

VTT Technical Research Centre of Finland

Toimitusketjun digitaalinen kaksonen

Pulkkinen, Antti; Leino, Simo-Pekka; Kokkonen, Petteri; Rantanen, Olli; Hemming, Björn; Siren, Mika

Published: 14/04/2021

Document Version
Publisher's final version

[Link to publication](#)

Please cite the original version:

Pulkkinen, A., Leino, S-P., Kokkonen, P., Rantanen, O., Hemming, B., & Siren, M. (2021). *Toimitusketjun digitaalinen kaksonen*. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Tutkimusraportti No. VTT-R-00346-21

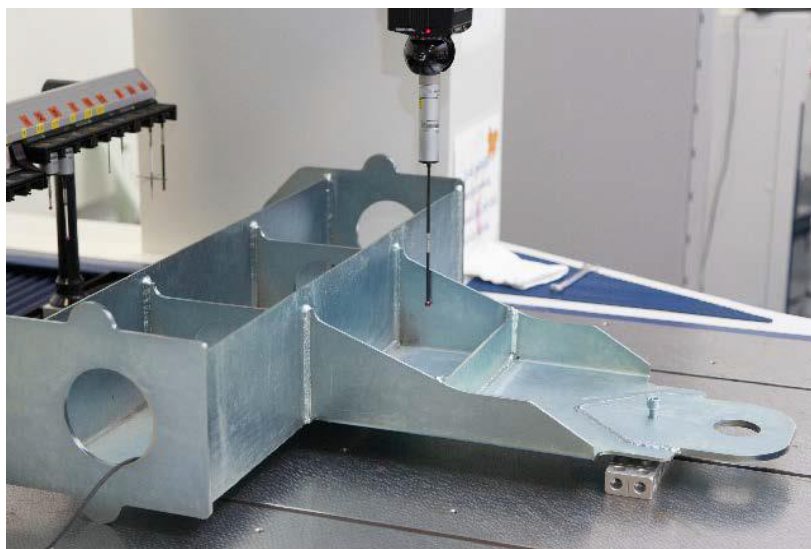


VTT
<http://www.vtt.fi>
P.O. box 1000FI-02044 VTT
Finland

By using VTT's Research Information Portal you are bound by the following Terms & Conditions.

I have read and I understand the following statement:

This document is protected by copyright and other intellectual property rights, and duplication or sale of all or part of any of this document is not permitted, except duplication for research use or educational purposes in electronic or print form. You must obtain permission for any other use. Electronic or print copies may not be offered for sale.



Toimitusketjun digitaalinen kaksonen

Kirjoittajat: Antti Pulkkinen, Simo-Pekka Leino, Petteri Kokkonen, Olli Rantanen, Björn Hemming, Mika Sirén

Luottamuksellisuus: Julkinen

Raportin nimi Toimitusketjun digitaalinen kaksonen		
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot Business Finland		Asiakkaan viite
Projektin nimi Älykäs valmistus ekosysteemissä - tutkimushanke		Projektin numero/lyhytnimi ÄVE
Raportin laatija(t) Antti Pulkkinen, Simo-Pekka Leino, Petteri Kokkonen, Olli Rantanen, Björn Hemming, Mika Sirén		Sivujen/liitesivujen lukumäärä 28/1
Avainsanat Toimitusketju, digitaalinen kaksonen, systeemidynamiikka		Raportin numero VTT-R-
Tiivistelmä <p>Julkaisun tarkoituksena on raportoida ”ÄVE Älykäs valmistus ekosysteemissä” -projektin WP9 ”Toimitusketjun digitaalinen kaksonen” tuloksia, lisätä sidosryhmien tietoisuutta toimitusketjun digitaalisista kaksosista, prosessimallinnuksesta ja systeemidynamiikasta, sekä pohtia miten digitaalisuutta ja mallipohjaisuutta hyödyntävät järjestelmät pitäisi suunnitella kokonaisvaltaisesti. Toimitusketjujen digitaaliset kaksoset perustuvat lisääntyneeseen vertikaaliseen ja horisontaaliseen datan virtaamiseen.</p> <p>Tutkimusote oli laadullinen ja tutkimusmenetelminä sovellettiin case-tutkimusta, prosessi-, kypsyys- ja systeemidynaamista mallinnusta. Case-tutkimuksessa mallinnettiin ja analysoitiin ÄVE-ekosysteemin toimintaa ja kahta VTT:n projektia. Prosesseja mallintamalla tutkittiin, miten epävarmuus kuljetetaan prosessien läpi ja mistä laatuongelmat ja poikkeamat johtuvat. Systeemidynamiikan avulla mallinnettiin isompaa kuvaa ja laatuun vaikuttavia tekijöitä.</p> <p>Tiedon laatu ja jouheva virtaaminen ovat merkittäviä tekijöitä epävarmuuden vähentämiseen, lopullisen valmistuslaadun parantamiseen ja kokonaiskustannusten vähentämiseen. Mallipohjainen tuotemäärittely ja mallipohjaiset prosessit mahdollistavat periaatteessa tavoitteena olevan tiedon laadun kehittymisen ja sitä kautta välillisesti laadun paranemisen ja kokonaiskustannusten vähenemisen. Digitaalisten kaksosten ja säikeiden voidaan katsoa olevan mallipohjaisuuteen perustuvia välineitä tiedon virtauksen parantamiseen.</p> <p>Digitalisaation odotettua hitaampi edistyminen teollisuudessa johtuu ainakin osittain puutteellisesta kyvystä hahmottaa kokonaiskuvaa ja systeemiä vaikutuksia. Jotta digitalisaatiosta saadaan irti potentiaalinen hyöty, pitää ymmärtää, että se ei tarkoita pelkkää tekniikkaa. Tekniikan ohella pitää todennäköisesti suunnitella ja toteuttaa uusia prosesseja, organisaatioita, kouluttaa ihmisiä, päivittää IT-infrastruktuuria, integraatioita ja tietomalleja, jne. Myös näissä prosessimallinnus ja poikkiteeellinen systeemidynamiikka voivat auttaa.</p>		
Luottamuksellisuus	julkinen	
Tampere 14.4.2021		
Laatijat	Tarkastaja	Hyväksyjä
Antti Pulkkinen, Simo-Pekka Leino, Petteri Kokkonen, Olli Rantanen, Björn Hemming, Mika Sirén	Risto Kuivanen, Manager	Karoliina Salminen, Research Area Vice President
VTT:n yhteystiedot etunimi.sukunimi@vtt.fi , www.vtt.fi		
Jakelu (asiakkaat ja VTT)		
<p style="text-align: center;"><i>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</i></p>		

Alkusanat

Toimitusketjujen digitaalinen kaksonen oli yksi Älykäs Valmistus Ekosysteemissä –hankkeen (ÄVE, 2018-2021) työpaketti, jonka toteutuksesta vastasi VTT ja yhteistyötahoja olivat hankkeeseen osallistuneet yritykset. ÄVE oli yhteisrahoitteinen hanke eli tutkimusta rahoittivat Business Finland ja VTT. Hankkeen johtoryhmässä oli edustajia kaikista osapuolista. Tutkimusta esiteltiin marraskuussa 2020 ÄVE-hankkeen webinaarissa.

Tässä raportissa esitellään tehtyä tutkimusta, sen lähtökohtia, tutkimustapaa ja -menetelmiä sekä tuloksia ja niistä tehtyjä havaintoja. Tutkimuksen keskiössä on valmistavan teollisuuden toiminta eli se, miten yritykset toimivat liiketoimintaekosysteeminä. Työpakettin tutkimus käynnistyi muuta hankekokonaisuutta myöhemmin ja se tehtiin suurelta osin Covid-19-kriisin oloissa, mikä luonnollisesti vaikutti tekemisen tapaan ja osin myös käytössä olleeseen tutkimusmateriaaliin.

Raportin julkaisu osui ajankohtaan, jossa tutkijat ovat tehneet noin vuoden etätöitä. Tutkimuksessa valittiin ja otettiin käyttöön joustavasti uusia aineistoja, menetelmiä ja yhteistyötapoja tilanteen mukaan. Muutosjoustavuus eli resilienssi, jota eri tahoilla on osoitettu, luo toivoa tulosten jalkauttamiseen, liiketoiminnan kestävään kehittämiseen ja uusien innovaatioiden tuottamiseen.

Tutkijat kiittävät tutkimuksen rahoittajia ja yhteistyötahoja.

Tampere 14.4.2021

Tekijät

Sisällysluettelo

Alkusanat	2
Sisällysluettelo	3
1. Johdanto.....	4
1.1 Konseptit ja mallit digitaalisen kaksosen taustalla	4
1.2 Mikä on toimitusketjun digitaalinen kaksonen?	5
1.3 Mallintamisen tarkoitus	7
2. Tavoite ja tutkimusote	9
3. Materiaali	10
3.1 ÄVE-haastattelut.....	10
3.2 Data Unleashed -malli	10
3.3 MetroFade -projekti.....	11
4. Tulokset.....	15
4.1 MetroFade baseline	15
4.2 Laadullinen systeemidynaaminen malli.....	16
4.3 Digitalisaation ja verkostomaisen toiminnan mittaaminen	19
5. Pohdinta	21
5.1 Datan jakaminen ja datan arvo	21
5.2 Toimitusketjun digikaksosen suunnittelu ja simulointi.....	22
5.3 Haasteista mahdollisuuksia	22
6. Johtopäätökset	23
6.1 Havainnot - mitä opittiin?	24
6.2 Toimenpide-ehdotuksia ja jatkotutkimusaiheita.....	25
7. Yhteenvedo	26
Lähdeviitteet.....	27
Liite 1: MetroFade projektin toimitusketjusta laadittu uimaratakaavio.....	29

1. Johdanto

Älykäs valmistus ekosysteemissä -hankkeen tavoitteena oli rakentaa läpinäkyvä, oppiva toimitusketju. Toimitusketjuja ja yrityksiä kokonaisuutena tarkastelevan tutkimuksen fokus oli kannattavuuden johtamisessa ja toimitusketjun digitaalisten kaksosten kehittämisessä. Erityisesti jälkimmäisen kokonaisuuden kantavana periaatteena on ollut toimitusketjun neutraali tarkastelu ja mallintaminen sekä digitalisaatioon liittyvän transformaation kokonaisvaltainen tutkimusote. Tähän tähtäävät myös toimitusketjun digitaaliset kaksoset. Tämän julkaisun tarkoituksena on:

- raportoida ÄVE -projektin työpaketti WP9:n osatuloksia,
- lisätä eri sidosryhmien tietoisuutta tuotannon ja toimitusketjun digitaalisista kaksosista,
- lisätä eri sidosryhmien tietoisuutta prosessimallinnuksesta ja systeemidynamiikasta valmistavan teollisuuden toimitusketjujen ja laatuolosuhteiden kontekstissa,
- pohtia miten digitalisuutta ja mallipohjaisuutta hyödyntävät em. systeemit pitäisi suunnitella kokonaisvaltaisesti,
- pohtia suunnittelututkimuksen merkitystä ja
- pohtia jatkotutkimusaiheita

1.1 Konseptit ja mallit digitaalisen kaksosen taustalla

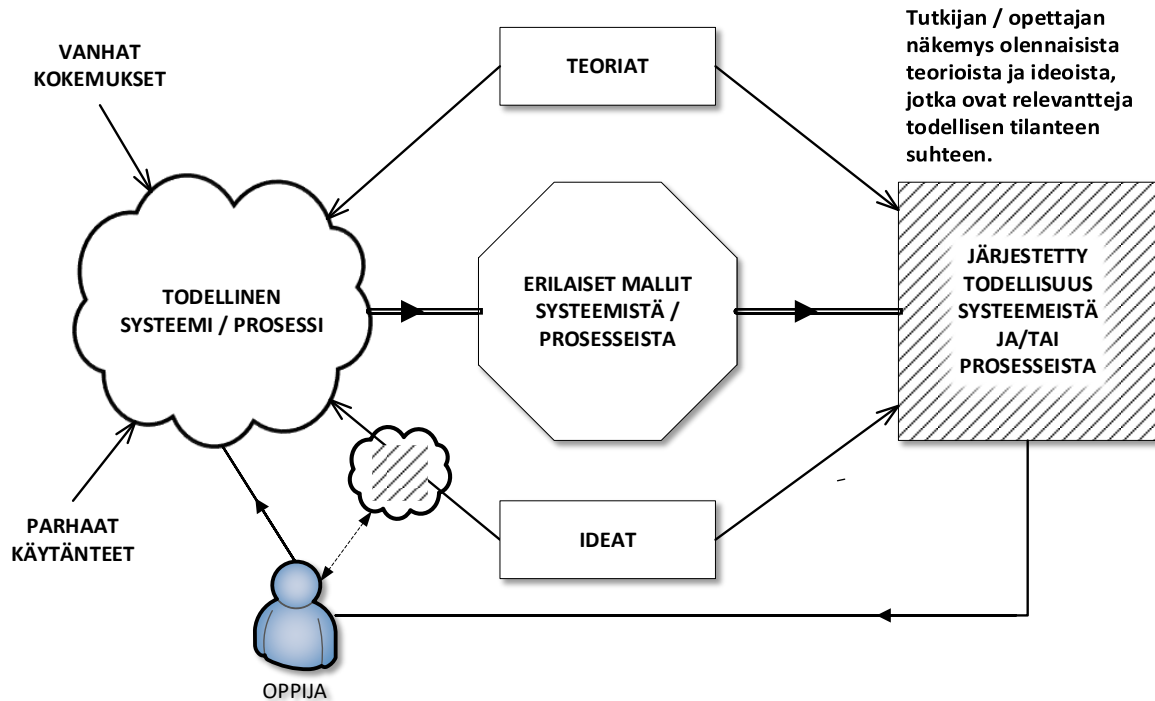
Projektin keskeiseksi teemaksi muodostui digitaalisen kaksosen käsite eli se, mikä itseasiassa toimitusketjun digitaalinen kaksonen on? Tätä tarkastellaan yksityiskohtaisesti myöhemmin, mutta lähtökohtaisesti digitaalisen kaksonen on jatkumo siinä, miten tuotteiden ja prosessien suunnittelussa todellisuutta yhä paremmin vastaavia (digitaalisia) malleja on hyödynnetty.

Mallien rooli tuotantojärjestelmän suunnittelussa on aina ollut merkittävä. Jo 70-luvulla tyypiteltiin erilaisia tuotannosuunnittelun vaihtoehtoja tuotannon ohjauksessa, tehtaan layoutissa, tilausten käsittelyssä ja kuormituksen suunnittelussa sekä määriteltiin vaihtoehtojen mahdollisia kombinaatioita. Tämä perustui ryhmäteknologian teoriaa, joka 80-luvulle tultaessa kehittyi solutuotannoksi. Solutuotannon ohjaamiseen ja simulointiin tehtiin 1990-luvulla erilaisia malleja, kuten CIM-konsepti ja ISA-95 standardi ja myöhemmin CPPS (Cyber Physical Production System) – konsepti, joka yhdistää fyysisen ja virtuaalisen tuotantojärjestelmän.

Tuotannon simuloinnin varhaisimmat tietokoneavusteiset kokeilut tehtiin jo 60-luvulla. Erityisesti tuotteiden suunnittelussa, mutta myös tuotantosolujen suunnittelussa digitaalisten mallien käyttö on arkipäiväistynyt viimeisen 30 vuoden aikana. Esimerkkinä tästä ovat robottien offline ohjelmointiin Suomessa panostanut Delfoi (ent. Tehdasmallit) sekä Visual Components. Molempien yritysten fokus on laajentunut tästä siten, että nykyisin voidaan tuotantosolujen sijaan puhua jo tehtaiden sekä tuotantoprosessien 3D-mallintamisesta ja simuloinnista. Tätä suuntausta voi kutsua ns. alhaalta ylös kehittymiseksi (bottom up).

