviin haasteisiin. Mallin avulla lisätään loppuasiakkaan tietoisuutta, jonka seurauksena asiakkaan tarpeet pystytään kartoittamaan paremmin projektitoimituksen alussa ja sen edetessä. Projektitoimituksen luovutusvaiheessa käyttöönotto suoritetaan laadullisesti paremmalla kokonaisuudella, jolloin virheitä ei korjata loppuasiakkaan tiloissa. Luovutuksessa tulee vähemmän yllätyksiä loppuasiakkaalle sekä vähemmän uusia vaatimuksia toiminnallisuuksista, koska tietoisuutta on lisätty digitaalisen mallin avulla projektitoimituksen aikana. Lisäksi takuuaikana kapasiteetin

nostamista on mahdollista tutkia virtuaalisen käyttöönoton avulla, mikä vastaa loppuasiakkaan tulevaisuuden tarpeisiin.

Kiireen osalta virtuaalinen käyttöönotolla on vaikutusta projektitoimituksen tehdastestaukseen sekä luovutukseen. Virtuaalinen käyttöönotto ei ole sidottu valmistuksessa tapahtuviin viivästyksiin, jotka lyhentävät koekäyttöaikaa. Sen sijaan virtuaalista käyttöönottoa tehdään valmistuksen kanssa rinnakkain ja saadaan lisää aikaa testaukselle ja vähennetään kiirettä tämän osalta. Projektitoimituksen luovutusvaiheessa tehdään vähemmän ohjelmakorjauksia, mikä vähentää kiirettä sekä parantaa laatua.

Suunnitteluun liittyvissä haasteissa virtuaalinen käyttöönotto paransi ymmärrystä tuotekulusta skenaariotestauksen avulla. Virtuaalisessa käyttöönotossa yhdistyvät mekaniikka-, sähkö-, turva- ja automaatiosuunnittelu, jolloin mekaanisten suunnitteluratkaisuiden vaikutukset automaatioon nähdään aikaisessa vaiheessa. Mekaaniset suunnitteluvirheet havaitaan testauksen aikana ja tarvittavat muutokset on mahdollista tehdä ajoissa. Automaatiosuunnittelun osalta virtuaalinen käyttöönotto lisää ymmärrystä automaatio-ohjelman valmiusasteesta eri suunnittelijoiden välillä ja parantaa laatua. Turvasuunnittelun osalta testataan turvaohjelma, jolloin osa turvasuunnittelun haasteista ratkaistaan virtuaalisen käyttöönoton avulla.

Lukumäärällisesti pienin vaikutus virtuaalisella käyttöönotolla on ulkoisiin tekijöihin, tuotetiedonhallintaan sekä henkilöstöön. Ulkoisiin tekijöihin listattiin alihankkijoiden osaamisen taso. Virtuaalisen käyttöönoton ympäristön avulla alihankkijoita voidaan kouluttaa esimerkiksi tuotantolinjan käyttöönottoon, joka lyhentää käyttöönottoon kuluvaa aikaa loppuasiakkaan luona. Tuotetiedonhallinta on erillinen kokonaisuus, jota tarvitaan ylläpitämään projektitoimituksen dokumentaatiota, eikä siihen liittyviä haasteita voida ratkaista virtuaalisen käyttöönoton avulla.

Suurin vaikutus virtuaalisella käyttöönotolla on testauksen puutteesta johtuviin haasteisiin. Ennen tehdastestausta virtuaalisella käyttöönotolla lisätään PLC-ohjelman ja turvaohjelman testausta, parannetaan tuotantolinjan valmiusastetta ennen toimitusta, testataan koekäytöstä puuttuvat osuudet, tehdään skenaariotestausta sekä testataan tuotantolinjan uudet ominaisuudet. Asiakkaan luona suoritettavassa käyttöönotossa löytyy vähemmän ohjelmavirheitä, ja tuotannon aikana ei esiinny niin suurta määrää puutteita. Huoltoliiketoiminta voi hyödyntää virtuaalisen käyttöönoton ympäristöä ohjelmakoodin testauksessa. Laadukkaammin toimitettu tuotantolinja kuormittaa vähemmän huoltoliiketoimintaa varsinaisen käyttöönoton jälkeen.

Tulee toki huomioida, että uusi toimintatapa ja ohjelmistot luovat uusia haasteita projektitoimitukselle, eikä haasteiden ratkominen ole niin suoraviivaista kuin edellä on esitetty. Esimerkkinä voidaan nostaa suunnittelijoiden kouluttaminen ja osaamisen nostaminen sekä uuden toimintatavan omaksuminen. Virtuaalisessa käyttöönotossa tulee lisäksi huomioida teknologian tarjoamat mahdollisuudet ja tekniset rajoitteet, jotka luovat omat haasteensa toteutukselle. Virtuaalinen käyttöönoton avulla pystytään vastaamaan osaan projektitoimituksen haasteista, mutta sen todellinen hyödyntäminen vaatii kokonaisuuden tarkastelua, koulutusta sekä nykyisen projektitoimitusprosessin muokkaamista. Yhteenveto projektitoimituksen haasteista ja virtuaalisen käyttöönoton vaikutuksista on esitetty liitteessä 2.

7 Pohdinta ja johtopäätökset

Tässä luvussa arvioidaan, miten tutkimus on saavuttanut tavoitteena. Luvussa pohditaan myös virtuaalisen käyttöönoton hyödyntämistä jatkossa ja siihen liittyviä mahdollisuuksia sekä haasteita. Alaluvussa 7.4 arvioidaan tutkimuksen panosta tieteeseen. Lisäksi viimeisissä alaluvuissa arvioidaan tutkimuksen rajoitteita ja esitetään jatkotutkimusalueita.

7.1 Tavoitteiden saavuttaminen

Tutkimuksen tavoitteena oli ymmärtää miten virtuaalinen käyttöönotto vaikuttaa projektitoimituksen läpivientiin ja voiko sillä tehostaa suunnittelua ja käyttöönottoa. Kirjallisuuskatsauksen avulla lisättiin tietämystä digitaalisen kaksosen ja virtuaalisen käyttöönoton määritelmistä, hyödyistä ja kuinka ne liittyvät toisiinsa sekä miten virtuaalinen käyttöönotto tulee huomioida osana suunnittelua. Projektitoiminnan osalta kirjallisuuskatsaus keskittyi projektitoimitusten onnistumisen edellytyksiin.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella pystyttiin esittämään digitaalisen kaksosen ja virtuaalisen käyttöönoton yhteys ja niiden määritelmät. Lisäksi todettiin virtuaalisen käyttöönoton olevan mahdollista toteuttaa osana suunnittelua ja käyttöönottoa sekä tällä olevan mitattavaa hyötyä. Kirjallisuuskatsauksen perusteella osaa projektitoimituksen onnistumisen edellytyksistä pystytään tukemaan virtuaalisen käyttöönoton avulla. Aikaisemmat tutkimukset perustuivat suppeampiin kokonaisuuksiin, eikä kirjallisuudesta löytynyt tutkimusta virtuaalisen käyttöönoton vaikutuksista projektitoimituksessa, joka vahvisti tämän tutkimuksen tarpeellisuutta.