Toinen lähestymistapa on ollut kytkeä (jo mainitun ryhmäteknologian tapaan) tuotannon suunnittelu tuotteen rakenteisiin. Esimerkiksi Ideaalitehtaan malliⁱ, Manufacturing System Design Decompositionⁱⁱ (MSDD), rinnakkaisten tuoterakenteiden hyödyntäminen reitityksen suunnittelussaⁱⁱⁱ, kokoonpano-ohjeiden kehittäminen tuotemallien perusteella ja modulaarinen Cyber Physical System (CPS)^{iv} perustuvat tuoterakenteiden ja tuotannon prosessien kytkentään. Esimerkkejä tästä suuntauksesta ovat iPPE / SAP (Integrated Product and

Process Engineering) sekä CAD- ja tuotannosuunnittelu- ja simulointijärjestelmien integrointi, esimerkiksi Siemensin ja Dassault'n tapaan. Tätä suuntausta voidaan kutsua horisontaali-integraatioksi, joka ÄVE-projektissa oli erillisessä työpaketissa, ja sitä edusti mallipohjainen tuotemäärittely (Model Based Definition, MBD).



Kuva 1. Teollisen tapauksen (järjestelmä/prosessi) kuvaaminen teorioiden, ideoiden ja kokemusten avulla (mukailtu Andreassenin^v alkuperäisestä mallista)

Yleisesti malli on käyttötarkoituksen mukainen kuvaus todellisuudesta, kun mallintaminen tehdään tarkoitukseen liittyvästä näkökulmasta. Mallintaminen on esimerkiksi tuotesuunnittelijan tapa dokumentoida ja viestiä ajatuksiaan tuotteista – suunnittelijan kieli (ks. Kuva 1). Samaan tapaan tuotannon suunnittelussa ja mallintamisessa mallien tarkoitus on kytkeä kokemuksia, parhaita käytäntöjä, todellista käytäntöä (prosessit ja järjestelmät) malleihin, joiden kehittelyä olemassa olevat teoriat ja ideat ohjaavat ja jäsentävät. Tavoitteena voi olla strukturoitu ja analysoitavissa oleva kuvaus todellisesta tilanteesta tai tavoiteltavan todellisen tilanteen määrittely. Takaisinkytkennällä – kuvan 1. alaosan mukaisesti – opitaan lisää tilanteesta ja määritellään joko lyhyen tähtäimen reagoivia muutoksia tai voidaan muuttaa todellisen tapauksen rakenteita kehitysprojektien kautta.

1.2 Mikä on toimitusketjun digitaalinen kaksonen?

Digitaalisen kaksosen konsepti on jo noin kaksikymmentä vuotta vanha, vaikka sitä ei sillä nimellä aluksi kutsuttukaan^{vi}. Vasta nyt datan keräämiseen, analysointiin, käsittelyyn sekä simulointiin liittyvät teknologiat ovat kehittyneet riittävästi mahdollistamaan käytännön toteutuksia^{vii}.

NASAn määritelmä digitaaliselle kaksoselle vuosikymmenen takaa mainitaan useissa lähteissä yhdeksi ensimmäisistä^{viii}. Digitaalisen kaksosen määritelmä on kuitenkin vielä kehittymässä, eikä vakiintunutta ja yksiselitteistä määritelmää ole sen paremmin käytännön sovelluksien kuin akateemisen kirjallisuuden kohdalla^{ix, x, viii, xi, xii}. Nykyisin käytetään jo eräänlaista digitaalisen kaksosen määritelmäperhettä. Esimerkiksi varioituvista tuotteista puhuttaessa voidaan käyttää termejä digitaalinen master ja siitä eritelty digitaalinen varjo,

mitkä liittyvät varsinaiseen tuoteperheen instanssiin (tuotekonfiguraatio), josta on ylläpidettävä sekä päivittyvää digitaalista kaksosta että todellista tuoteyksilöä^{xiii}.

Digitaalinen kaksonen ei ole pelkästään teknologia, vaan edelleen kehittyvä konsepti^{xiv}, joka voidaan toteuttaa useilla erilaisilla teknologioilla^{xi}. Digitaalinen kaksosiin liittyvä tutkimus on vasta alkutekijöissään^{xii}. Gartnerin mukaan digitaaliset kaksoset ovat 2020-luvun yksi lupaavimpia teknologioita^{xiv}.

Erlaisia digitaalisia kaksosia on lukematon määrä eri tarkoituksiin. Niitä voidaan luokitella mm. tuotteen elinkaaren vaiheiden mukaan esimerkiksi tuotekehitykseen, tuotantoon ja operointiin sekä kunnossapitoon liittyviin kaksosiin. Digitaaliset kaksoset tehostavat tuotannon suunnittelua, data-analytiikkaa ja jäljitettävyyttä^{xv}, parantavat päätöksentekoa^{vii} ja ovat älykkään valmistuksen ja Industry 4.0:n keskiössä^{ix, x, xii, xiv, xvi}.

Digitaalisen kaksosen tarkoituksena on olla linkki kaikkeen fyysiseen kaksoseen liittyvään informaatioon integroiden informaatiota eri lähteistä ja ICT-järjestelmistä^{xi}. Digitaalisten kaksosten avulla voidaan simuloida, ennustaa ja optimoida fyysisiä tuotantojärjestelmiä ja prosesseja^x, parantaa toimitusketjun läpinäkyvyyttä ja vähentää takaisinkytkentöjen kautta värähtelyä^{xv} ja kehittää suunnittelun ja tuotannon välistä rajapintaa^{viii}. Chen & Huang^{xvii} esittävät mallia, jossa yritys kykenisi liittämään toimitusverkostossa jaettuun julkiseen dataan omaa sisäistä dataansa ja digitaalisen kaksosen avulla voisi minimoida tietojen epäsymmetriasta johtuvia päätöksenteko-ongelmia.

Varsin vakiintuneen osamääritelmän mukaan digitaalisilla kaksosilla on kolme fundamentaalista ominaisuutta:

1. Digitaalisella kaksosella pitää olla vastaava fyysinen kaksonen
2. Digitaalisen ja fyysisen kaksosen välillä on kaksisuuntainen informaatiovirta
3. Digitaalisen kaksosen pitää pystyä kuvaamaan muuttuva tilanne

Kohta 1. viittaa siihen, että digitaalinen kaksonen liittyy tiettyyn tuotteen tai järjestelmän instanssiin eli yksilöön. Järjestelmä voi olla esimerkiksi tehdas tai toimitusketju. Tuotekehitysvaiheessa fyysistä yksilöä ei välttämättä ole vielä valmistettu, mutta digitaalisella kaksosella pitää kuitenkin olla esimerkiksi yksilöllinen tuoterakenne.

Teknisten järjestelmien, esimerkiksi koneiden, digitaalinen kaksonen perustuu monitekniisiin fysiikkapohjaisiin malleihin. Niiden skaala voi ulottua atomitasolta makrotason järjestelmiin. Osa digitaalisista kaksosista sisältää kuitenkin myös elementtejä, joita ei voi kuvata puhtaasti teknisinä järjestelminä. Esimerkiksi tuotesuunnittelu/-kehitysprosesseihin ja toimitusketjujen toimintaan kuuluu inhimillistä, monimutkaista toimintaa, esimerkiksi päätöksentekoa. Toimitusketjuissa virtaa materiaaleja, informaatiota ja rahaa yritysten välillä. Toimitusketjujen digitaaliset kaksoset perustuvat lisääntyneeseen vertikaaliseen ja horisontaaliseen datan virtaamiseen, tavoitteena mm. parempi tilannetietoisuus ja verkostotason tuotannon ohjaus. Tämä tarkoittaa tiiviimpää integrointia niin anturi- ja toimilaitekerroksesta yrityksen johtoon, kuin toimitusketjun eri toimijoiden välillä. Digitaalisia kaksosia ei tietenkään rakenneta vain koska niin pystytään nykyteknologioilla tekemään. Ne vaativat suhteellisen paljon työtä ja investointeja, jolloin niiden tuottama lisäarvo liiketoiminnalle pitää olla hyvin perusteltavissa.

Konejärjestelmän digitaalisen kaksosen tarkoitus on tutkia järjestelmään tehtävän muutoksen vaikutusta, joka yleensä liittyy järjestelmän toimintaan tai elinjaksoon. Verkottuneen tuotantojärjestelmän, ts. valmistusekosysteemin, digitaalisen kaksosen tarkoitus voi olla selvittää esimerkiksi järjestelmän tiedonkulkuun tai muihin vuorovaikutussuhteisiin liittyvien muutosten vaikutuksia, kuten tutkia kuormitustilanteen muutosten vaikutusta esimerkiksi toimitusaikapitoon tai tiedon jakamisen tapaa laaduntuottokykyyn.

Tämän tutkimuksen hypoteesina oli, että lisääntynyt datan jakaminen - ja sitä kautta parantunut läpinäkyvyys parantaa toimitusketjun suorituskykyä. Läpinäkyvyys liittyy esimerkiksi tilannetietoisuuteen, kuormitustilanteeseen, kapasiteettiin, jäljitettävyyteen, ennusteisiin, päätöksentekoon, jne. Suorituskyky liittyy mm. toimitusvarmuuteen, läpäisy aikaan, laaduntuottokykyyn, kustannuksiin, jne. NykYTEknologia mahdollistaa aiempaa helpomman ja kustannustehokkaamman datan ja informaation jakamisen, mikä voi vähentää mm. toimitusketjun värähtelyä (bullwhip effect)^{xviii}. Keskinäinen luottamus ja yhdessä sovitut toimintamallit ovat datan jakamisen edellytys. Luottamus liittyy esimerkiksi parantuneen suorituskyvyn ansiosta syntyvien hyötyjen tasapuoliseen jakautumiseen toimitusketjun toimijoiden kesken. ÄVE:ssä on esitetty viisiportainen malli kohti datan jakamiseen perustuvaa älykästä valmistusekosysteemiä (Kuva 4):



Kuva 2. Viisiportainen malli kohti datan jakamiseen perustuvaa älykästä valmistusekosysteemiä. (MOM, Manufacturing Operations Management)

Kuvan mukaisesti toimitusketjun digitaaliselle kaksoselle voidaan asettaa erilaisia ja eriasteisia tavoitteita, joilla on merkitystä koko toimitusketjun eikä vain yhden yrityksen kannalta. Oletettavaa on, että kehittyminen tapahtuu askeleittain siten, että luottamus osapuolten välillä kehittyy tavoitteiden saavuttamisen ja toimitusketjun yhteistyön myötä. Samalla erilaisten digitaalisten kaksosten käyttö yleisty. Kuvan mukaisesti nämä elementit koskevat erilaisia asioita yrityksissä: kuten tuotteen ja vastaavien prosessien rakenteiden tunnistamista, niiden attribuutteja sekä resursseja, jotka osallistuvat prosessien suorittamiseen. Osa askeleista on useimmissa toimitusketjuista jo osin saavutettu, kuten dokumenttiperustainen laadunhallinta toimitusketjussa. Kuitenkin se, että digitaaliseen malliin liitettäisiin todellisen tuotteen laatuominaisuuksia on yleisesti vielä tavoitetasolla.

1.3 Mallintamisen tarkoitus

Mallintamisen avulla voidaan hahmottaa kokonaiskuvaa ja eri tekijöiden välisiä suhteita. Mallintaminen auttaa jäsentämään, kommunikoimaan ja dokumentoimaan kokonaisuutta ja avaamaan kokonaisuuteen liittyvien käsitteiden todellista merkitystä, jolloin on helpompi muodostaa yhteinen ymmärrys ja konsensus siitä, mitkä ovat nykytilan ongelmat ja niiden juurisyyt. Tästä voidaan edetä mallintamaan erilaisten vaihtoehtoisten skenaarioiden potentiaalia, sekä miten kohti tavoitetilaa tulisi edetä. Mallintaminen voidaan nähdä myös keinona synnyttää uutta tietoa ja siirtää sitä yritysten käyttöön. Tässä projektissa sovellettiin lähinnä uimaratakaavioita¹ eli prosessikaavioita ja systeemidynaamista mallintamista. Uimaratakaavioilla saadaan mallinnettua valmistamiseen liittyvien reaali prosessien raadollinen tilanne ja toisaalta tavoiteltu tulevaisuuden ihannetilanne. Systeemidynamiikalla

¹ Uimaratakaavio eli toimintojen välinen vuokaavio on sama kuin perusvuokaavio, mutta rakenteeseen lisätty osa: "kaistat" tai "uimaradat", jotka edustavat kutakin vaihetta vastaavia henkilöitä tai osastoja.

voidaan mallintaa mm. nykytilan ongelmien syitä ja transformaatiota kohti tulevaa tavoitetilaa mukaan lukien potentiaalisia hyötyjä ja niiden edellytyksiä.

Systeemidynamiikka (system dynamics) on lähestymistapa ja joukko käsitteellisiä työkaluja, joiden avulla voidaan ymmärtää kompleksisten järjestelmien rakennetta ja dynamiikkaa. Se on myös täsmällinen mallinnusmenetelmä, jonka avulla kompleksisia järjestelmiä voidaan simuloida tietokoneilla. Systeemidynamiikka perustuu epälineaarisen dynamiikan ja takaisinkytkettyjen säätöjärjestelmien teorioihin, mutta on pohjimmiltaan hyvin poikkitieteellistä – se vaatii tekniikan lisäksi ymmärrystä mm. psykologiasta, taloustieteestä, päätöksenteosta, ja organisaatioiden käyttäytymisestä. Sosiaaliset järjestelmät, kuten tuotantoverkostot, ovat dynaamisesti hyvin epälineaarisia ja kompleksisia^{xix}. Myös esimerkiksi Industry 4.0 pitää ymmärtää uuden teknologian tuomien mahdollisuuksien lisäksi laajoina muutoksina organisaatioissa ja verkostoissa^{xx}. Simuloinnilla on useita tunnettuja etuja: suhteellisen edullinen ympäristö kokeilemiseen ja oppimiseen, mahdollistaa ajan ja tilan kompressoimisen tai laajentamisen, toiminta voidaan toistaa ja pysäyttää, jne. Systeemidynaaminen simulointi pystyy kertomaan asioita, joita emme vielä tiedä. Oppiminen tapahtuu parhaiten, kun päätöksentekijät osallistuvat itse aktiivisesti mallin kehittämiseen. Mallintaminen toimii myös kommunikoinnin ja ymmärtämisen välineenä eri sidosryhmien välillä^{xxi}.