Virtuaalisen käyttöönoton hyödyntäminen projektitoimituksessa vaatii ymmärrystä projektitoimitukseen liittyvistä haasteista, joita voidaan mahdollisesti ratkaista teknologian avulla. Haasteiden kartoitus toteutettiin teemahaastatteluna, jossa selvitettiin projektitoimituksen haasteita eri vaiheissa haastattelemalla projektiin osallistuvia henkilöitä Raute Oyj:ltä. Haastatteluista tehtiin yhteenveto ja ryhmiteltiin haasteet eri teemojen alle. Teemojen esiintymistä tarkasteltiin projektitoimituksen eri vaiheissa, jonka avulla pääteltiin suurimman osan haasteista kumuloituvan tehdastestiin Raute Oyj:n tiloissa sekä käyttöönottoon loppuasiakkaalla. Yhteenvedon jälkeen määriteltiin

minkälaisia tavoitteita projektitoimituksen haasteet asettavat virtuaaliselle käyttöönotolle sekä miten mitata syntyvä hyöty.

Virtuaalisen käyttöönoton toteutus tehtiin tapaustutkimuksena nelitasoiselle viilunpaikkauslinjalle, josta rakennettiin digitaalinen malli hyödyntäen Siemens Digital Enterprise-tuotetarjoamaa. Ratkaisuksi valittiin tuotantolaitteen validointi, jossa käytetään NX Mechatronics Concept Designer, SIMIT ja PLCSIM-Advanced työkaluja. Tapaustutkimuksen aikana kerättiin havaintoja virtuaalisen käyttöönoton vaikutuksia projektitoimituksen läpivientiin osana laadullista mittaria sekä määrällisenä mittarina seurattiin tuntien toteutumista suunnittelun ja käyttöönoton osalta.

Viimeisessä osuudessa tehtiin yhteenveto virtuaalisen käyttöönoton vaikutuksista projektitoimitukselle ja purettiin määrällisten ja laadullisten mittareiden tulokset. Lisäksi tehtiin yhteenveto projektitoimituksen haasteiden ratkaisemista virtuaalisen käyttöönoton avulla.

Teemahaastattelun osalta tavoitteet saavutettiin. Tulokset käytiin läpi yhdessä Raute Oyj:n projektiryhmän kanssa, mikä vahvisti löydökset. Haastatteluiden ja teemoittelun avulla saatiin kokonaiskäsitys Raute Oyj:n projektitoimituksen eri vaiheista ja niihin liittyvistä haasteista. Haasteisiin perustuen pystyttiin asettamaan tavoitteet virtuaaliselle käyttöönotolle ja määrittämään teknisesti sopiva toteutustapa.

Virtuaalisen käyttöönoton teknisen toteutuksen osalta saavutettiin riittävä taso, mutta osa halutuista ominaisuuksista jäi toteuttamatta. Ympäristönä NX Mechatronics Concept Designer, SIMIT ja PLCSIM Advanced tarjoavat mahdollisuuden yksityiskohtaiseen mekaniikan, turvan, automaation, toimilaitteiden ja prosessin simulointiin. Haasteena oli Raute Oyj:n tuotantolinjan laajuus, joka piti huomioida simulointimallin toteutuksessa. Mallin suunnittelun aikana kiinnitettiin erityistä huomioita suorituskykyyn ja pyrittiin pitämään simulointimalli mahdollisimman kevyenä, mutta riittävän tarkkana tavoitteiden saavuttamiseksi. Pääosin tässä onnistuttiin. Virtuaalisen käyttöönoton avulla oli mahdollista testata tuotantolinjan alkupään materiaalinsyöttö, joka normaalisti testataan vasta loppuasiakkaan luona. Lisäksi testattiin tulokuljettimet kaikille neljälle viilunpaikkaustasolle sekä ohituskuljetin. Paikkaustasoista simulointiin vain yksi neljästä näiden ollessa identtisiä keskenään. Testauksen näkökulmasta ei nähty riittävästi hyötyä kaikkien neljän paikkaustason simuloimiseksi. Lisäksi rajaus kevensi simulointimallia ja vähensi työmäärää. Tuotantolinjan loppupäästä simuloitiin poistokuljettimet sekä viilujen pinonta. Toteutuksella saatiin

aikaiseksi suljettu materiaalikierto virtuaaliselle käyttöönotolle, joka helpottaa kokonaisuuden testausta.

Virtuaalisen käyttöönoton ulkopuolelle jätettiin VDA-kameranäköjärjestelmä, jota ei saatu liitettyä osaksi teknistä toteutusta osittain aikataulupaineiden takia. Kameranäköjärjestelmän puuttumisen vuoksi paikkauskoordinaatteja syötettiin manuaalisesti PLC-ohjelmalle. Viilun paikkaustasolla on käytössä Siemensin aikaleimakortti, jolla tunnistetaan viilun reuna sen saapuessa paikkaustasolle. Aikaleimakortille ei ole valmista simulointimallia SIMIT-ympäristössä, eikä sitä saatu toteutettua annetussa aikataulussa, jolloin se piti jättää simuloinnin ulkopuolelle ja ohittaa PLC-ohjelmakoodissa virtuaalisen käyttöönoton ajaksi.

Virtuaalisen käyttöönoton ympäristön suorituskyky ei aivan riittänyt reaaliaikaiseen simulointiin. Toisaalta simulointiympäristön synkronointitoiminto varmisti asioiden tapahtuvan oikeassa järjestyksessä, jolloin malli on toistettavuudeltaan hyvä, eikä mallin pieni hitaus haitannut ympäristön käyttöä tai tulosten luotettavuutta. Lisäksi tiedossa oli seuraavan NX MCD-version parantavan suorituskykyä merkittävästi, jolloin kyseinen ominaisuus hyväksyttiin käytetyllä versiolla kyseiselle projektille. Pääosin ympäristö toimi hyvin ja Raute Oyj:n suunnittelijat pystyivät testaamaan jo suunnitteluvaiheessa tuotantolinjan toiminnallisuuksia laajemmin kuin varsinaisessa tehdastestauksessa Raute Oyj:n tiloissa. Virtuaalisessa käyttöönotossa keskityttiin erityisesti niihin osuuksiin, jotka aiemmin on testattu vasta loppuasiakkaalla.

Lopputulosten osalta määrällinen mittari osoitti 4,7 % alituksen seurattuihin tunteihin. Mittariin sisältyivät suunnittelun, kokoonpanon ja koekäytön tunnit sekä käyttöönoton osalta automaation tunnit. Laadullisten mittareiden osalta kirjattiin virtuaalisen käyttöönoton löydökset projektitoimituksen aikana. Määrällisen mittarin näkökulmasta saavutettiin asetettu tavoite, vaikka odotusarvo Raute Oyj:n projektitiimillä oli korkeammalla. Toisaalta projektit ovat aina yksilöllisiä ja myös tarvittavien resurssien määrittelyssä voi olla virheitä, mikä vääristää tulosta suuntaan tai toiseen.

Laadullisten mittareiden osalta tulokset olivat myönteisiä. Suunnittelu tehostui, testausta tehtiin laajemmalle kokonaisuudelle ilman kiirettä, jonka tuloksena virtuaalinen käyttöönotto paransi projektitoimituksen laatua. Virtuaalinen käyttöönotto ei ole sidottu valmistuksesta johtuviin viivästyksiin tai fyysiseen laitteeseen testauksen osalta, mikä lisäsi joustavuutta projektitoimitukselle.

Valitut mittarit toimivat riittävällä tarkkuudella ja auttoivat ymmärtämään virtuaalisen käyttöönoton vaikutusta kokonaistoimitukseen, ja tuloksia voitiin hyödyntää projektin jälkeen onnistumisen arviointiin. Lopputuloksena Raute Oyj kohdeyrityksenä oli tyytyväinen saamiinsa tuloksiin ja ymmärrys virtuaalisen käyttöönoton mahdollisuuksista ja rajoituksista kasvoi yrityksen sisällä. Tulosten pohjalta Raute Oyj pystyi tekemään päätöksen virtuaalisen käyttöönoton laajentamisesta osaksi projektitoimituksia, tuotekehitystä ja huoltoliiketoimintaa.

Haasteena kokonaisuudessa oli virtuaalisen käyttöönoton laajuus, jonka seurauksena toimintatavan käyttöönotto otti oman aikansa. Tarkemmalla rajauksella ja keskittymällä esimerkiksi vain loppuasiakkaan luona testattaviin osakokonaisuuksiin olisi voitu tehostaa projektitoimitusta pienemmällä työllä. Pienemmistä osakokonaisuuksista olisi ollut helpompi lähteä laajentamaan toimintaa isompiin kokonaisuuksiin. Toisaalta laajempi kokonaisuus toi paremmin esille virtuaalisen käyttöönoton mahdollisuudet ja rajoitteet.

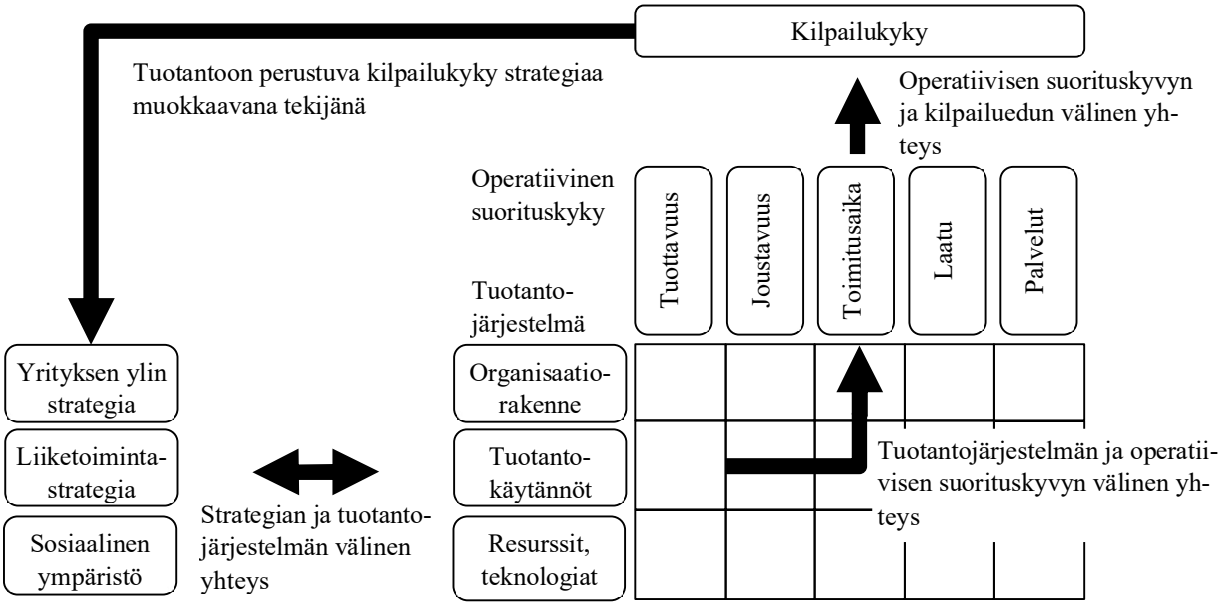
7.2 Virtuaalisen käyttöönoton skaalautuminen ja haasteet

Usein jokaiselle suunnitteluosastolle on määritelty omat työnkuvat ja tavoitteet. Esimerkiksi mekaniikkasuunnittelijoille voidaan määritellä tavoitteeksi valmistuskuvien piirtäminen ja osasto on vuosien mittaan saanut oman työnkulkunsa sujuvaksi. Usein osastolla on oma budjetti, jossa tulee pysyä projektitoimituksissa. Mekaniikkasuunnittelijoiden työt loppuvat aikaisessa vaiheessa projektitoimitusta, kun muut suunnitteluosastot aloittavat työt. Sähkö- ja automaatiosuunnittelijat tekevät tiiviimmin työtä keskenään, sillä sähkösuunnittelijoiden valitsemat komponentit vaikuttavat automaatio-ohjelman kirjoittamiseen. Toisaalta myös mekaaniset ratkaisut vaikuttavat automaatio-ohjelmaan, mutta nämä selviävät yleensä vasta tehdastestissä. Turvasuunnittelija tekee omat suunnitelmat turvan näkökulmasta. Voidaan todeta, että jokainen suunnitteluosasto keskittyy omaan suoritukseensa annetuissa raameissa, omien tavoitteidensa mukaisesti ja kommunikoi muiden suunnittelijoiden kanssa tarpeen vaatiessa.

Virtuaalinen käyttöönotto koskettaa useampaa eri suunnitteluosastoa. Raute Oyj:n tapauksessa mukana olivat mekaniikka-, turva-, sähkö- ja automaatiosuunnittelijat. Mikäli virtuaalinen käyttöönotto halutaan laajentaa käyttöön Raute Oyj:n toiminnassa, tulee palveluna ostetut resurssit jakaa organisaatiolle. Yksittäinen suunnittelija ei välttämättä ymmärrä, miksi hänen työnkuvaansa lisätään uusia työvaiheita. Jos esimerkiksi mekaniikkasuunnittelijan tulee tehdä valmistuskuvien

lisäksi mekaniikan simulointi, voidaan se kokea ylimääräisenä työnä, mikä hidastaa tavoitteiden saavuttamista. Työmäärä kasvaa mekaniikkasuunnittelussa, jolloin budjetteja tulee nostaa projektitoimituksille. Toimenpide voi olla ristiriidassa aikaisempien tavoitteiden kanssa, jossa osasto pyrkii vähentämään omaa työmääränsä. Sama koskee sähkö- ja automaatiosuunnittelijoita, mikäli heille annetaan ohjelmoinnin lisäksi toimilaitteiden ja prosessin simulointi sekä niiden liittäminen osaksi mekaniikan simulointia.