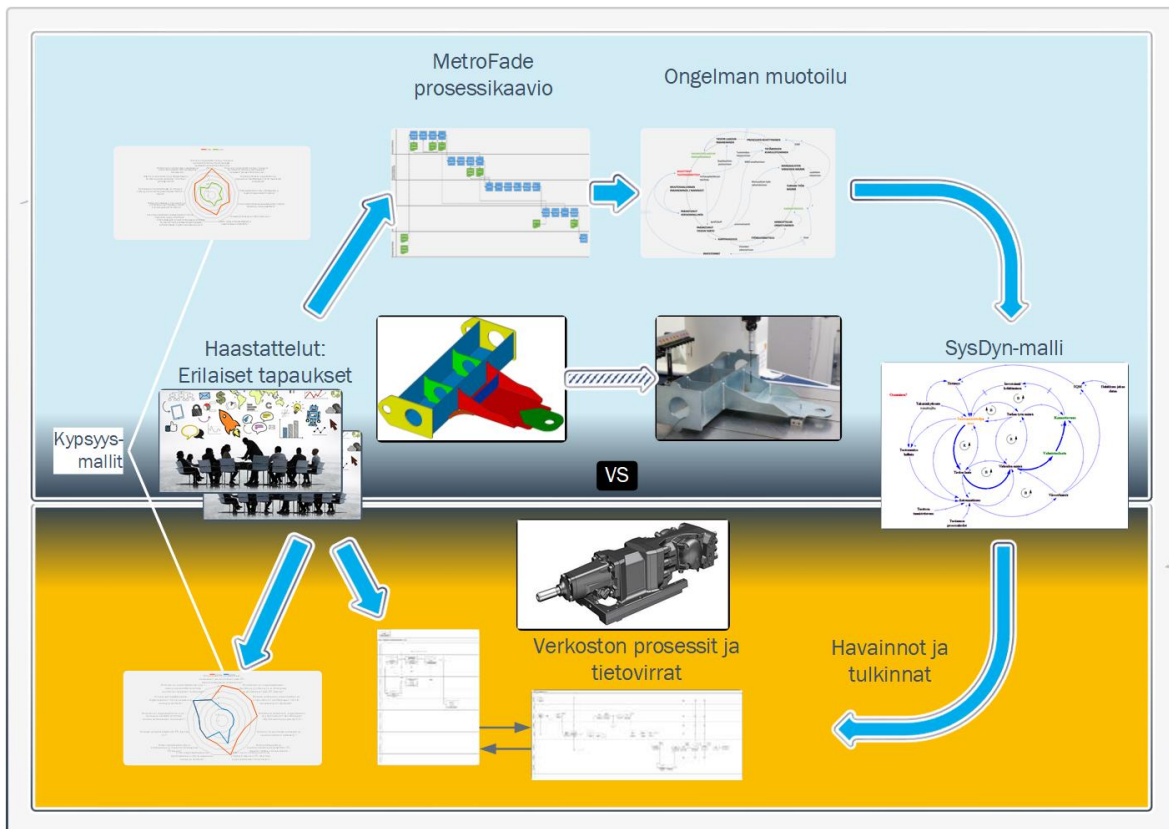
Visuaalinen ja laadullinen ja mallintaminen voi edetä kvantitatiiviseen eli määrälliseen simulointiin, mutta se ei aina ole välttämätöntä, jos tavoitteena on lähinnä jäsentää ja ymmärtää kokonaiskuva. Simuloinnilla voidaan testata erilaisia skenaarioita. Systeemidynaamisella simuloinnilla saadaan esimerkiksi esiin epävarmuudesta, kommunikaatio-ongelmista ja päätöksenteosta sekä laatuhäiriöistä ajan mittaan kumuloituvia ongelmia. Simuloinnilla voidaan tutkia myös mm. miten erilaiset epävarmuustekijät, viiveet ja takaisinkytkennät vaikuttavat skenaarioiden ajalliseen etenemiseen nykytilasta kohti tavoitetilaa. Simuloinnilla ei välttämättä tavoitella eksakteja määrällisiä tuloksia, eikä se usein ole edes mahdollista, koska monet mallin muuttujat ja niiden arvot ovat yleensä asiantuntijoiden arvioimia. Simuloimalla voidaan kuitenkin verrata suhteellisesti erilaisten skenaarioiden kehityspolkuja ja vaikutuksia. Malleja voidaan parantaa ja osittain validoida, kun saadaan käyttöön dataa mallinnetusta järjestelmästä. Kun saadaan aikaan vuorovaikutus mallin ja reaali maailman välille, lähestytään digitaalisen kaksosen konseptia.

Systeemidynamiikan avulla on tutkittu mm. informaation jakamisen vaikutusta toimitusketjujen resilienssiin^{xxii, xxiii}, epävarmuuden vaikutusta joustavuuteen^{xxiv}, toimitusketjun varastojen ja kapasiteetin suunnitteluun^{xix}, strategiseen suunnitteluun, suorituskyvyn analysointiin ja kustannus tai palvelutason tasapainottamiseen^{xxv}. Toimitusketjuja voidaan tutkia ja kehittää toki myös muilla menetelmillä, esim. discrete event simuloinnilla^{xxvi}.

2. Tavoite ja tutkimusote

Tutkimusote oli laadullinen ja tutkimusmenetelminä sovellettiin case-tutkimusta, ÄVE-yritysten haastatteluja sekä mallinnusta ja simulointia. Case-tutkimuksessa mallinnettiin ja analysoitiin Sandvik-liiketoimintaekosysteemiä ja VTT:n MetroFade-projektia. Luottamuksellisuuden ja koronatilanteen takia päädyttiin käyttämään VTT:n julkisen MetroFade -kehityshankkeen (Metrology based robust fatigue design) aineistoa esimerkkimateriaalina. Tulokset ÄVE-ekosysteemin ja MetroFade-projektin toiminnan vastaavuuksista jäävät tämän takia varsin yleiselle tasolle. Materiaalina hyödynnettiin edellä mainittujen lisäksi myös VTT:n Data Unleashed -projektin tuloksia. Mallintamisessa sovellettiin prosessikaavioita (swim lane) ja systeemidynaamista mallintamista.

Kuva 3 esittää sen, kuinka sekä ÄVE-projektia edeltävät että projektissa tehdyt haastattelut sekä niiden perusteella tehdyt kypsyyss- ja prosessimallit edesauttoivat tapausten tulkittamisessa, ongelman muotoilussa ja systeemidynaamisen mallin kehittämisessä. ÄVE-projektin yrityshaastattelujen perusteella hahmoteltiin verkoston prosesseja ja tietovirtoja (kuvan alaosa). Tämän perusteella oletettiin, että MetroFade-hankkeen toimitusketjut ovat riittävän samanlaisia ÄVE-yritysten toimitusketjujen kanssa. ÄVE-projektissa siis kuvattiin ja analysoitiin MetroFade-projektin aineiston avulla niitä vuorovaikutussuhteita ja ominaisuuksia, joita liittyy MetroFade-toimitusketjun toimintaan ja ominaisuuksiin (kuvan yläosa).



Kuva 3. Tutkimuksen eteneminen

Seuraavassa luvussa esitellään tutkimuksen materiaalina olleet projektit ja niiden tuotokset.

3. Materiaali

Tutkimuksen materiaalina hyödynnettiin kahdessa ÄVE-projektissa kerättyä aineistoa, sekä kahden VTT:n omaraahoitteen projektin, Data Unleashed ja MetroFade, tuloksia. Yritysten sisäistä dataa ei tässä julkaisussa voida luottamuksellisuuden vuoksi käsitellä. Sen sijaan MetroFade-projekti tarjosi julkisen aineiston. Lisäksi haastattelujen osalta yrityskohtaisia aineistoja ja malleja ei voida julkaista, mutta niistä tehtyjä yhteen vetäviä tuloksia ja johtopäätöksiä on mahdollista esitellä.

3.1 ÄVE-haastattelut

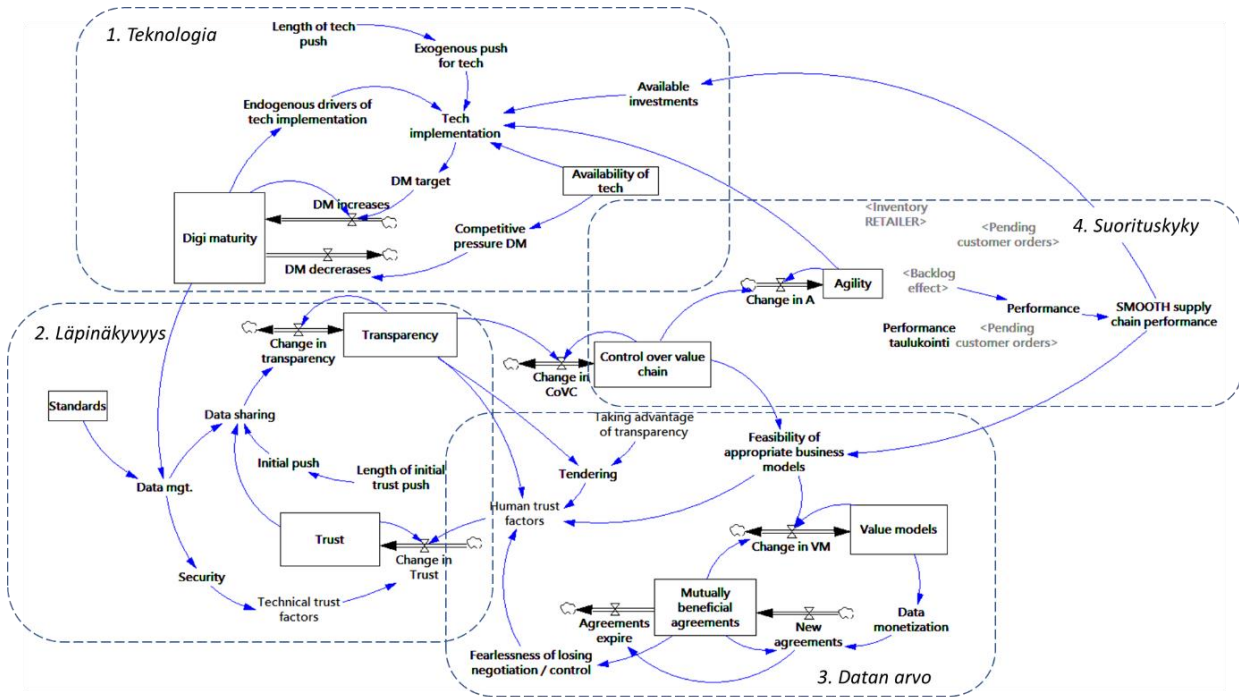
Projektissa haastateltiin sekä asiakkaan että toimitusketjun yrityksiä kahdessa vaiheessa. Ensivaiheen haastattelujen sekä kirjallisuuskatsauksen perusteella julkaistiin artikkeli malliperustaisen tuotemäärittelyn (Model Based Definition, MBD) hyödyistä ja esteistä (Uski et al. 2020). Malliperustainen tuotemäärittelyn idea on edistää horisontaalista tiedonjakamista siten, että osavalmistuspaiirustuksia ei tarvita, kun tuotannon tarvitsema määrittelytieto, kuten toleranssi- ja pinnanlaatumerkinnät, sisällytetään tuotemalleihin (ks. Rapinoja et al. 2016). On myös mahdollista kehittää laadunvarmistusta tuotemalliin liittyvään mittausdataan perustuen (ks. <https://qifstandards.org/>). Voidaan esimerkiksi tutkia sitä, miten tuotemäärittelyn ominaisuudet ovat tuotannossa toteutuneet koneluettavan datan avulla. Tämä tarjoaa uudenlaisia mahdollisuuksia tuotelaadun digitaalisen kaksosen määrittelyyn.

Tutkimuksessa haastateltiin myös kahta ÄVE-ekosysteemin toimittajayritystä ja selvitettiin niiden näkemystä toimitusketjun digitalisaatiosta, yritysten kypsyttä tämän suhteen ja tarkennettiin tilaus-toimitusprosessin etenemistä. Kypsyystarkastelussa käytettiin hyväksi tiivistettyä mallia aiemmassa tutkimus- ja kehitysprojektissa tehdystä laajennetun yrityksen digitalisaatiota koskevasta kypsyysmallista^{xxvii}. Lisäksi yritysten prosesseja kuvattiin em. uimaratakaavioilla.

3.2 Data Unleashed -malli

Data Unleashed oli vuonna 2020 käynnissä ollut VTT:n hanke, jossa keskiössä oli datan jakaminen, datan arvo ja datatalous. Datataloutta käsiteltiin sekä yleisenä konseptina, että eri toimialojen tapaustutkimuksen näkökulmista. Valmistavan teollisuuden tapaustutkimuksessa rakennettiin systeemidynaaminen malli datan arvon kehittymisestä toimitusketjussa. Geneerinen systeemidynaaminen simulointimalli ottaa huomioon datan jakamiseen liittyviä inhimillisiä tekijöitä (mm. luottamus), teknologisen kypsyystason, vaikutuksen toimitusketjun suorituskykyyn, sekä datan arvon muodostumisen. Toimitusketjun malli on myös geneerinen, eikä se kuvaa mitään tiettyä reaali maailman liiketoimintaa. Mallilla voidaan kuitenkin tutkia lisääntyneen datan jakamisen vaikutusta mm. toimitusvarmuuteen ja varastojen kokoon - ja sitä kautta kustannuksiin. Systeemidynaamista mallinnusta ja simulointia hyödynnettiin datan jakamisen edellytysten ja vaikutusten tutkimiseen. Mallinnuksella ja simuloinneilla haettiin vastauksia kysymyksiin:

- Mitkä tekijät estävät tai vähentävät halukkuutta data jakamiseen?
- Miten datan jakamista voitaisiin edistää?
- Mitkä ovat datan jakamisen mahdolliset hyödyt ja haitat?
- Mitkä ovat datan jakamisen myötä syntyvien hyötyjen edellytykset?
- Miten tekniset ratkaisut voivat tukea datan jakamista?



Kuva 4. Datan arvon muodostuminen ja jakaminen. (Lähde: VTT Data Unleashed -projekti.)

Mallissa on neljä päämoduulia (Kuva 4):

- 1) Datan jakamisen teknologia,
- 2) toimitusketjun läpinäkyvyys,
- 3) datan arvo ja
- 4) toimitusketjun suorituskyky.

Mallia simuloimalla saadaan esiin dataan jakamiseen liittyviä ilmiöitä. Kun otetaan käyttöön uutta teknologiaa ja standardeja, datan jakaminen helpottuu. Kun dataa jaetaan enemmän, verkoston läpinäkyvyys lisääntyy, mikä lisää toimitusketjun ohjattavuutta. Tämä lisää toimitusketjun suorituskykyä, josta saadaan johdettua jaetulle datalle arvoa. Kun arvoa jaetaan tasapuolisesti, verkoston toimijoiden luottamus kasvaa, mikä edelleen lisää halukkuutta datan jakamiseen. Kun toimitusketjun suorituskyky kasvaa, liiketoiminta menestyy paremmin, jolloin on mahdollista investoida datan jakamisen teknologiaan ja digitaalisen kypsyyden kehittämiseen. Tämä lisää edelleen datan jakamisen kyvykkyyttä ja läpinäkyvyyttä verkostossa. Itse toimitusketju on mallinnettu geneerisenä mallina, jolla voidaan tutkia datan jakamisen vaikutusta esimerkiksi materiaalivirtojen viiveisiin ja varastotasoihin. Malli voidaan kytkeä suorituskyvyn kautta erilaisiin todellisiin toimitusketjuja simuloiviin systeemidynaamisiin malleihin tai jopa toimitusketjuista mitattuun tai kerättyyn dataan ja päätöksentekoprosesseihin.