Toteutusta tulisi katsoa riittävän etäältä kokonaisuuden kannalta. Kuten Raute Oyj:n tapaustutkimus osoitti, pystyttiin projektitoimitukselle varatut suunnittelu ja käyttöönottotunnit alittamaan virtuaalisen käyttöönoton avulla. Kun virtuaalinen käyttöönotto otetaan osaksi yrityksen toimintaa, voi osalla suunnitteluosastoja työmäärä kasvaa, mutta kokonaisuutena toiminta tehostuu. Mikäli muutos halutaan saada aikaiseksi yrityksessä, tulee sen lähteä liikkeelle yrityksen johdosta ja strategiasta. Heikkilä ja Ketokivi (2013) ovat määritelleet tuotannon strategisen johtamisen mallin, joka kuvaa strategian ja suorituskyvyn yhteyttä tuotantojärjestelmään. Sen avulla voidaan tarkastella, onko tuotantojärjestelmä yhdenmukainen operatiivisten päämäärien ja liiketoiminnan kanssa, miten voi parantaa operatiivista suorituskykyä ja onko kilpailukyvyllä ja operatiivisella suorituskyvyllä yhteyttä. Malli on esitetty kuvassa 24. Tuotannolla tarkoitetaan tässä yhteydessä kaikkia yrityksen sisällä ja yritysten välillä tapahtuvia suoraan arvoa lisääviä operaatioita.



Kuva 23: Tuotannon strategisen johtamisen malli. Mukailtu (Heikkilä et al., 2013)

Hankkimalla virtuaalisen käyttöönoton ympäristön palveluna osaksi projektitoimitusta Raute Oyj lisäsi tuotantojärjestelmään resursseja ja teknologiaa, jotka mahdollistivat virtuaalisen käyttöönoton. Kuten aikaisemmin todettiin virtuaalinen käyttöönotto lisäsi operatiiviseen suorituskykyyn joustavuutta, varmisti toimitusaikaa ja paransi laatua. Näiden avulla Raute Oyj luo kilpailukykyä projektitoimituksiin. Kuvasta 24 selviää, kuinka kilpailukyky ja suorituskyky muokkaavat yrityksen strategiaa. Mikäli Raute Oyj tunnistaa virtuaalisen käyttöönoton parantavan yrityksen operatiivista suorituskykyä ja kilpailukykyä, on kannattavaa tutkia miten teknologiaa voi hyödyntää muilla liiketoiminta-alueilla. Esimerkiksi huoltoliiketoiminnan palveluiden parantaminen tai uusien kehittäminen perustuen tuotantolinjan virtuaalisen käyttöönoton ympäristöön. Mikäli projektitoimituksiin lisätään vain uusi teknologia, tässä tapauksessa virtuaalinen käyttöönotto, osaksi tuotantojärjestelmää, ei se skaalaudu palvelemaan operatiivista suorituskykyä, jos organisaatiorakenne, suunnittelu- ja tuotantokäytännöt jätetään ennalleen. Jokainen suunnitteluosasto jatkaa oman työnsä osaoptimointia. Kuten VanDerHorn et al. (2021) totesivat, tulee yrityksen kulttuuria ja toimintatapoja muuttaa, jotta virtuaalinen käyttöönotto saadaan skaalattua osaksi yrityksen toimintaa. Raute Oyj:n johdon tulee tunnistaa kilpailukyvyn kannalta tärkeät suorituskykyä parantavat tekijät ja luoda näiden käyttöönottamiselle soveltuva strategia. Jalkauttamalla se osaksi tuotantojärjestelmää saadaan organisaatiorakenne ja tuotantokäytännöt tukemaan uuden teknologian käyttöönottoa.

Virtuaalisen käyttöönoton ympäristön rakentamisen ja ylläpidon voi jalkauttaa osaksi jo olemassa olevien suunnittelijoiden työtä. Hyvä puoli järjestelyssä on, että suunnittelijat tuntevat laitteen, jolle rakentavat simulointimallit, eikä prosessissa ole ylimääräistä tiedonsiirtoa. Haittapuoli on, että usean eri suunnittelijan tulee opetella uusien työkalujen käyttö ja toimintatavat. Toinen vaihtoehto olisi perustaa Raute Oyj:n sisälle oma yksikkö, joka toteuttaa tarpeen mukaan virtuaalisen käyttöönoton ympäristön projektitoimituksille, tuotekehitykseen tai huoltoliiketoiminalle. Näin toimimalla saataisiin keskitettyä simulointiosaaminen pienemmälle joukolle, mikä mahdollistaa suunnittelijoiden keskittymisen omaan osaamisalueeseensa. Kolmantena vaihtoehtona on hankkia virtuaalisen käyttöönoton ympäristö palveluna.

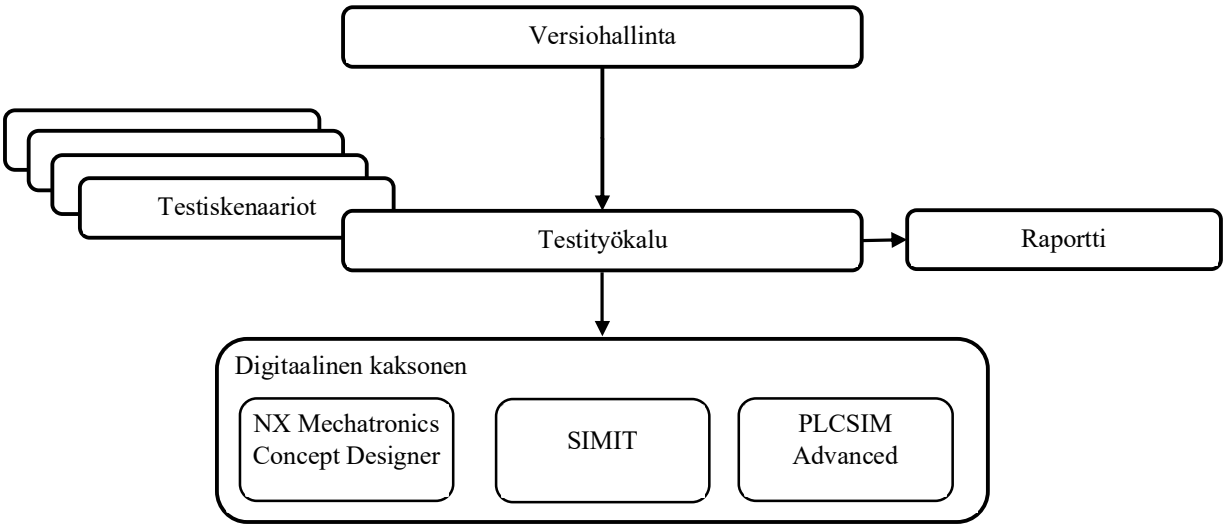
Tapaustutkimuksessa rakennettiin virtuaalisen käyttöönoton ympäristö kokonaan alusta. Työn lopputuloksena Raute Oyj:lle syntyi valmiita simulointimalleja esimerkiksi toimilaitteista, joita voidaan käyttää pohjana seuraavissa virtuaalisen käyttöönoton hankkeissa. Skaalaamisen yhtenä edellytyksenä on standardoida virtuaalisessa käyttöönotossa käytettävät simulointikomponentit. Mekaniikkasuunnittelussa pyritään hyödyntämään mahdollisimman paljon standardiratkaisuja, esimerkiksi kuljettimien osalta. Mikäli mekaaninen rakenne on standardoitu, voidaan sille rakentaa vastaava simulointimalli NX MCD-työkaluun. Mikäli mekaniikan kokoa, esimerkiksi kuljettimen pituutta muutetaan, saadaan muutos tapahtumaan myös NX MCD-simulointimalliin automaattisesti. Tällöin tiedonsiirtona suositellaan käyttämään JT-tiedostotyyppiä, joka sisältää tarvittavat tiedot toiminnallisuuden toteutukseen. JT-tiedostot tulisi tallentaa keskitetysti PLM järjestelmään, josta eri työkalut voivat hakea muuttuneet tiedostot.