3.3 MetroFade -projekti

MetroFade-projekti (Metrology based robust fatigue design) on MIKESin vetämä VTT:n omarahoitteinen projekti, jossa demonstroitiiin dimensionaalisten mittausten hyödyntämistä väsymiskriittisten hitsattujen rakenteiden suunnittelussa ja optimoinnissa, tuotemäärityssä ja laadunvarmistuksessa. MIKES on nykyisin osa VTT:tä (ent. Mittatekniikan keskus). MetroFade-projektissa suunniteltiin todellisen hitsatun rakenteen kriittisiä hitsausliitoksia

kuvaava mockup-rakenne, josta valmistettiin kaksi kymmenen kappaleen sarjaa, ja mitattiin rakenteista väsymiskriittisten hitsausliitosten sovituserot useilla eri mittalaitteilla.

Mittaustuloksia käytettiin tilastollisina jakaumina luotettavuuspohjaisen suunnittelun lähtötietoina. Luotettavuuspohjaisen suunnittelun menetelmiä demonstroitettiin hitsatun kevytrakenteen robustisuuden optimointiin ja epävarmuuksien vaikutusten arviointiin. Luotettavuuspohjaisessa suunnittelussa rakenteesta tehdään parametrinen FE-malli, josta muodostetaan kevyt surrogaattimalli, jolla lasketaan Monte-Carlo-simuloinnilla mitatusta tiedosta muodostetuilla tilastollisilla jakaumilla rakenteen väsymiskestävyyden jakauma.

Väsymiskestävyyden jakaumalla voidaan arvioida ja optimoida rakenne halutulle luotettavuudelle (vauriotodennäköisyydelle). Lisäksi menetelmillä voidaan arvioida erilaisten tarkastusmenetelmien ja mittalaitteiden mittaustarkkuuksien eli mittauserävarmuuksien vaikutusta väsymiskestävyyden jakaumaan. Näin voidaan tuottaa asiakkaalle tietoa soveltuvan mittausten menetelmien ja -laitteiden valintaan päätöksentekoa varten. Esimerkiksi NDT-menetelmien yhteydessä usein käytettävää POD-käyrää (Probability of detection) voidaan käyttää jakaumana luotettavuuspohjaisessa suunnittelussa, jolloin voidaan arvioida eri tarkastus- ja mittausten menetelmien vaikutusta rakenteen väsymiskestävyyden jakaumaan. POD-käyrä on siten kätevä rajapinta suunnittelun ja laadunvarmistuksen välillä soveltuvien mittausten menetelmien valinnassa.

Mockup-rakenteelle tehtiin projektissa tolerointi, jossa määriteltiin väsymiskriittisten hitsausliitosten sovituserot dimensionaalisia mittauksia varten. Toleroinnissa käytettiin sekä mittojen toleransseja, että geometrisia toleransseja. MIKES pystyy hyödyntämään MBD-määrittelyjä koordinaattimittauskoneen ohjelmoinnissa. Lisäksi rakenteen ja hitsausliitosten toleroinnilla määriteltiin rakenteen väsymismitoituksessa robustisuuden optimoinnin suunnittelumuuttajat.

Robustisuuden optimoinnilla voidaan määritellä vaadittavat arvot toleransseille, jotta rakenteen väsymiskestävyyttä saavutetaan halutulla luotettavuudella valmistuslaadun vaihtelu huomioiden. Mockup-rakenteella voidaan määrittää esim. tietyn toimittajan valmistuslaadun vaihtelu, jota voidaan sitten käyttää rakenteen robustisuuden optimoinnissa. Rakenteelle täytyy varata suunnittelussa ns. kontrollimuuttajat (control factors), joilla epävarmuutta (laadunvaihtelua) voidaan kompensoida. Esim. hitsin a-mitan lisääminen tai profiilin mittojen kasvattaminen ovat kontrollimuuttajia. Tyypillisesti rakenteen massa tai hitsin a-mitta kasvavat, kun valmistuslaadun vaihtelu kasvaa. Tämä kannustaa etenkin liikkuvan kaluston suunnittelussa ja valmistuksessa mittaamaan ja vähentämään valmistuslaadun vaihtelua, koska näin voidaan keventää rakenteita ja esim. vastata kiristyviin päästövaatimuksiin. Luotettavuuspohjaisen suunnittelun menetelmillä voidaan määrittää ketjun kohdat, joiden epävarmuus aiheuttaa suurimmat vaikutukset lopputuotteen väsymiskestävyyden hajontaan, ja kohdentaa parannukset näihin kohtiin laatu- ja ketjuja.

Mockup-rakenteelle tehtiin yksinkertaistettu tuotemäärittely kahden koesarjan valmistusta varten, koska haluttiin arvioida hitsatun rakenteen valmistuksen laatua tyypillisellä konepajalaadulla. Esim. laajempi geometrinen toleranssien käyttö valmistuksessa jätettiin jatkotarkasteluaiheeksi. Koesarjan tarkoituksena oli myös saada tietoa hitsatun rakenteen suunnittelun, tuotemäärittelyn ja laadunvarmistuksen epävarmuustekijöistä. Valmistusta varten tuotemäärittely tehtiin pitkälti yleistoleransseilla, ja hitsauksen laatu määriteltiin SFS-EN 3834-2 mukaisesti. Hitsausluokaksi määriteltiin hitsausluokka C ("hyvä konepajalaatu") kaikille hitseille. Materiaaliksi määriteltiin rakenneteräs S355. Valmistusmenetelmistä rajattiin leikkeiden osalta laserleikkaus, ja hitsausprosessiksi MAG-hitsaus. Sarjakooksi päätettiin kymmenen kappaletta, jotta mittaustuloksista voidaan arvioida tilastollisia jakaumia ja toisaalta että konepajalla suhtaudutaan tilaukseen pienenä sarjana.

Elomatic Oy teki rakenteista VTT:n 3D-geometriasta pohjalta valmistuspiirustukset ja hoiti tarjouspyynnöt ja tilaukset. Tarjouspyyntöjen yhteydessä tarjouksia varten toimitettiin valmistuspiirustukset ja lyhyt kuvaus sähköpostilla materiaaleista, maininta että

materiaalitodistukset vaaditaan ja viittaukset yleistoleranssien standardeihin ja vaadittavat standardien luokat. Konepajat, joille tarjouspyynnöt lähetettiin, valittiin siten, että niillä oli SFS-EN 3834-2 mukainen laatu sertifioituna. Tarjouspyyntöjen yhteydessä ei ns. soitettu perään, millä haluttiin varmistaa, että konepajoilla oli vain piirustuksissa ja tilauksissa määritellyt tiedot tarjouksia ja valmistusta varten. Tilauksen jälkeen kappaleet menivät suoraan valmistukseen.

Mockup-rakenteiden hankinta tehtiin laittamalla tilaukset ns. hankintaputkeen, jolloin kappaleista saadaan periaatteessa tietoa vasta kun kappaleet ovat toimitettuna lavalla MIKESillä. Myöhemmin jatkotarkastelussa voidaan menetelmänkehityksenä tehdä hankinta ja valmistus siten, että jaetaan tietoa aktiivisesti. Nyt ei esim. pidetty vaatimusten katselmuksia.

Valmistuspiirustuksissa oli, kuten usein käy mitoitus, jonka voi tulkita eri tavalla kahta kautta ja päätyä jäykisteiden erilaiseen paikoitukseen. Valmistuksessa oli kaksi konepajaa, kotimainen ja ulkomainen (EU-alueelta). Kotimainen konepaja kysyi tarkennusta epämääräiseen mitoitukseen, mutta ulkomainen konepaja teki päätöksen kysymättä tarkennusta. Valmistuslaadun vaihtelun ja epävarmuustekijöiden arvioinnin kannalta tällä saatiin tilastollisesti ajatellen kaksi selvästi toisistaan poikkeavaa populaatiota, ja hyvää konkretiaa menetelmien kehitykseen.

MetroFade-projektin mockup-rakenteella saatiin hyvä käsitys hitsatun rakenteen väsymiskestoikään vaikuttavista epävarmuustekijöistä koko ketjun osalta. MetroFade-projektissa yleistoleransseihin perustuvalla tuotemäärittelyllä ja minimiohjeistuksella hankintaan laitettu koesarja kuvaa ns. normaalilaatua (SFS-EN 3834-2). Mockup-rakenne osoittautui juuri sopivan monimutkaiseksi. Sillä saatiin ilmiöitä esiin ja konkretiaa menetelmänkehitykseen, jolloin asioita jouduttiin pohtimaan, mutta eri tekijät ja niiden vaikutukset väsymiskestoikään saatiin eroteltua, mikä oli luotettavuuspohjaisen suunnittelun ja laadunhallinnan kannalta projektin ylätasoinen tavoite.

Valmistuslaadun vaihtelun vaikutus hitsatun rakenteen väsymiskestoikään

Suunnittelu

- Väsymiskriittiset hitsit
- Parametrinen mallinnus

Mittaussuunnitelma

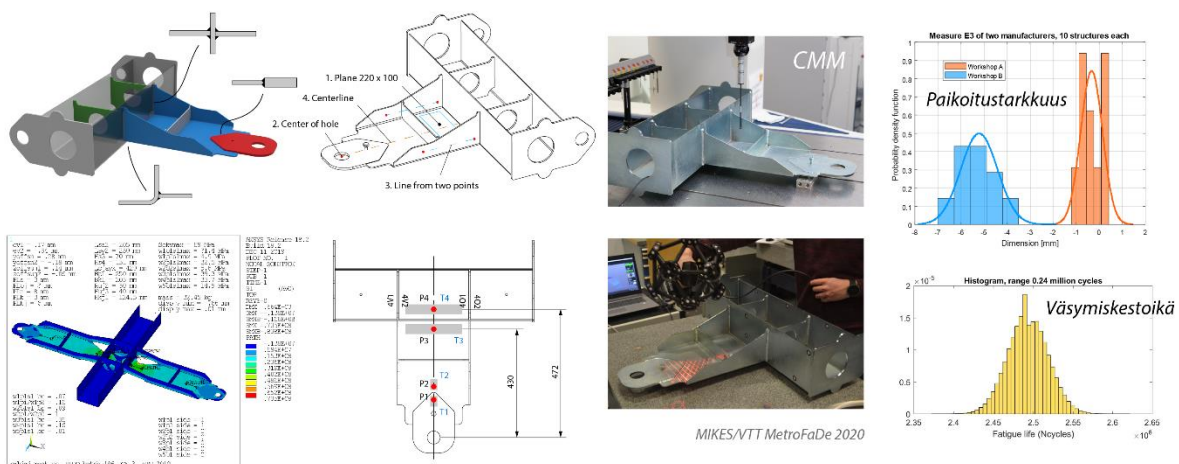
- GPS-määrittelyt
- Geometriset toleranssit

Dimensioiden mittaus

- Koordinaattimittaus referenssinä
- Optisten mittalaitteiden vertailu

Tilastollinen analyysi

- Robustisuuden optimointi
- Luotettavuuden arviointi



Kuva 5. Valmistuslaadun vaihtelun vaikutus hitsatun rakenteen väsymiskestoikään

Valmistuslaadun vaihtelun vaikutusta hitsatun rakenteen väsymiskestoikään voidaan arvioida mittaamalla rakenteen dimensioita ja käyttämällä mitattua tietoa luotettavuuspohjaisen suunnittelun lähtötietona (Kuva 5). Luotettavuuspohjaisessa suunnittelussa laskenta tehdään tilastollisilla jakaumilla, ja tuloksena saadaan esim. rakenteen väsymiskestoian jakauma.

Väsymiskestävyyden jakaumalla voidaan arvioida rakenteen luotettavuus (vauriotodennäköisyys) annetulle käyttäjälle.

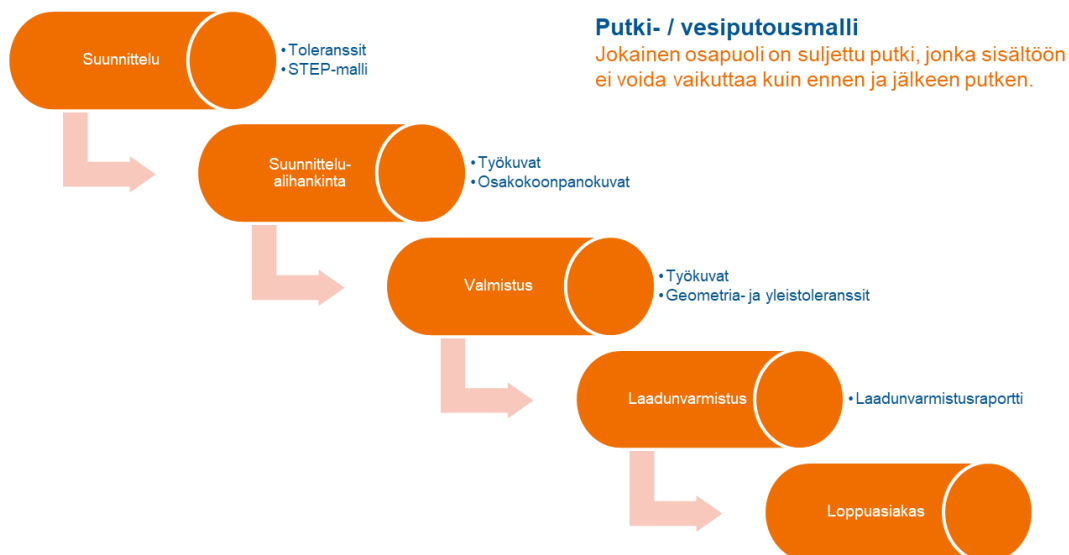
Mockup-rakenteella voidaan jatkossa esim. arvioida geometrisen toleroinnin hyötyjä hitsatun rakenteen tuotemäärityksessä, tarkastella laajemmin laadunvaihtelun vaikutusta väsymiskestävyyteen, kehittää robustin suunnittelun menettelyjä, sekä kehittää valmistettavuuden arvioinnin mukaan ottamista suunnittelun alkuvaiheessa ja sujuvia käytäntöjä tiedon jakamiseen. Nykyaikaisilla ohjelmistoilla voidaan esim. vaatimusten katselmukset pitää sähköisinä. Digitalisaation avulla voidaan muusta tuotannosta irrallaan pidettävistä hankintaorganisaatioista siirtyä tilannetietoiseen, läpinäkyvään ja joustavaan valmistukseen. Mockup-rakenteita voidaan suunnitella räätälöidysti erilaisille kohderakenteille ja menetelmät ovat yleiskäyttöisiä. Epävarmuuden hallinnan menetelmillä, rakenteiden dimensioiden mittauksilla ja NDT-menetelmien tuottamalla tiedolla voidaan laatuketjua määrittää . esim. 5-10 asiaa, joista aiheutuvat lopputuotteen väsymiskestävyyteen suurimmat vaikutukset. Näiden avulla voidaan parantaa laatuketjua kohdennetusti. Tämä parantaa parantaa suomalaisen teollisuuden kilpailukykyä kansainvälisillä markkinoilla.

4. Tulokset

Työpakettin tuloksena syntyivät MetroFade baseline ja laadullinen systeemidynaaminen malli. Baseline on prosessikuvaus MetroFade-projektissa suoritetusta tilaus-toimitus-prosessista. Systeemidynaaminen malli visualisoi laatuun vaikuttavia tekijöitä isossa kuvassa. Lisäksi yritysten digitalisaation ja verkostomaisen toiminnan kypsyyttä tutkittiin aiemmassa projektissa kehitettyä menetelmää soveltaen.

4.1 MetroFade baseline

MetroFade-projekti nähtiin potentiaalisena vaihtoehtona yritystenvälisen toimitusketjun tarkastelulle. Kyseessä oli todellinen, VTT:n omarahoituksella toteutettu toimitusketju, josta oli saatavilla informaatiota ilman salassapitovaatimuksia. Toimitusketjusta tehtiin uimaratakaavio (ks. Liite 1), jonka avulla voitiin sanallista kuvausta paremmin hahmottaa prosessin vaiheet, sekä niiden välillä liikkuva informaatio. Jatkotutkimuksissa voidaan mallin avulla myös kohdistaa tunnettuja virhelähteitä, sekä miettiä niille potentiaalisia ratkaisuja.



Kuva 6. MetroFade-projektin toimintamalli

Toimitusketjua voidaan ajatella putkikäsitteen näkökulmasta (ks. Kuva 3), eli jokainen ketjun toimija on oma putkensa; laskentaputki, valmistusputki, jne. Putkien sisään ei ole selkeää näkyvyyttä, ellei ko. putken toimija sitä erikseen tarjoa. Tällöin esimerkiksi suunnittelu ei tiedä missä vaiheessa suunnittelun alihankinnassa mennään, ennen kuin prosessi siirtyy seuraavaan putkeen, eli valmistukseen. Kuvan mukaisesti prosessi alkaa suunnittelusta, joka saamiensa vaatimusten perusteella määrittelee kappaleen 3D mallin, sekä siltä vaadittavat toleranssit. Suunnittelun alihankinta laatii näiden perusteella osa- ja loppukokoonpanoon vaadittavat työkuvat, sekä tilaa kappaleen. Tässä tapauksessa käytettiin kahta eri valmistajaa, joista kumpikin tuotti 10 mallikappaletta, jotka toimitettiin laadunvalvontaan mitattaviksi. Laadunvalvontamittaus perustui alkuperäisen suunnittelun malleihin sekä kappaleen toiminnallisiin vaatimuksiin. Tämän jälkeen kappaleet voitiin toimittaa loppuasiakkaalle.

Käytännön prosessissa huomattiin useita potentiaalisia virhelähteitä, kuten:

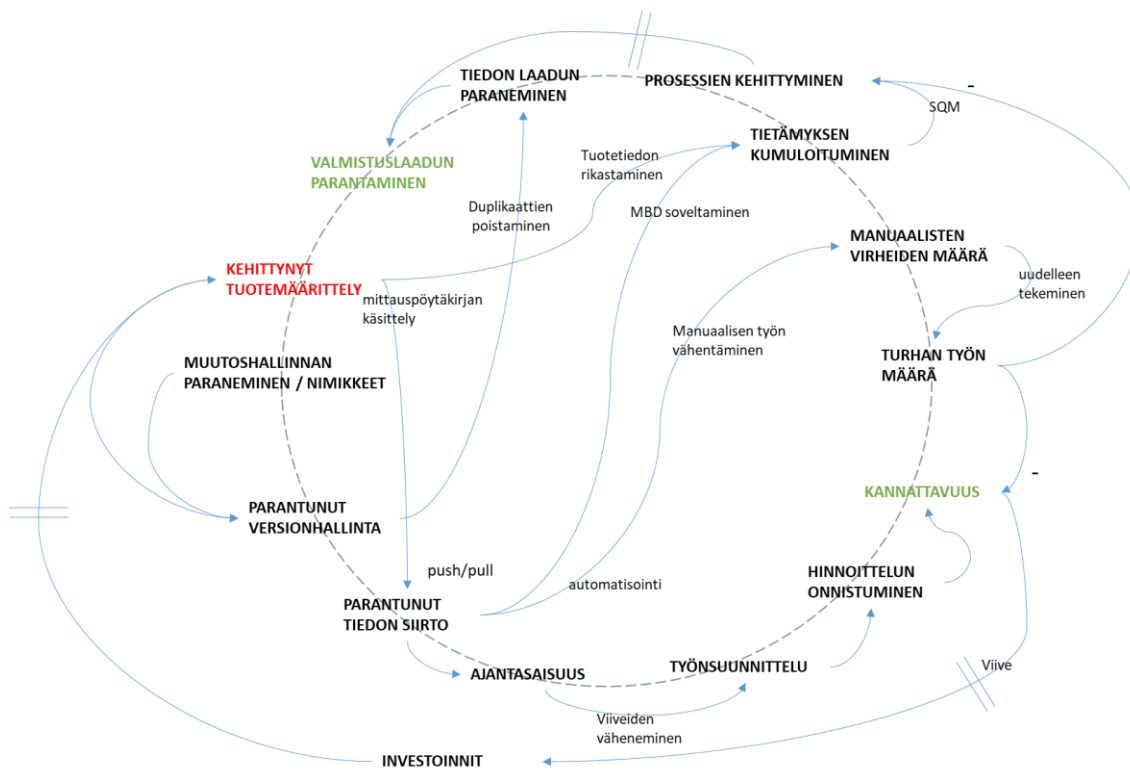
- Kappaleen valmistuspiirrustuksiin päätyi virhe, mutta vain toinen valmistaja konsultoi suunnittelun alihankinnan ja tilauksen tehnyttä organisaatiota virheen johdosta. Virhe oli tarkoitukseton eli sitä ei suunnitelmaa tarkastettaessa havaittu.

- Laadunvarmistukseen oli valittu neljä merkittävintä mittaa tarkistettaviksi, mutta mittauksen työläydestä johtuen osa jäi mittaamatta.

Kun kukin toimija ei jaa keskeneräistä tietoa, vaan toimii omissa putkessaan, pienetkin virheet voivat kumuloitua. Jos käytössä olisi prosessin kattava digitaalinen kaksonen eli reaaliaikaista tuotemäärittelytietoa jaettaisiin koko verkostolle, virheiden havaitseminen ja korjaavat toimenpiteiden tulos välittyisivät koko verkostolle. Seuraavaksi esitetään mm. tämä asia hieman yleisemmällä mallilla.

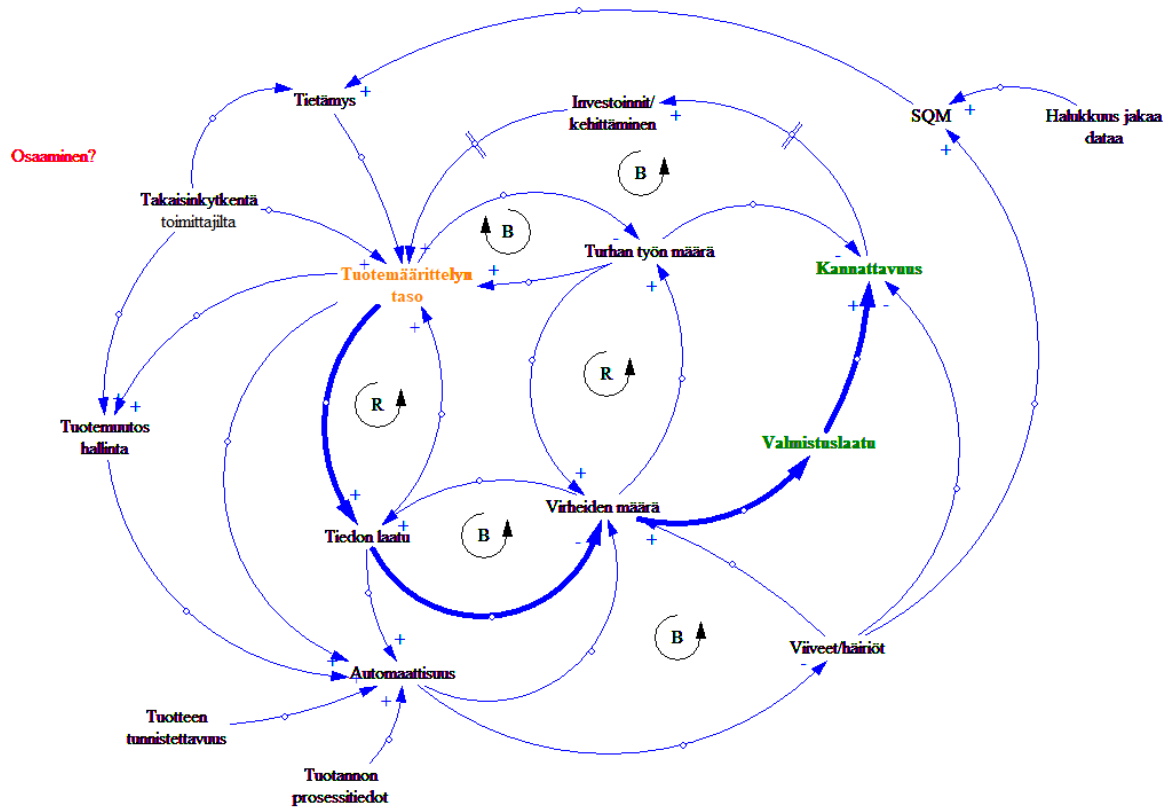
4.2 Laadullinen systeemidynaaminen malli

Lähtökohdaksi ÄVE:n systeemidynaamisen mallin rakentamiseen otettiin MetroFaden prosessimallit, sekä niiden puitteissa käydyt työpajakeskustelut. Ensin luotiin ns. ongelmavyhyti (Kuva 7) keskeisistä käsitteistä, haasteista ja niiden välisistä yhteyksistä.



Kuva 7 Systeemidynaamisen mallin pohjatyönä tehty ”ongelmavyhyti”

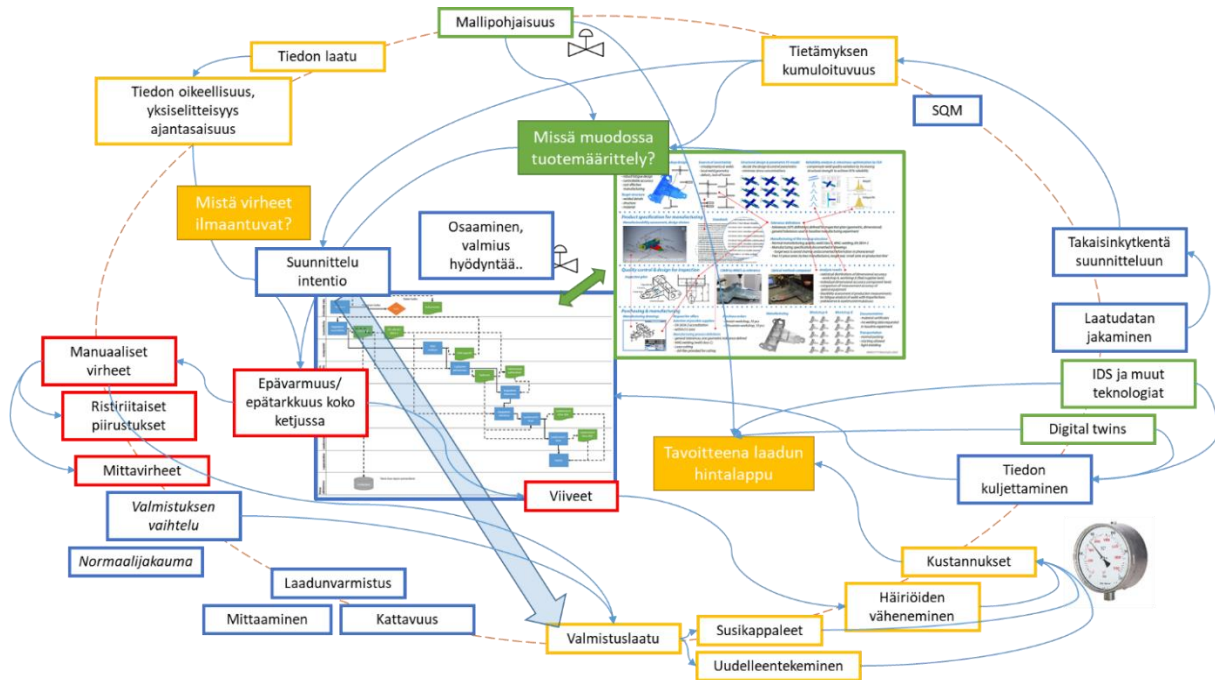
Edelleen ongelmavyhydestä jalostettiin Vensim-ohjelmalla laadullinen systeemidynaaminen malli (Kuva 8). Malli kuvaa toimitusverkon attribuuttien välisiä vuorovaikutuksia.



Kuva 8 Vensim-ohjelmalla luotu laadullinen systeemidynaaminen malli

Lopuksi malli visualisoitiin ymmärrettävään muotoon. Mallissa (Kuva 9.) esitetään kolme suunnittelun ja tuotannon kerrosta ja abstraktiotasoa:

1. Fyysinen tuote ja sen valmistus: Tuotesuunnitteluun, valmistukseen ja mittaamiseen liittyvä laatu ja epävarmuus
2. Tuotetieto ja sen virtaus: Mallipohjaisuus ja prosessien suunnittelu - tuotemäärityyn ja sen elinkaareen liittyvä epävarmuus
3. Dynaamisen liiketoiminta-systeemin suunnittelu: Päätöksenteko, kommunikaatio, inhimilliset tekijät, viiveet, takaisinkytkennät, edellytykset ja vaikutukset



Kuva 9. Visualisoitu systeemidynaaminen malli

MetroFade-projektin konkreettinen tavoite oli määrittää kokonaiskustannus laadulle eli "laadun hintalappu" (Kuva 9), tarkemmalle mittaamiselle ja toisaalta epävarmuudelle, josta kumpuaa laatuongelmia ja -kustannuksia. Toisaalta tavoitteena oli hahmottaa uudenlaisia digitalisaatiota soveltavia prosesseja laadun parantamiseksi ja kustannusten vähentämiseksi. ÄVE-projektin puitteissa tutkittiin prosesseja mallintamalla, miten epävarmuutta kuljetetaan prosessien läpi ja mistä laatuongelmat ja poikkeamat johtuvat.

Mallin avulla voidaan esittää laatuun vaikuttavia tekijöitä, sekä pohtia potentiaalisia keinoja parantaa laatua ja vähentää kustannuksia tulevaisuudessa. Mallintamisen tavoitteena on myös saada valmistukseen liittyvä laadun varmistus, mittaamisen kattavuus ja prosessilaatu tasapainoon. Laadun vaikuttavat myös mittausvirheet ja valmistusprosessien vaihtelu, jotka yleensä ovat laadunvarmistuksen huomion keskipisteenä.

Tuotemäärittely on vuorovaikutuksessa tuoteprosessin ja tilaus-toimitus-ketjun kanssa. Tuotesuunnittelun lähtökohtana oleva suunnitteluintentio pitäisi saada valmiiksi tuotteeksi vaatimusmäärittelyn, konseptisuunnittelun, perussuunnittelun, detajlisuunnittelun ja valmistusprosessien kautta. Ideaalitilassa kaikilla toimijoilla on jatkuvasti käytettävissä ajantasainen ja oikea informaatio. Todellisuudessa niin materiaali- kuin tietovirtoihin liittyy jatkuvaa epävarmuutta ja viiveitä koko ketjussa. Tietoon liittyviä virheitä syntyy mm. käsityönä tehdystä tuotetiedon kopioinnista järjestelmästä toiseen tai CAD/CAE mallien muuntamisesta ohjelmistojen vaatimista tietomuodoista toisiin. Viiveet voivat johtaa myös vanhentuneisiin tai ristiriitaisiin valmistuspiirustuksiin.

Tiedon laatu (oikeellisuus, yksiselitteisyys, ajantasaisuus) ja jouheva virtaaminen on siis merkittävä tekijä epävarmuuden vähentämiseen, lopullisen valmistuslaadun parantamiseen ja kokonaiskustannusten vähentämiseen. Tiedon virtaaminen pitäisi tapahtua molempiin suuntiin, eli esimerkiksi valmistuksesta pitäisi kulkea palaute- ja muutostiedot perusteluineen suoraan suunnittelijoille.