Mekaniikan simulointityötä voi nopeuttaa suunnittelemalla 3D-mallin kokoonpanon siihen soveltuvaksi. Ryhmittelemällä liikuteltavat osakokonaisuudet yhdeksi kokoonpanoksi, pystytään NX MCD-työkalussa valitsemaan kokoonpanot puurakenteesta. Jos tätä ryhmittelyä ei ole tehty, tulee kokonaisuus valita graafisesta näkymästä yksitellen tai maalaamalla hiirellä haluttu kokonaisuus. Simulointiominaisuudet on mahdollista kopioida kokoonpanossa. Jos kuljettimella on esimerkiksi viisi samanlaista induktiivista anturia, riittää, että käy määrittelemässä yhdelle anturille ominaisuudet alikokoonpanossa. Palattaessa pääkokoonpanoon, anturin ominaisuudet kopioituvat automaattisesti lopuille antureista.

SIMIT-mallin rakentaminen tulee automatisoida hyödyntämällä standardoituja mallipohjia, joiden avulla simulointimalli luodaan automaattisesti Excel-työkalulla tai käytetään Siemensin tarjoamaa

SMG-työkalua. Toimintatavalla saadaan vähennettyä työmäärää virtuaalisen käyttöönoton ympäristön pystyttämisen osalta. Myös SIMIT-mallit tulee tallentaa keskitetysti PLM-järjestelmään, joka helpottaa mallien käyttöä, ylläpitoa ja versiointia.

Tulevaisuuden kehityssuuntana on automatisoida ohjelmakoodin testaus yhdessä mekaniikan kanssa. Kuvassa 25 on esitetty konsepti automaattisen testauksen arkkitehtuurista.



Kuva 24: Automaattisen testauksen konsepti

Osa suunnittelijan toteuttamasta testauksesta ulkoistetaan automaattiselle testaustyökalulle. Perustana on riittävä standardointi ja sopivien kokonaisuuksien rajaus. Automaattinen testaus sopii parhaiten pitkälle standardoituihin ratkaisuihin, joihin tehdään parannuksia. Testauksen avulla on tehokasta todeta toimivatko muutokset kaikissa tuotantokoneen tilanteissa ja skenaarioissa.

7.3 Tutkimustulokset suhteessa aiempiin tutkimuksiin

Tutkimuksessa yhdistettiin aikaisempien tutkimusten tuloksia virtuaalisesta käyttöönotosta. Taloudellisen hyödyn mittaamisen osalta hyödynnettiin Reinhart et al. (2007) ja Shahim et al. (2016) näkemyksiä virtuaalisen käyttöönoton hyödyistä verrattuna työkuormaan ja otettiin mittaamisessa käyttöön sekä määrällisiä, että laadullisia mittareita. Suunnitteluprosessin toteutuksessa yhdistettiin Ko et al. (2013), Vermaark et al. (2017) ja Oppelt et al. (2014) näkemyksiä. Virtuaalisen käyttöönoton suunnittelu toteutettiin rinnakkain Raute Oyj:n suunnitteluprosessin kanssa ja toteutus tehtiin SiL-ratkaisuna valmistuksen kanssa rinnakkain. Aikaisempiin tutkimuksiin verrattuna

eroavaisuuksia löytyy simuloinnin laajuuden osalta ja virtuaalista käyttöönottoa tutkittiin projektitoimituksen tehostamisen näkökulmasta.

Yhteenvetona voidaan todeta tutkimuksen tarjoavan lisätietoa virtuaalisen käyttöönoton mahdollisuuksista projektitoimituksen ja suunnittelun tehostamisessa. Tutkimus vahvistaa lisäksi aikaisempien tutkimusten tuloksia virtuaalisen käyttöönoton hyödyistä ja vaikutuksista suunnitteluprosessiin.

7.4 Tutkimuksen rajoitteet

Kirjallisuuskatsauksen osalta löytyi hyvin tutkimusmateriaalia digitaalisesta kaksosesta, virtuaalisesta käyttöönotosta ja projektitoimituksista. Aikaisempia tutkimuksia ei löytynyt virtuaalisen käyttöönoton vaikutuksista projektitoimitukseen, jolloin tämän tutkimuksen tuloksia projektitoimituksen tehostamisesta ei voi verrata muihin tutkimuksiin. Tutkimuksen tulokset tulisi vahvistaa toistamalla tutkimus seuraavassa projektitoimituksessa.

Haastatteluiden toteutuksessa hyödynnettiin teemahaastattelua. Haastatteluilla kartoitettiin Raute Oyj:n projektitoimituksen haasteita yleisellä tasolla. Haastatteluiden lopputuloksena saatiin yleisnäkemys Raute Oyj:n haasteista projektitoimituksissa, joista osa kyettiin ratkaisemaan virtuaalisen käyttöönoton avulla. Tuloksia läpikäydessä on kuitenkin hyvä huomioida mahdollisuus siihen että, haastattelija voi huomaamattaan johdatella aihetta teeman kannalta edulliseen suuntaa. Varsinkin, jos haastattelija pyrkii kysymyksillä vahvistamaan omaa näkemystäänsä sopivasta ratkaisusta.

Tuotantolinjan digitaalisen kaksosen osalta toteutus jäi digitaaliseksi prototyypiksi Grieves et al. (2017) määritelmän mukaan. Digitaalista prototyyppiä hyödynnettiin, suunnittelussa ja virtuaalisessa käyttöönotossa ennen fyysisen laitteen valmistamista, mutta digitaalisen prototyypin ja fyysisen laitteen välille ei muodostettu tiedonsiirtoa, jolloin määritelmien mukaan tuotantolinjan digitaalista mallia ei voi kutsua digitaaliseksi kaksoseksi. Tulevaisuudessa digitaalinen prototyyppi voidaan täydentää digitaaliseksi kaksoseksi, kun sen ja fyysisen instanssin välille muodostetaan yhteys.

Projektit ovat aina erilaisia, joten tämän tutkimuksen tulokset pätevät vain tutkimuksen kohteena olevaan projektitoimitukseen. Tuloksia arvioidessa tulee huomioida, etteivät ne ole suoraan

kopioitavissa muihin projekteihin, mutta ovat kuitenkin suuntaa antavia. Tuloksia voidaan käyttää, kun arvioidaan virtuaalisen käyttöönoton vaikutuksia ja hyötyjä projektitoimituksissa.

7.5 Jatkotutkimusalueet

Tutkimuksessa keskityttiin yhden tuotantolinjan virtuaaliseen käyttöönottoon. Jatkotutkimuskeksi ehdotetaan selvittämään, kuinka virtuaalisen käyttöönoton ympäristö saadaan osaksi Raute Oyj:n PLM-järjestelmää ja miten automatisoida tiedonsiirto eri työkalujen välillä sekä toteuttaa tarvittavat suunnitteluohjeet tukemaan virtuaalista käyttöönottoa. Jatkotutkimuksessa tulisi lisäksi selvittää, kuinka virtuaalinen käyttöönotto vaikuttaa Raute Oyj:n projektinhallintaan. Viimeisenä aiheena on virtuaalisen käyttöönoton vastuiden määrittely: perustetaanko yrityksen sisälle oma virtuaalisen käyttöönoton yksikkö, koulutetaanko suunnittelijat käyttämään työkaluja vai ostetaanko virtuaalisen käyttöönoton ympäristö palveluna tarpeen mukaan?

Digitaalisen kaksosen osalta jatkotutkimuksena suositellaan tutkimuksessa syntyneen digitaalisen prototyypin täydentämistä digitaaliseksi kaksoseksi ja sen hyödyntämistä osana suunnittelua, projektitoimituksia ja huoltoliiketoimintaa.

Siemens Osakeyhtiölle ehdotetaan jatkotutkimukseksi virtuaalisen käyttöönoton ja digitaalisen kaksosen hyödyntämisestä asiakkailla esimerkiksi operaattorikoulutuksessa ja data-analytiikassa.

Lähteet

Ahrens, M. & Richter, C. & Hehenberger, P. & Reinhart, G. 2018. Novel approach to establish model-based development and virtual comissioning in practice. London: Springer London. 741–754 s. Engineering with computers vol.35.

Auinger, F. & Vorderwinkler, M. & Buchtela, G. 1999. Interface Driven Domain-Independent Modeling Architecture for 'Soft-Commissioning' and 'Reality in the Loop. ACM. 798–805 s. Proceedings of the 31st Conference on Winter Simulation, vol. 1.

Backlund, F. & Sundqvist, E. 2018. Continuous improvement: challenges for the project-based organization. Emerald Publishing Limited. 1306-1320 s. The International journal of quality & reliability management. vol.35.

Boschert, S. & Rosen, R. 2016. Digital twin – the simulation aspect. Switzerland: Springer, Cham. 59–74 s.

Corallo, A. & Vecchio, V. & Lezzi, M. & Morciano, P. 2021. Shop Floor Digital Twin in Smart Manufacturing: A Systematic Literature Review. Basel: MDPI AG. 12987 s. Sustainability vol.13.

Creswell, J. W. 2014. Research design : qualitative, quantitative, and mixed methods approaches . 4th ed., international student edition. Los Angeles, Calif: Sage. 273 s. ISBN : 978-1-4522-7460-7

Eguti, C. C. A. & Trabasso, L. G. 2018. The virtual commissioning technology applied in the design process of a flexible automation system. Berlin: Springer Berlin Heidelberg. 1–12 s. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering vol.49.

Eigner, M. & Detzner, A. & Schmidt, P. & Tharma, R. 2021. Holistic definition of the digital twin. Inderscience Publishers. 343–357 s. International journal of product lifecycle management vol.13.

Glaessgen, E.H. & Stargel, D.S. 2012. The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force Vehicles. Honolulu: ARC. 397-402 s.

Grieves, M. & Vickers, J. 2017. 'Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. Springe, Cham. 85–113 .s

Heikkilä, J. & Ketokivi, M. 2013. Tuotanto murroksessa: strategisen johtamisen uusi haaste . 3. p. Helsinki: Talentum. 272 s. ISBN : 978-952-14-1519-7

Hirsjärvi, S. & Hurme, H. 2015. Tutkimushaastattelu: Teemahaastattelun teoria ja käytäntö. Helsinki, Gaudeamus Helsinki University Press. 213 s. ISBN : 978-952-495-886-8

Hoffmann, P. & Schumann, R. & Maksoud, TMA. & Premier, GC. 2010. Virtual commissioning of manufacturing systems – A review and new approaches for simplification. Kuala Lumpur, Malaysia: In Proceedings of the 24th European Conference on Modeling and Simulation. 407-411 s.

Kettunen, S. 2003. Onnistu Projektissa. Juva: WS Bookwell Oy. 184 s. ISBN 951-0-28216-2

Ko, M. & Ahn, E. & Park S. 2013. A concurrent design methodology of a production system for virtual commissioning. London: SAGE Publications. 129–140 s. Concurrent engineering, research and applications vol.21.

Kritzinger, W. & Karner, M. & Traar, G. & Henjes, J. & Sihn, W. 2018. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine. 1016–1022 s.

Liu, Z., Diedrich, C. & Suchold, N. 2012. Virtual Commissioning of Automated Systems. IntechOpen Access Publisher. 131-148 s.

Liu, M. & Fang, S. & Dong, H. & Xu, C. 2021. Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. Elsevier LTD. 346–361 s. Journal of manufacturing systems vol.58.

Makris, S. & Michalos, G. & Chryssolouris, G. & Kimura, F. 2012. Virtual Commissioning of an Assembly Cell with Cooperating Robots. Hindawi Publishing Corporation. 1-11 s. Advances in decision sciences vol.2012.

Martins, A. & Costelha, H. & Neves, C. 2020. Supporting the Design, Commissioning and Supervision of Smart Factory Components through their Digital Twin. Portugal: IEEE. 114-119 s. International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions.

Mykoniatis, K. & Harris, G. A. 2021. A digital twin emulator of a modular production system using a data-driven hybrid modeling and simulation approach. New York: Springer US. 1899–1911 s. Journal of intelligent manufacturing vol.32.

Mäntyneva, M. 2016. Hallittu projekti: jäntevästä suunnittelusta menestykselliseen toteutukseen. 1. painos. Helsinki: Kauppakamari. 156 s. ISBN 978-952-246-401-9

Neugebauer, R. & Schob, U. (2011) Reducing the model generation effort for the virtual commissioning of control programs. Berlin: Springer-Verlag, 539–547 s. Production engineering vol.5.

Oppelt, M & Urbas, L. 2014 Integrated virtual commissioning an essential activity in the automation engineering process: From virtual commissioning to simulation supported engineering. Dallas: IEEE. 2564-2570 s.