Mallipohjainen tuotemäärittely ja mallipohjaiset prosessit mahdollistavat periaatteessa tavoitteena olevan tiedon laadun kehittymisen ja sitä kautta välillisesti laadun paranemisen ja kokonaiskustannusten vähenemisen. Tiedon jakaminen ja takaisinkytketyt tietovirrat rikastavat tuotemalleja ja kumuloivat tietämystä tuoteprosesseihin ja toimitusprosesseihin,

sekä mahdollistavat paremmin tilastollisten laadunkehitysmenetelmien hyödyntämisen. Tavoitteena on robustin tuotesuunnittelun mahdollistava kattava tuotemäärittely, joka mahdollistaa esimerkiksi valmistettavuuden analysoinnin varhaisessa vaiheessa.

Digitaalisten kaksosten ja digitaalisten säikeiden (thread) voidaan katsoa olevan mallipohjaisuuteen perustuvia välineitä tiedon virtauksen parantamiseen. Näiden verrattain uusien konseptien taustalla on vakiintuneempaa tuotetiedon hallinnan (EDM/PDM) ja tuotteen elinkaaren hallinnan (PLM) metodiikkaa ja järjestelmiä. Tosin nekin ovat jatkuvasti kehittyviä ja laajentuvia konsepteja ja teollisuuden implementoinnit ovat vaihtelevia. Tiedon virtauksen parantamiseen toimitusketjuissa yritysten välillä tarvitaan uusien toimintamallien lisäksi teknisiä ratkaisuja, jotka takaavat tasapuolisen ja tietoturvallisen datan jakamisen. International Data Space, IDS (<https://www.internationaldataspaces.org/>) on yksi kehitteillä oleva konsepti ja tekninen ratkaisu tähän haasteeseen.

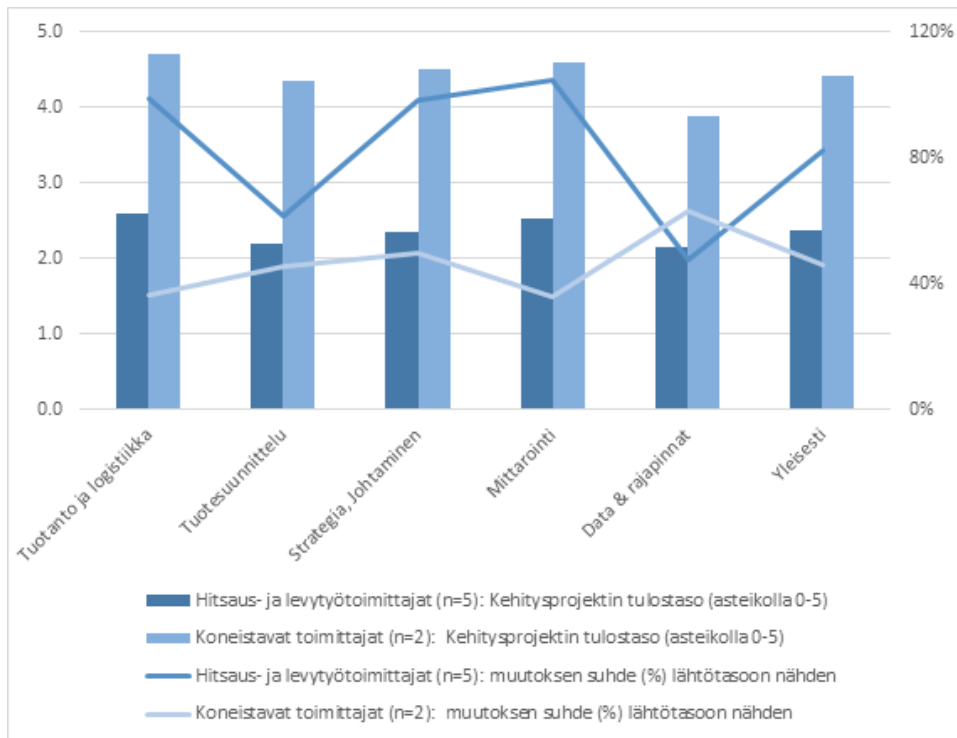
Potentiaalisia hyötyjä ei kuitenkaan saavuteta vain teknologian avulla. Foxin^{xxviii} mukaan uusi hype-teknologia kehystetään tyypillisesti erittäin positiivisesti, mutta toisaalta hyvin löyhästi. Uuden teknologian potentiaalisia hyötyjä korostetaan, kun taas niitä mahdollistavia edellytyksiä ja mahdollisia negatiivisia vaikutuksia vähätellään tai jätetään huomiotta. Ihmiset joutuvat muodostamaan subjektiivisen käsityksen siitä mitä uusi teknologia on ja mitä sillä pystyy tai ei pysty todellisuudessa tekemään^{xxix, xxx}.

Toimitusketjun digitaaliset kaksoset, mallipohjaisuus ja laatu tulee ymmärtää tasapainoisesti ja kokonaisvaltaisesti myös organisaatioon, verkostoon ja kulttuuriin vaikuttavina konsepteina. Niiden vaikuttava soveltaminen vaatii motivaatiota, osaamisen kehittämistä ja kypsyystason nostoa. Se vaatii myös organisaatioiden, verkostojen ja prosessien uudelleensuunnittelua, tietomallien ja -arkkitehtuurien kehittämistä sekä tuotemallien rikastamista ja nostamista liiketoimintaprosessien keskiöön. Ennen kaikkea se vaatii lisääntyvää datan jakamista toimijoiden kesken. Tämä edellyttää datan ja informaation arvottamista, tasapuolista arvon jakamista ja uusia liiketoimintamalleja. Muutos ei luonnollisesti tapahdu hetkessä, vaan se on hyvää muutosjohtamista vaativa pitkäaikainen prosessi. Muutos sisältää lukuisia tekijöitä ja niiden väliset vuorovaikutukset suhteessa kokonaishyötyihin ovat monimutkainen kysymys. Siksi muutoksen ja sen kohteena olevan järjestelmän suunnittelu vaatii uusia lähestymistapoja. Tätä pohditaan myöhemmissä luvuissa lisää.

Ruokosen^{xxxi} mukaan digitaalisten kaksosten hyödyntämisen haasteina koko tuotteen elinkaaren aikana ovat ainakin elinkaaren eri vaiheissa erilliset toimintaprosessit ja IT-järjestelmät, mutta erityisesti myös organisaatiosiiilot ja niiden osaoptimoidut tavoitteet. Ruokosen esittämiä avoimia kysymyksiä ovat lisäksi muun muassa datamallit, se millainen malli sopii mihinkin sovellukseen, standardit, tietojen ylläpito ja omistajuus sekä avoimuuden vaatimukset liittyen esimerkiksi eri toimittajien laitteista käytön aikana syntyvän palautetiedon hallintaan.

4.3 Digitalisaation ja verkostomaisen toiminnan mittaaminen

Verkostojen toiminnan kehittäminen ja digitalisaatio on ollut aiemman tutkimuksen kohde. Esimerkiksi Digital Extended Enterprise -projektissa (Dexter) kartoitettiin viiden levytöihin ja hitsaukseen keskittyvän yrityksen kykyjen ja kypsyyden kehittymistä^{xxvii}. ÄVE WP9:lle Dexter tarjosi vertailuaineiston, jonka avulla hitsattujen levyrakenteita valmistavan verkoston kypsyyden kehittymistä voidaan verrata koneistavien yritysten verkoston tilaan ja kehittymiseen (ks. Kuva 3, vasen laita). Dexter-projektissa tutkittiin kattavan kysymyspatteriston avulla yritysten kehittyneisyyttä ja kyvykkyyksiä asteikolla 1-5. Kyvykkyyksiä tutkittiin useilla osa-alueilla, kuten tuotannossa ja logistiikassa, toimittajayritysten osallistumisessa tuotekehitys- ja -muutosprosesseihin, strategian ja johtamisen osalta, prosessien ja tulosten mittaamista sekä datan käsittelyn, tietojärjestelmien ja toimittajaverkoston välisten rajapintojen kehittyneisyyttä.



Kuva 10 Yritysten kehittyminen eri projekteissa

ÄVE-projektissa tehtiin vastaava kartoitus ja haastateltiin kahta verkoston koneistavaa yritystä. Vaikka otos on pieni, voidaan todeta, että koneistavat yritykset ovat pidemmällä kuin levytöitä tekevät yritykset kaikilla osa-alueilla. Kuva 10 Kuva 7. palkeilla esitetään keskimääräistä kypsyyttä (mittakaava 0-5 vasemmanpuoleisella pystyakselilla) ja suhteellista muutosvaikutusta yhtenäisellä viivalla. Muutosvaikutus on muutoksen suhde prosentteina lähtötilaan nähden – mittakaava oikeanpuoleisella pystyakselilla. Keskimäärin kypsyyttä on koneistavissa yrityksissä noin kaksinkertainen levytöitä tekeviin yrityksiin nähden. Edelleen kehittämisen suhteellinen muutosvaikutus on koneistavissa yrityksissä noin puolet pienempää kuin levytöitä tekevissä yrityksissä.

Esimerkiksi toiminnan seuranta ja mittaaminen sekä tuotannon ja logistiikan kehitys, Lean-toimenpiteet layoutin sekä siisteyden ja järjestyksen parantamisessa sekä tuotantoprosessien virtauksen kehittämässä, johtivat merkittävään kyvykkyyksien kehittämiseen (noin 1 kehitysaskel) levytöitä tekevissä yrityksissä. Sen sijaan koneistavat yritykset olivat mm. näissä kohteissa huomattavasti pidemmällä jo lähtökohtaisesti, eivätkä kehittäneet näitä osa-alueita yhtä merkittävästi suhteessa lähtötasoon. Toisaalta tämä tarkoittaa myös sitä, että vakiintuneiden käytäntöjen ja toimintatapojen kehittäminen on edistyneissä yrityksissä haastavaa. Koneistavien yritysten kehityshankkeissa suhteellinen kypsyyssaste muuttui ainoastaan tietojenkäsittelyn ja rajapintojen osalta levytöitä tekeviä yrityksiä enemmän.

Molempien tutkimusten otanta oli pieni ja erityisesti jälkimmäinen on luonteeltaan laadullinen haastattelututkimus, koska siinä ei verrattu kyvykkyyksien kehittämistä kvantitatiivisiin suoritusmittareihin, kuten Dexter-projektissa tehtiin. Tulosten luotettavuuteen täytyy suhtautua varauksella, koska pienellä otannalla voivat yksittäisen kysymyksen ja vastauksen tulkinta sekä siinä tehdyt virheet olla merkittävät. Näyttäisi kuitenkin siltä, että koneistavilla alihankintayrityksillä on merkittävimmät saavutettavissa olevat kehitysaskleet tietojenkäsittelyssä ja integroinnissa verkostotasolla. ÄVE-alihankintayritykset myös havaitsivat tämän ja ryhtyivät projektin aikana toimenpiteisiin. Lisäksi potentiaalia on ollut olemassa ja kehitysaskelaita on ÄVE-projektissa saavutettu siinä, kuinka koneistava yritys kehittää strategiaansa ja johtaa toimintaa osana verkostoa.

5. Pohdinta

Tässä luvussa pohditaan toisaalta tulosten luotettavuutta ja toisaalta niiden merkittävyyttä valmistavan teollisuuden ekosysteemien kontekstissa.

ÄVE-projektissa oli alun perin tavoitteena muodostaa tapaustutkimuksena toimitusketjun digitaalinen kaksonen projektissa yhteistyössä mukana olevien yritysten kanssa. Korona-pandemiasta ja luottamuksellisuudesta johtuen, kattavaa dataa toimitusketjuista ei ollut mahdollista saada tutkimuksen käyttöön. Tämän takia MetroFade-case otettiin mallintamisen kohteeksi. MetroFadesta tehtiin prosessimalli ja laadullinen systeemidynaaminen malli. Työ aloitettiin kuitenkin niin myöhään, ettei kvantitatiiviseen malliin ja simulointiin ollut mahdollisuutta. Vaikka tuotantoketjun datavirrat eivät olleet MetroFade projektin fokuksessa, niin teolliselle tuotannolle ja alihankintaketjuille luonteenomaiset vahvuudet, kyvykkyydet, tai ongelmat tulivat esimerkinomaisina esiin.

Haastatteluiden ja tehtyjen kypsyysmallien perusteella voitiin havaita, että pidemmälle edetessä kehitysaskelien ottaminen käy entistä haastavammaksi (ks. Kuva 10). Poikkeus tästä on yritysten välinen digitalisaatio ja vuorovaikutus verkoston rajapinnoilla, missä ÄVE-projektissa saavutettiin suhteellisesti suurin kehitysaskel. Havainto vahvistaa ÄVE-projektin tavoitteen: projektissa panostettiin suunnittelun ja valmistuksen vuorovaikutukseen, mm. mallipohjaiseen tuotemäärittelyyn. Näin ainakin systeemidynaamisen mallin kahdella ensimmäisellä abstraktiotasolla (*Fyysinen tuote ja sen valmistus sekä Tuotetieto ja sen virtaus*) voidaan todeta kehitystä tapahtuneen ÄVE-projektissa. Tosin toiminta ja digitalisaation hyödyntäminen verkoston rajapinnoilla on edelleen muita kyvykkyyksiä alhaisemmalla kypsyystasolla, minkä vuoksi siihen on syytä edelleen panostaa.

Edellä esitetystä herää luonnollisesti kysymys: kuinka samankaltainen voi VTT:n tutkimusprojekti ja siitä tehty malli olla yritysten toiminnan kanssa? Tässä tutkimuksessa eri valmistusteknologioihin keskittyneitä yrityksiä voitiin arvioida ja verrata samankaltaisella menetelmällä. Hitsattavan ja koneistettavan osan valmistusverkostot toimivat siten pääpiirteissään samoilla tavoilla. Käytännössä myös MetroFade-projektin prosessikuvaus vastaa pääpiirteissään niitä prosesseja, joita ÄVE-yrityksissä ja niiden välillä suoritetaan uusien suunnitelmien, hankintojen ja valmistuksen myötä jatkuvasti. Näin tutkitun aineiston suhteen samankaltaisia vuorovaikutuksia ja riippuvuuksia esiintyy käytännössä toistuvasti joko uusien tai muuttuneiden tuotesuunnitelmien myötä.

Tutkimusote oli tyypiltään ”tutkimusmatka”. Uutta aihetta ja vauhdilla kehittyvää konseptia, toimitusketjun digitaalista kaksosta, tutkittaessa pitää ensin selvittää missä ollaan lähtötilanteessa, eikä lopputuloksesta tai reitistikään ole aloitettaessa varmuutta. Hanke oli kuitenkin hyvä avaus aiheeseen, josta toivottavasti poikii jatkotutkimuksia ja yhteisprojekteja yritysten ja tutkimuslaitosten kesken. Tutkimusote oli sen tyyppinen, että tuloksia ja menetelmiä on vaikea erottaa toisistaan. Menetelminä olivat tapaustutkimukset ja niiden pohjalta tehdyt mallinnukset, jotka ovat myös tutkimuksessa syntyneitä tuloksia.