Patzak, G. & Rattay, G. 2012. Project Management: Guideline for the management of projects, project portfolios, programs and project-oriented companies. 1. Aufl. Wien: Linde Verlag Wien Gesellschaft m.b.H. 507 s. ISBN 978-3-7143-0224-0

Pelin, R. 2009. Projektihallinnan käsikirja. 6. painos. Jyväskylä: Projektijohtaminen Oy Risto Pelin. 413 s. ISBN 978-952-67201-0-4

Raute. (2020). Vuosikertomus 2020. Raute. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 30.10.2021): https://www.raute.fi/vuosikertomus-2020/

Raute. (2021a). Rauten ratkaisut. Raute. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 30.10.2021): https://www.raute.fi/sijoittajat/raute-sijoituskohteena/rauten-ratkaisut/

Raute. (2021b). Vaneer Patching line R7. Verkkoaineisto. Saatavissa (viitattu 3.12.2021): https://www.raute.com/knowledge/veneer-patching-line-r7/

Reinhart, G. & Wünsch, G. 2007. Economic application of virtual commissioning to mechatronic production systems. Berlin, Germany: Springer-Verlag. 371–379 s. Production engineering vol.1.

Rubin, H. & Rubin, I. 2005. Qualitative Interviewing (2nd ed.): The Art of Hearing Data. 2nd ed. Thousand Oaks, CA: SAGE Publications Inc. 290 s. ISBN: 0761920757

Salierno, G. Leonardi, L. & Cabri, G. 2021. The Future of Factories: Different Trends. Applied sciences. vol. 11, no. 21, 9980 s.

Scheifele, C. & Verl, A. & Riedel, O. 2018. Real-time co-simulation for the virtual commissioning of production systems. Italy: Procedia CIRP. 397-402 s.

Shahim, N. & Moller, C. 2016 Economic justification of Virtual Commissioning in automation industry. IEE. 2430–2441 s. Winter Simulation Conference.

Siemens. (2012). Controlling distributed I/Os and drives from two controllers via PROFINET. Verkkoaineisto. Saatavissa (viitattu 12.12.2021) https://cache.industry.siemens.com/dl/files/311/50207311/att_11113/v1/50207311_application_example_shared_device_v1_2_en.pdf

Siemens. (2014). SINAMICS S120/s159 List Manual. Verkkoaineisto. Saatavissa (viitattu 12.12.2021) https://cache.industry.siemens.com/dl/files/911/99682911/att_863921/v1/S120_S150_List_Manual_LH1_0414_eng.pdf

Siemens. (2020a). SIMATIC Machine Simulator V3.0. Verkkoaineisto. Saatavissa (viitattu 5.12.2021) https://support.industry.siemens.com/cs/document/109758943/

Siemens. (2020b). Mechatronics Concept Designer. Verkkoaineisto. Saatavissa (viitattu 12.12.2021) https://docs.sw.siemens.com/en-US/product/209349590/doc/PL20200507135732916.mechatronics/html/id1101745

Siemens. (2021). Digital Industries. Siemens. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 30.10.2021): https://new.siemens.com/fi/fi/yhtio/siemens-suomessa-ja-baltiassa/liiketoiminta-alueet/digital-industries.html

Siemens ja Afry. (2020). Value creatin with plant modeling and simulation. Verkkoaineisto. Saatavissa (viitattu 4.12.2021) https://afry.com/sites/default/files/2020-11/siemens_afry_-_value_creation_with_plant_modelling_and_simulation.pdf

Singh, M. & Fuenmayor, E. & Hinchy,E. & Qiao, Y. & Myrray, N. 2021. Digital Twin: Origin to Future. Basel: MDPI AG. 36– s. Applied System Innovation vol.4.

Tao, F. & Cheng J. & Qi, Q. & Zhang, M. & Zhang, H. & Sui, F. 2017. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. London: Springer. 3563–3576 s. International journal of advanced manufacturing technology vol.94.

Tao, F. & Sui, F. & Liu, A. & Qinglin, Q. & Zhang, M. & Song, B. & Guo, Z. & Lu, S. & Nee, A. 2018. Digital twin-driven product design framework. UK: Taylor & Francis. 3935–3953 s. International journal of production research vol.57.

Tao, F. & Qi, Q. & Wang, L. & Nee, A. 2019. Digital twins and cyber–physical systems toward smart manufacturing and industry 4.0: Correlation and comparison. Elsevier LTD. 653–661 s. Engineering vol.5.

VanDerHorn, E. & Mahadevan, S. 2021. Digital Twin: Generalization, characterization and implementation. Elsevier LTD. 113524 s. Decision Support Systems vol.145.

Young, T. L. 2010. Successful project management. 3rd ed. London: Kogan Page. 210 s. ISBN : 9780749459178

Liite 1: Haastattelurunko

- *Esittelyt - parilla lauseella ketkä ovat linjojen päässä*
- *Tämä keskustelu on osa Siemensin ja Rauten välistä projektia, joka tähtää käyttöönoton tehostamiseen Smart Patching Line -toimitusprojektissa.*
    - *Haastattelemme eri tahoja Rautelta, jotta ymmärtäisimme mahdollisimman kattavasti toimitusprojektin vaiheet, niiden tekijät ja vaiheisiin liittyvät mahdolliset haasteet.*
    - *Keskusteluiden jälkeen summaamme havainnot ja toimenpide-ehdotukset raporttiin ja käymme sen yhdessä läpi.*
- *Minä tulen vetämään tätä haastattelua ja kollegani tekevät muistiinpanoja sekä esittävät tarkentavia kysymyksiä.*
- *Tulemme hyödyntämään näitä keskusteluita ratkaisujen löytämiseen, mutta yhteenkään keskusteluun ei tulla viittaamaan nimellä.*
    - *Onko sinulle ok, jos nauhoitamme keskustelun muistiinpanojen tarkentamista varten? Nauhoitus poistetaan raportoinnin jälkeen.*
- *Ei ole oikeita tai vääriä vastauksia, me olemme nyt vain kiinnostuneita sinun mielipiteestäsi.*
- *Pidetään juttelu mahdollisimman rentona. Tauko voidaan pitää missä vaiheessa tahansa. Keskustelu tulee kestämään noin tunnin.*

- Miten kuvailisit omaa rooliasi paikkalinjan -toimitusprojektissa?
- Oletko ollut vastaavissa projekteissa aikaisemmin mukana samassa roolissa?
    - Mitkä olivat tärkeimmät oppisi siitä projektista?
- Kuinka tämän projektin onnistumista mitataan?
- Asteikolla 1-5, kuinka luottavainen olet siihen, että tässä projektissa päästään määriteltyihin tavoitteisiin?
    - Miksi?

Käydään läpi sinun roolisi tässä projektissa vaihe vaiheelta

- Missä vaiheessa itse tulit projektiin mukaan? Miten asiakasvaatimukset vaikuttavat sinun toimintaasi? Onko 4-tasoisia linjaa toimitettu aiemmin? Mistä tiedät, että 4-tasoinen linja tuottaa tarvittavan kapasiteetin?
- Miksi siinä vaiheessa?
- Onko sinulla kaikki tarvittavat lähtötiedot? Mistä saat ne?
- Mikä on seuraava vaihe?