5.1 Datan jakaminen ja datan arvo

Työpaketin hypoteesina oli, että toimitusketjun digitaalinen kaksonen edistää datan virtausta eri toimijoiden ja toimintojen välillä, mikä puolestaan parantaa läpinäkyvyyttä, ohjattavuutta, suorituskykyä ja laatua koko toimitusketjun tasolla. Suorituskyvystä voidaan edelleen johtaa datalle arvoa luovia mekanisme. Arvon tasapuolinen jakaantuminen on luottamuksen ja suorituskyvyn edellytys. Mutta miten datan arvoa luodaan? Tätä on pohdittu enemmän myös LinkedIn postauksessa: (<https://www.linkedin.com/pulse/datan-ja-sen-arvon-jakaminen-%C3%A4pi-tuotteen-elinkaaren-leino/>).

Tuotetiedon arvo on hyvin suhteellista, tilanteesta riippuvaista, dynaamista ja sidottu tiettyihin tuotteisiin, prosesseihin ja tiedon käyttäjiin. Siksi arvoa ei myöskään voida yleensä mitata

samalla tavalla kuin esimerkiksi kuluttajien käyttäytymiseen liittyvän data arvoa. Suunnittelu ja tuotekehitys ovat esimerkkejä prosesseista, jotka tuottavat, hyödyntävät ja jalostavat dataa tuottaen dokumentaatiota hyödynnettäväksi valmistuksessa ja myöhäisemmissä elinkaaren vaiheissa. Tuotetiedon arvo siis luodaan elinkaaren alkupäässä, mutta se realisoidaan vasta vuosien tai vuosikymmenien aikana ja mahdollisesti toisissa organisaatioissa. Lisäksi data ja tuotetieto ovat yleensä hajallaan yritysverkostoissa. Dataa pitäisi siis jakaa enemmän yritysverkostoissa arvon luomiseksi, mutta datan arvon mittaamiseen ja arvon jakamiseen liittyvät pulmat vähentävät halukkuutta sen jakamiseen. Yrityksillä on toki myös ydinliiketoiminnan kannalta niin kriittistä tuotetietoa, ettei sen jakaminen ole mahdollista.

Mikä on ehto sille, että yritykset uskaltavat olla avoimia ja läpinäkyviä? Voiko tiedon jakava yksilö tai organisaatio olla varma, ettei jaettua tietoa käytetä väärin tai hänen / heidän etujaan vastaan? Entä millä ehdoilla yksilö tai organisaatio jakaa julkista ja luottamuksellista tietoa? Miten luottamus rakentuu? Esimerkiksi tekoälyä voitaisiin hyödyntää kysynnän ennustamiseen ja tuotantokapasiteetin optimointiin, sekä datan automaattiseen jalostamiseen. Tämä kuitenkin vaatii paljon enemmän datan ja tuotetiedon jakamista yritysten kesken. Datan jakaminen taas edellyttää selkeitä malleja datan arvottamiseen, arvon tasapuoliseen jakamiseen toimijoiden kesken ja asiasta sopimiseen. Todennäköisesti markkinoille tarvitaan myös toimijoita, jotka huolehtivat datan yhdistämisestä, jalostamisesta ja jakamisesta. Jakaminen vaatii myös tekniikan ja organisaatioiden kypsyytasojen kehittämistä.

5.2 Toimitusketjun digikaksosen suunnittelu ja simulointi

Mitä kaikkea arvoa datalla voisi olla liiketoiminnassa, jos sitä jaetaan nykyistä enemmän? Minkälainen järjestelmä sen mahdollistaa? Miten järjestelmä pitäisi suunnitella? Mitä itse asiassa tarkoitetaan suunnittelulla (design)? Suunnittelu on ongelman ymmärtämiseen ja ratkaisuun liittyvää toimintaa^{xxxii}. Teknisten järjestelmien lisäksi suunnittelun kohteita ovat mm. organisaatiot, toimitusketjut, talousjärjestelmät, jne. Suunnittelun tutkimus (design science) on toisen maailmansodan jälkeen vähitellen jäänyt luonnontieteen jalkoihin, koska varsinkin tekniikan saralla suunnittelun opettaminen on usein annettu insinöörikoulutuksen (engineering) tehtäväksi. Insinöörikoulutus on kuitenkin ollut pitkään luonnontiedelähtöistä (fysiikka, kemia, matematiikka). Tämä on ongelma kokonaisvaltaisen suunnittelun ja kompleksisuuden hallinnan näkökulmasta. Kaikki keinotekoinen ei noudata luonnonlakeja. Tämä on merkittävää siksi, että toimitusketju ja sen digitaalinen kaksonen vaativat hyvin poikkitieteellistä suunnitteluotetta. Suuntaus on johtunut paljolti siitä, että yliopistojen akateemisessa arvioinnissa, ja sitä kautta rahoituksessa on alettu painottaa analyyttisyyttä, formaalisuutta, mitattavuutta, jne. Laajasti ymmärretty suunnittelutiede näyttää luonnontieteilijästä ja insinööristäkin pehmeältä, intuitiiviselta, epäformaalilta, keittokirjamaiselta, satunnaisuutta sisältävältä, luovuuden ja taiteen kanssa flirttailevalta. Nämä ominaisuudet eivät kuitenkaan ole ristiriidassa hyvän suunnittelun kanssa.

Systeemidynamiikan voi nähdä välineenä suunnitella ja saada aikaan esimerkiksi digitalisaatioon liittyviä systeemisiä muutoksia yrityksissä ja verkostoissa. Systeemidynamiikan avulla voidaan formalisoida ja jopa kvantifioida kompleksisia ja osittain sumeita prosesseja ja rakenteita. Stermanin^{xxi} mukaan suunnittelu on liiketoiminnan johtamisen tärkein osa-alue, vaikka usein se jää vähälle huomiolle, koska johtajat käyttävät eniten aikaa operatiiviseen asioiden hallintaan eli managerointiin.

5.3 Haasteista mahdollisuuksia

Herbert Simonille taloustieteen Nobelin palkinnon vuonna 1979 tuoman "Principle of Bounded Rationality" periaatteen mukaan ihmisen kapasiteetti ymmärtää ja ratkaista ongelmia suhteessa reaali maailman monimutkaisuuteen (complex) on vähäinen^{xxi}. Vaikka

ihmismieli on hämmästyttävä, todellisen maailman monimutkaisuus ylittää sen kognitiiviset kyvyt. Ihminen ei käytännössä pysty simuloimaan mielessään edes yksinkertaista takaisinkytkettyä järjestelmää, puhumattakaan monimutkaisista reaali maailman järjestelmistä. Englannin kielen sana "complex" voidaan kääntää monimutkaiseksi, mutta tässä yhteydessä sillä on eri merkitys kuin englannin kielen sanalla "complicated", joka myös kääntyy monimutkaiseksi. Amaral & Uzzin^{xxxiii} mukaan complicated viittaa (esimerkiksi teknisiin) järjestelmiin, jossa on lukuisia ennalta määrättyjen sääntöjen mukaisesti toimivia komponentteja. Kompleksisissa järjestelmissä komponentit voivat toimia autonomisesti - muuntuvien sääntöjen mukaisesti. Siksi kompleksisia järjestelmiä, kuten organisaatioita tai toimitusketjuja, ei saisi tarkastella lineaarisina kausaalisisina järjestelminä. Systeemidynamiikassa Sterman^{xxi} tekee vielä eron kombinatorisen kompleksisuuden (neula heinäsuovasta, lentoaikataulujen optimointi, jne.) ja dynaamisen kompleksisuuden välillä, joka voi ilmetä detaljien suhteen verrattain yksinkertaisissakin järjestelmissä. Esimerkiksi MetroFade-case on prosessina näennäisen yksinkertainen, mutta systeemidynaamisessa mielessä ja korkea valmistuslaatu tavoitteena, se on monimutkainen järjestelmä. Samalla tapaa laadukkaan komponentin elinkaaren alkuvaihe suunnittelusta hankintoihin, koneistukseen ja tarkastukseen, sekä asiakkaalle toimitettuun osatuotteeseen on monimutkaisen järjestelmän yksi tulos. Muita tuloksia ovat mm. prosessiin käytetty aika ja raha sekä nykyisin yhä merkittävämmäksi nousseet energia ja prosessin tuottamat päästöt. Järjestelmää voidaan myös tarkastella lisäarvon, hyvinvoinnin ja kansantuotteen tuottajana.

On siis hyvä ymmärtää kompleksisuuden haasteet suunniteltaessa (mm. tieto-, materiaali-, rahavirtojen suhteen) takaisinkytkettyjä järjestelmiä ja prosesseja, kuten toimitusketjujen digitaalisia kaksosia. Kyky hahmottaa niissä ajan kuluessa tapahtuvia vuorovaikutteisia ilmiöitä ilman simulointia on vaikeaa. Haasteena on se, että ihmisillä on yleensä tapahtumapohjainen, nykyhetkeen keskittyvä ja avoimen ohjauspiirin maailmankuva, josta puuttuu ymmärrys takaisinkytkennöistä, viiveistä toimenpiteen ja vaikutuksen välillä, epävarmuudesta ja epälineaarisuudesta. Tämä näkyy parhaillaan esimerkiksi Koronapandemian uutisoinnissa. Ihmisillä on taipumus ajatella, että jokaisella seurauksella on vain yksi aiheuttaja. Toisaalta olemme laiskoja kehrittelemään vaihtoehtoja selityksiä tai kilpailevia hypoteeseja. Laadukas ja vaikuttava päätöksenteko maailmassa, jossa dynaaminen kompleksisuus kasvaa, vaatii kokonaisvaltaista holistista maailmankuvaa, systeemiajattelua ja mentaalimallien laajentamista poikkitieteellisesti. Monet kokemamme ongelmat ovat aiemmista päätöksistä ja teoista johtuvia välillisiä seurauksia. Usein tekemämme ratkaisut itse asiassa pahentavat ongelmia tai luovat uusia ongelmia. Ei pitäisi muuttaa vain yhtä asiaa (esim. ottaa käyttöön yksittäistä teknologiaa) ilman että huomioidaan sen vaikutusta muihin tekijöihin.

Kompleksisuuden kanssa pärjääminen vaatii poikkitieteellisyyttä, ennakkoluulotonta oppimista muilta aloilta, sekä näitä aloja yhdistäviä generalisteja. Poikkitieteellisyys on prosessi, joka etenee monitieteellisyydestä asteittain kohti integraatiota, jossa ratkaistaan yhteistä monitahoista ongelmaa yhteisen käsitteistön ja terminologian avulla. Tähän liittyvät myös tieteenfilosofiset näkökulmat jotka voivat olla erilaisia luonnontieteisiin pohjautuvissa ja muissa koulukunnissa^{xxxiv}.

6. Johtopäätökset

Työn tutkimusote oli sen tyyppinen, että tuloksia ja menetelmiä on vaikea erottaa toisistaan. Menetelminä olivat tapaustutkimukset ja niiden pohjalta tehdyt mallinnukset, jotka ovat myös tutkimuksessa syntyneitä tuloksia. Tulosten pohdinta on itse asiassa tutkimuksen mielenkiintoisinta osuutta. Pohdinnoista voidaan johtaa seuraavia havaintoja, oppeja ja johtopäätöksiä.

6.1 Havainnot - mitä opittiin?

Tutkimushankkeen tavoitteena oli rakentaa läpinäkyvä ja oppiva toimitusketju ja sen digitaalinen kaksonen. Kantavana periaatteena oli toimitusketjun neutraali tarkastelu ja mallintaminen sekä digitalisaatioon liittyvän transformaation kokonaisvaltainen edistäminen. Varsinkin tapaustutkimuksen tavoitteena oli hahmottaa uudenlaisia digitalisaatiota soveltavia prosesseja laadun parantamiseksi ja kustannusten vähentämiseksi. Prosesseja mallintamalla tutkittiin, miten epävarmuutta kuljetetaan prosessien läpi ja mistä laatuongelmat ja poikkeamat johtuvat. Tuloksena syntyivät prosessikuvaus MetroFade-projektissa suoritetusta tilaus-toimitus-prosessista, sekä systeemidynaaminen malli laatuun vaikuttavista tekijöistä. Toimitusketjuun sisältyy laatuun negatiivisesti vaikuttavia epävarmuuksia johtuen mm. epäoptimaalisesta tiedonkulusta eri toimijoiden välillä. Tiedon laatu ja jouheva virtaaminen, mallipohjaisuus sekä prosessien etupainotteisuuden lisääminen ovat merkittäviä tekijöitä epävarmuuden vähentämiseen, lopullisen valmistuslaadun parantamiseen ja kokonaiskustannusten vähentämiseen.

Mallipohjaisuuden ja etupainotteisuuden lisäksi digitalisaatio vaatii informaation jakamista toimintojen ja organisaatioiden välillä, koska käytännössä kaikki tuote- ja tuotantoprosessit tapahtuvat nykyisin verkostomaisessa liiketoiminnassa. Datan jakamiseen liittyy kuitenkin teknisten ongelmien lisäksi haasteita liittyen kustannusten ja arvon jakamiseen sekä tietysti tietoturvaan ja luottamuksellisuuteen liittyvät seikat. Datan lisääntynyt jakaminen edellyttää datan ja informaation arvottamista, tasapuolista arvon jakamista ja uusia liiketoimintamalleja. Muutos ei luonnollisesti tapahdu hetkessä, vaan se on hyvää muutosjohtamista vaativa pitempiaikainen prosessi. Muutos sisältää lukuisia tekijöitä ja niiden väliset vuorovaikutukset suhteessa kokonaisuhyötyihin ovat monimutkaisia. Siksi muutoksen ja sen kohteena olevan järjestelmän suunnittelu vaatii uusia lähestymistapoja.

Mallipohjainen tuotemäärittely ja mallipohjaiset prosessit mahdollistavat periaatteessa tavoitteena olevan tiedon laadun kehittymisen ja sitä kautta välillisesti laadun paranemisen ja kokonaiskustannusten vähenemisen. Tiedon jakaminen ja takaisinkytketyt tietovirrat rikastavat tuotemalleja ja kumuloivat tietämystä tuoteprosesseihin ja toimitusprosesseihin, sekä mahdollistavat paremmin tilastollisten laadunkehitysmenetelmien hyödyntämisen. Digitaalisten kaksosten ja digitaalisten säikeiden (thread) voidaan katsoa olevan mallipohjaisuuteen perustuvia välineitä tiedon virtauksen parantamiseen. Näiden verrattain uusien konseptien taustalla on vakiintuneempaa tuotetiedon hallinnan (EDM/PDM) ja tuotteen elinkaaren hallinnan (PLM) metodiikkaa ja järjestelmiä.

Digitalisaation odotettua hitaampi edistyminen teollisuudessa johtuu ainakin osittain puutteellisesta kyvystä hahmottaa kokonaiskuvaa ja systeemiä vaikutuksia tai edellytyksiä. Potentiaalisia hyötyjä ei saavuteta vain teknologian avulla. Takaisinkytkettyjä kompleksisia järjestelmiä, kuten organisaatioita tai toimitusketjuja, ei saisi tarkastella lineaarisina kausaalisina järjestelminä. Toimitusketjujen digitaaliset kaksoset, mallipohjaisuus ja laatu tulee ymmärtää tasapainoisesti, ja kokonaisvaltaisesti myös organisaatioon, verkostoon ja kulttuuriin vaikuttavina konsepteina. Näissä prosessimallinnus ja systeemidynamiikka voivat auttaa. Toimitusketjun ja digitaalisten kaksosten suunnittelu vaativat poikkiteollista suunnitteluotetta. Prosessimallinnuksen avulla ymmärretään miten nykyiset prosessit todellisuudessa toimivat ja päästään pureutumaan niissä mahdollisesti ilmeneviin pullonkauloihin. Systeemidynamiikan avulla voidaan mallintaa ja simuloida ongelmien vaikutuksia pitkällä aikavälillä ja toisaalta arvioida päätöksenteon ja muutosten edellytyksiä ja vaikutuksia kokonaisvaltaisesti. Systeemidynamiikalla päästään myös jollain tasolla käsiksi datan jakamisen ja mallipohjaisuuden kustannuksiin, säästöihin ja tuottoihin, jolloin niille voidaan laskea arvo. Kustannusten, hyötyjen ja arvon tasapuolinen jakaminen taas mahdollistaa toimitusketjutason optimoinnin ja liiketoiminnan kehittämisen.

Tämä julkaisu pyrkii lisäämään eri sidosryhmien tietoisuutta tuotannon ja toimitusketjujen digitaalisista kaksosista, prosessimallinnuksesta ja systeemidynamiikasta valmistavan teollisuuden toimitusketjujen ja laatu prosessien kontekstissa, sekä pohtii

suunnittelututkimuksen merkitystä ja sitä, miten digitalisaatiota ja mallipohjaisuutta hyödyntävät em. systeemit pitäisi suunnitella kokonaisvaltaisesti.

6.2 Toimenpide-ehdotuksia ja jatkotutkimusaiheita

Todellisiin arvoverkkoihin toimitusketjuihin liittyvät tapaustutkimukset vaativat mukana olevien toimijoiden avoimuutta ja sitoutumista yhteiskehittämiseen ja tarvittavan tiedon jakamiseen. Tapaustutkimukseen olisi hyvä saada mukaan kattavasti niitä toimijoita, jotka osallistuvat jonkin tuotteen, osakoonpanon tai komponentin suunnitteluun, kehittämiseen ja tuotantoon, ja joiden välillä liikkuu tuote- ja tuotantotietoa. Toimijoiden pitäisi sitoutua esimerkiksi prosessikuvausten ja mallien rakentamiseen ja arviointiin. Näitä ei kuitenkaan pitäisi nähdä vain kustannuksina tai panoksina, koska osallistujat hyötyvät työstä mm. oppimalla ja ymmärtämällä toisten näkökulmia ja kehittämällä kokonaiskuvaa sekä kehittämällä verkostoja.

Työpaketissa avainyrityksen (ekosysteemien tutkimuksessa ns. keystone) hankintatoimi ei ollut aktiivisesti mukana. Olennaista liiketoimintaekosysteemien kehittämisessä on aktiivinen toiminta verkoston rajapinnoilla. Tämän takia jatkohankkeissa olisi luontevaa, että strategisen hankintaa kehittävät toimijat osallistuisivat kehityshankkeisiin, vaikkakaan ko. hankkeet eivät olisikaan hankinnan operatiivisen toiminnan keskiössä: esim. tuotemäärity-, laatu- tai mittausdatan jakamisen kehittäminen verkostossa.

Kuva 3 esitti tutkimuksen kulun ja siinä esiintyy tutkimuksen kannalta kolme keskeistä tutkimusmenetelmää: kypsyys- ja prosessimallinnus sekä systeemidynaamisten mallien hyödyntäminen. Näiden erilaisten mallinnustapojen keskinäinen kytkentä voi tulevaisuudessa olla tutkimuksen kohteena. Voitaisiinko kypsyys- ja systeemidynaamiset mallit rakentaa siten, että niissä esiintyisi samoja ulottuvuuksia? Jos kypsyysmallin eri kehitystasot liittyvät systeemidynaamisen malliin ominaisuuksiin, voidaanko jossain vaiheessa fokusoidun kehityshankkeen tulosta simuloida ja ennustaa jo etukäteen systeemidynaamisen mallin avulla? Voisivatko kypsyysmallin kehitystasot kuvata systeemidynaamisen mallin ominaisuuksia siten, että erilaisten todellisten kombinaatioiden simulointi olisi mahdollista? Voitaisiinko näin systeemidynaamisia malleja verifioida ja validoida todellisten tapausten tietojen avulla? Voitaanko simulointimallin avulla ylipäätään valita kehityskohteita? Miten edellämainitut vaikuttaisivat liiketoimintaprosessien rakenteisiin ja prosessien ominaisuuksiin, kuten aikaan ja resurssitarpeisiin? Minkätyyppiset prosessit kuvaisivat erilaisia kypsyystasoja? Jos prosessimalleja käytettäisiin diskreettien tapausten simulointiin (discrete event simulation) ja prosesseihin vaikuttavia kehitys- ja kypsyystasomuutoksia systeemidynaamiseen simulointiin, mitä voitaisiin oppia näistä kahdesta näennäisen erilaisesta mallinnus- ja simulointitavasta, niiden yhteyksistä ja eroavuuksista?

7. Yhteenveto

Julkaisun tarkoituksena on raportoida ”ÄVE Älykäs valmistus ekosysteemissä” -projektin työpaketin ”Toimitusketjun digitaalinen kaksonen” tuloksia, lisätä sidosryhmien tietoisuutta toimitusketjujen digitaalisista kaksosista, prosessimallinnuksesta ja systeemidynamiikasta, sekä pohtia miten digitaalisuutta ja mallipohjaisuutta hyödyntävät järjestelmät pitäisi suunnitella kokonaisvaltaisesti. Toimitusketjujen digitaaliset kaksoset perustuvat lisääntyneeseen vertikaaliseen ja horisontaaliseen datan virtaamiseen.

Tutkimusote oli laadullinen ja tutkimusmenetelminä sovellettiin case-tutkimusta sekä prosessi- ja systeemidynamiikka mallinnusta. Case-tutkimuksessa mallinnettiin ja analysoitiin ÄVE Sandvik -ekosysteemiä ja kahta VTT:n omaraahoitteista projektia. Prosesseja mallintamalla tutkittiin, miten epävarmuutta kuljetetaan prosessien läpi ja mistä laatuongelmat ja poikkeamat johtuvat. Systeemidynamiikan avulla mallinnettiin laatuun vaikuttavia tekijöitä. Tiedon laatu ja jouheva virtaaminen ovat merkittäviä tekijöitä epävarmuuden vähentämiseen, lopullisen valmistuslaadun parantamiseen ja kokonaiskustannusten vähentämiseen.

Tutkimus tuotti vain vähän konkreettisia muutos- ja kehitystoimenpiteitä, mutta sitäkin enemmän uusia ideoita ja esitteli mahdollisuuksia. Esitellyillä menetelmillä on mahdollista kuvata ja simuloida liiketoiminnassa tehtäviä valintoja ja niiden seurauksia. Esimerkiksi mitä seurauksia olisi sillä, jos hankitaan komponentti yksikkökustannuksiltaan edullisemmalta, mutta kyvykkyyksiltään heikommalta toimittajalta kuin jos hankinta kohdistuu kyvykkyyksiltään parempaan toimittajaan, jonka hintataso on korkeampi? Entä mikä voisi olla yritysten välisen vuorovaikutuksen, joka voi koskea tuotetta, tietoa tai päätöksentekotapoja, ominaisuuksilla toimittajan tuotelaatuun?

Mallipohjainen tuotemäärittely ja mallipohjaiset prosessit mahdollistavat periaatteessa tavoitteena olevan tiedon laadun kehittymisen ja sitä kautta välillisesti laadun paranemisen ja kokonaiskustannusten vähenemisen. Digitaalisten kaksosten ja säikeiden voidaan katsoa olevan mallipohjaisuuteen perustuvia välineitä tiedon virtauksen parantamiseen. Digitalisaatiossa on tärkeää myös määritellä ekosysteemin tiedonhallintaprosessit, -menettelyt ja -järjestelmät, jotta kaikilla osapuolilla on käytössään ne tiedot, joihin käyttöoikeudet on annettu, ja jotta tiedot ovat yksikäsitteisiä, täydellisiä, ajantasalla ja oikein määriteltä.

Digitalisaation odotettua hitaampi edistyminen teollisuudessa johtuu ainakin osittain puutteellisesta kyvystä hahmottaa kokonaiskuvaa ja systeemiä vaikutuksia. Jotta digitalisaatiosta saadaan irti potentiaalinen hyöty, pitää ymmärtää, että se ei tarkoita pelkkää tekniikkaa. Tekniikan ohella pitää todennäköisesti suunnitella ja toteuttaa uusia prosesseja, organisaatioita, kouluttaa ihmisiä, päivittää IT-infrastruktuuria, integraatioita ja tietomalleja, jne. Myös näissä prosessimallinnus ja poikkitieteellinen systeemidynamiikka voivat auttaa.

Lähdeviitteet

- i Lapinleimu, I. (2000). *Ideaalitehdas*. (Tampereen teknillinen korkeakoulu, Tuotantotekniikan laitos, Raportti; Nro 50). Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu.
- ii Cochran, D.S., Arinez, J.F., Duda, J.W., Linck, J. (2001) A decomposition approach for manufacturing system design, *Journal of Manufacturing Systems*, Volume 20, Issue 6, pp. 371-389, [https://doi.org/10.1016/S0278-6125\(01\)80058-3](https://doi.org/10.1016/S0278-6125(01)80058-3).
- iii Kariniemi, O-P. (2014) Rinnakkaisten tuotenäkymien hyödyntäminen teknologiateollisuudessa. Diplomityö, <http://urn.fi/URN:NBN:fi:tyy-201408271406>
- iv Michaelis, M.T., Johannesson, H., ElMaraghy, H.A. (2015) Function and process modeling for integrated product and manufacturing system platforms, *Journal of Manufacturing Systems*, Volume 36, pp. 203-215, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.06.012>.
- v Andreasen MM (2011) 45 Years with design methodology. *J Eng Des* 22(5):293–332. DOI: [10.1080/09544828.2010.538040](https://doi.org/10.1080/09544828.2010.538040)
- vi Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In *Transdisciplinary perspectives on complex systems* (pp. 85-113). Springer, Cham.
- vii Rasheed, A., San, O., & Kvamsdal, T. (2020). Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective. *IEEE Access*, 8, 21980-22012. Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2020.2970143
- viii Schleich, B., Anwer, N., Mathieu, L., & Wartzack, S. (2017). Shaping the digital twin for design and production engineering. *CIRP Annals*, 66(1), 141-144. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.040>
- ix Lu, Y., Liu, C., Kevin, I., Wang, K., Huang, H., & Xu, X. (2020). Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 61, 101837. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101837>
- x Zheng, Y., Yang, S., & Cheng, H. (2019). An application framework of digital twin and its case study. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 10(3), 1141-1153. <https://doi.org/10.1007/s12652-018-0911-3>
- xi Autiosalo, J., Vepsäläinen, J., Viitala, R., & Tammi, K. (2019). A feature-based framework for structuring industrial digital twins. *IEEE Access*, 8, 1193-1208. DOI 10.1109/ACCESS.2019.2950507
- xii Negri, E., Fumagalli, L., & Macchi, M. (2017). A review of the roles of digital twin in cps-based production systems. *Procedia Manufacturing*, 11, 939-948.
- xiii Stark, R., Kind, S., Neumeyer, S. (2017) Innovations in digital modelling for next generation manufacturing system design, *CIRP Annals*, Volume 66, Issue 1, pp. 169-172, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.045>.
- xiv Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. (2018). Digital twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2405-2415. Digital Object Identifier 10.1109/TII.2018.2873186
- xv Ivanov, D., Dolgui, A., Das, A., & Sokolov, B. (2019). Digital supply chain twins: Managing the ripple effect, resilience, and disruption risks by data-driven optimization, simulation, and visibility. In *Handbook of ripple effects in the supply chain* (pp. 309-332). Springer, Cham.
- xvi Uhlemann, T. H. J., Lehmann, C., & Steinhilper, R. (2017). The digital twin: Realizing the cyber-physical production system for industry 4.0. *Procedia Cirp*, 61, 335-340. doi: 10.1016/j.procir.2016.11.152
- xvii Chen, Z., Huang, L. (2021) Digital twins for information-sharing in remanufacturing supply chain: A review, *Energy*, Volume 220, 2021, 119712, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119712>.
- xviii Gowda, A. B., & Subramanya, K. N. (2017). A Study of Bullwhip Effect and Its Impact on Information Flow in Cloud Supply Chain Network. *IUP Journal of Supply Chain Management*, 14(3), 49-65.
- xix Chen, S., Pan, Y., Chen, L., & Wu, D. D. (2020). A System Dynamics Model for Capacity Planning of Component Supply in Complex Product Manufacturing. *IEEE Systems Journal*. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSYST.2019.2950627>
- xx Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & information systems engineering*, 6(4), 239-242. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>
- xxi Sterman, John (2000) *System Dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*
- xxii Herrera, H., & Kopainsky, B. (2020). Using system dynamics to support a participatory assessment of resilience. *Environment Systems and Decisions*, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s10669-020-09760-5>

-
- xxiii Li, H., Pedrielli, G., Lee, L. H., & Chew, E. P. (2017). Enhancement of supply chain resilience through inter-echelon information sharing. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 29(2), 260-285. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10696-016-9249-3>
- xxiv Singh, R. K., Modgil, S., & Acharya, P. (2019). Assessment of supply chain flexibility using system dynamics modeling. *Global Journal of Flexible Systems Management*, 20(1), 39-63. <https://doi.org/10.1007/s40171-019-00224-7>
- xxv Olivares-Aguila, J., & ElMaraghy, W. (2020). System dynamics modelling for supply chain disruptions. *International Journal of Production Research*, 1-19. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1725171>
- xxvi Frazzon, E., Tortorella, G. L., Dávalos, R., Holtz, T., & Coelho, L. (2017). Simulation-based analysis of a supplier-manufacturer relationship in lean supply chains. *International Journal of Lean Six Sigma*. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJLSS-03-2016-0009>
- xxvii Pulkkinen, A., Anttila, J-P., Leino, S-P. (2019) Assessing the maturity and benefits of digital extended enterprise, *Procedia Manufacturing*, Volume 38, 2019, Pages 1417-1426, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.146>.
- xxviii Fox, S. (2013). Getting real about ICT. *Management Research Review*. DOI: <https://doi.org/10.1108/01409171311306427>
- xxix Fox, S. (2011), "Factors in ontological uncertainty related to ICT innovations", *International Journal of Managing Projects in Business*, Vol. 4 No. 1, pp. 137-149. <https://doi.org/10.1108/17538371111096935>
- xxx Fox, S. (2012), "Getting real about innovations: Formulating innovation descriptions that can reduce ontological uncertainty", *International Journal of Managing Projects in Business*, Vol. 5 No. 1, pp. 86-104. <https://doi.org/10.1108/17538371211192919>
- xxxi Ruukonen, T. (2020). Teollisuusprosessien Digital Twins – mahdollisuudet analytiikassa ja elinkaaren hallinnassa. Automaatioväylä. http://www.automaatiiovayla.fi/wp-content/uploads/2020/11/Automaatiiovayla_5_2020.pdf
- xxxii Simon, Herbert. (1996). *The Sciences of the Artificial* (3rd ed., 231 p.). Cambridge, MA: The MIT Press
- xxxiii Amaral, L. A. N., & Uzzi, B. (2007). Complex systems—A new paradigm for the integrative study of management, physical, and technological systems. *Management science*, 53(7), 1033-1035
- xxxiv Aagaard-Hansen, J. (2007). The challenges of cross-disciplinary research. *Social epistemology*, 21(4), 425-438.

Liite 1. MetroFade projektin toimitusketjusta laadittu uimaratakaavio