- Miten tekemäsi muutokset vaikuttavat automaatio- ja sähkösuunnitteluun?
- Onko tullut mekaniikkaan vaikuttavia asiakasvaatimuksia käyttöönotossa?
- Onko omassa työssäsi jotain arvoa tuottamatonta? Jotain mihin kuluu turhan paljon aikaa?
- Jos sinulla olisi kaikki valta ja raha, mitä tulisit tekemään tässä projektissa eri tavalla?

Kiitos ajasta ja hyvistä vastauksista. Voimmeko palata vielä asiaan jälkeenpäin, mikäli haluamme tarkentaa jotain vastausta?

Liite 2 Projektitoimituksen haasteet ja virtuaalisen käyttöönoton vaikutusmahdollisuudet

Sopimus / Aloituspalaveri			VK vaikutus
Teema	ID	Haaste	
Asiakkaan odotukset	1	Asiakas ei osaa kertoa mitä haluaa, kun uusi tuote kyseessä	x
	1	Paikan laatu	
	1	Asiakas pitää saada ymmärtämään miten Raute toimii	
	1	Asiakastarpeiden ymmärtäminen	x
Suunnittelu	3	Automaatio ei ole mukana myyntivaiheessa	
	3	Tuotekulun ymmärtäminen	x
Suunnittelun valmistuminen			
Teema	ID	Haaste	
Asiakkaan odotukset	1	Asiakkaat eivät ymmärrä turvaratkaisuiden sähköteknisistä kuvista, he ymmärtävät vain minkä näkevät	
Suunnittelu	3	Mekaniikkasuunnittelu vaikuttaa turvasuunnitteluun	
	3	Turvasuunnitelmaan tulee muutoksia (kuljettimet erilaisia)	
	3	Edellisen automaatioprojektin muokkaus nykyiseen sopivaksi	x
	3	Mekaniikan voisi suunnitella fiksummin automaation näkökulmasta	x
	3	Prosessikuvauksen käytön parantaminen	
Tuotetiedon hallinta	5	Manuaalista työtä tiedon haussa	
	5	Dokumentoinnin puute, hiljainen tieto jää ihmisille	
	5	Tiedon päivittyminen suunnittelun edetessä ja muutosten yhteydessä	x
Tehdastestaus			
Teema	ID	Haaste	
Kiire	2	Koeajoon kuuluu kokoonpano. Kokoonpanon aloitus myöhästyy. Esim. osat myöhässä	x
	2	Koeajossa liian vähän aikaa	x
	2	Myöhästymiset syövät koekäyttöaikaa	
	2	Viiveet linjan kasauksessa	
	2	Testataan kiireellä uusia muutoksia	x
Suunnittelu	3	Uusien laitteita saatetaan joutua muokkaamaan	x
	3	Automaation läpinäkyvyys. Vaikuttaa siltä, että tehdastestiin tullaan keskeneräisillä ohjelmilla	x
Testaus	6	Ei testata turvaohjelmaa, vain noin 5–10 % laitteista testataan tehdastestissä	x
	6	Koneet lähtevät liian keskeneräisinä maailmalle	x
	6	Kyseisen projektin ohjelmakoodia ei ole vielä testattu muissa projekteissa	

	6	Pinkan syöttö ja purku puuttuvat koeajosta	x
	6	Pinkka puuttuu materiaalivirrasta. Manuaalista työtä syntyy, kun siirretään viiluja	x
	6	Alku- ja loppupää eivät ole mukana koekäytössä	x
	6	Uusia laitteita ei testata ennen koekäyttöä	x
Henkilöstö	7	Ei sitouteta Nastolan koekäyttöä henkilöille	
Asennuksen valmistuminen			
Teema	ID	Haaste	
Ulkoiset tekijät	4	Kytkentävirheet	
	4	Toimituksesta puuttuu jotain, unohdettu esimerkiksi pakata osa tuotteista	
	4	Alihankkijoiden osaaminen	x
Käyttöönotto			
Teema	ID	Haaste	
Asiakkaan odotukset	1	Asiakkaan silmien edessä korjaaminen aiheuttaa mainehaittaa	x
	1	Ymmärretty väärin asiakkaan odotuksia	x
	1	Laatuvaatimukset lopputuotteelle	
	1	Asiakkaan uudet vaatimukset käyttöönotossa	x
	1	Asiakkaan odotusten täyttyminen	
Kiire	2	Ohjelman korjaukset tehdään kiireessä ja ovat huonolaatuisia	x
	2	Turvapuutosten korjaaminen ja testaaminen hidasta	
	2	Käyttöönotot liian pitkiä	
	2	Toiset projektit, resurssipula	
Suunnittelu	3	Koulutusmateriaali ei ole systemaattista	
	3	Mekaanisia suunnitteluvirheitä	x
	3	Koulutuksen pitäminen, ei ole selkeää tapaa	
	3	Turvan muutokset, esimerkiksi turva-aidan lisääminen	
	3	Suunnitteluvirheet kumuloituvat käyttöönottoon	x
Ulkoiset tekijät	4	Käyttöönottajat menevät liian aikaisin paikalle ja joutuvat odottamaan, että muut asiat valmistuvat	
Testaus	6	Poikkeustilanteiden testaus on vajavaista turvapuolella	x
	6	Turvaohjelmasta löytyy puutteita testauksessa	x
	6	Tuotteen laatuhaasteet, ei toimi linjassa oikein, esim. imukupit eivät saa kiinni	
	6	Pinkan purussa tai syötössä uusia kuljettimia, joista ei ollut tietoa	x
	6	Käyttöönottoon jää puolet ohjelmistovirheistä	x
	6	Käyttöönotossa saadaan suurin osa virheistä kiinni ohjelmakoodista	x
	6	Poikkeustilanteiden hallinta	x
	6	Ohjelmaa ei voida kirjoittaa valmiiksi ennen käyttöönottoa	x
Henkilöstö	7	Ihmisten matkustushalukkuus laskee	x
	7	Käyttöönottajien kokemuksen puute	x
Loppuasiakkaan hyväksyntä			
Teema	ID	Haaste	

Asiakkaan odotukset	1	Asiakkaan viilun heikko laatu	
	1	Paikan laatu	
Testaus	6	Kaikkia tuotteita ei päästä ajamaan tuotantolinjalla	x
Takuu			
Teema	ID	Haaste	
Asiakkaan odotukset	1	Asiakas haluaa lisää kapasiteettia	x
Tuotetiedon hallinta	5	Dokumentaation puute vikatilanteista	
	5	Paikkalinjalle ei ole valmista tarkistuspohjaa (referenssimittaukset)	
Testaus	6	Ohjelmien testaus haastavaa	x
	6	Ohjelmointivirheet kuormittavat useita kuukausia käyttöönoton jälkeen	x
	6	Ohjelmavirheitä jää käyttöönotosta	x
	6	Turvaratkaisuun jää usein korjattavaa	
	6	Käyttöönoton jälkeen huomattu puutteita tuotantoa ajettaessa	x
Henkilöstö	7	2–5 vuotta kestää koulutus huoltoliiketoimintaan	x