

# **Konesuunnittelun 3D mallien yksinkertaistaminen virtuaaliseen käyttöön**

LAB-ammattikorkeakoulu  
Insinööri (AMK), Konetekniikka  
2021  
Ville Tirkkonen

## Tiivistelmä

Tekijä(t) Tirkkonen, Ville	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Valmistumisaika 2021
	Sivumäärä 46	
Työn nimi <b>Konesuunnittelun 3D mallien yksinkertaistaminen virtuaaliseen käyttöön</b>		
Tutkinto ja koulutusala Insinööri (AMK), konetekniikan koulutus		
Toimeksiantajan nimi, titteli ja organisaatio Dieffenbacher Panelboard Oy		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli yksinkertaistaa konesuunnittelun 3D-mallit virtuaalista käyttöönottoa varten. Toimeksiantajana työlle toimi Dieffenbacher Panelboard OY. Virtuaalisen käyttöönnoton kohteena oli levynkäsittelylinja, joka sisälsi 36 erilaista laitetta ja mallia. Mallien yksinkertaistaminen oli virtuaalisen käyttöönnoton kannalta tärkeää, sillä yksityiskohtaisia malleja ei voitu käyttää suorituskykyongelmien takia.</p> <p>Teoreettinen osuus käsittelee virtuaaliseen käyttöönottoon oleellisesti liittyviä aihealueita ja ilmiöitä. Teoreettisen osuuden tavoite on antaa lukijalle selkeä kuva siitä, mitä tarkoitetaan simulaatiolla, digitaalisella kaksosella ja virtuaalisella käyttöönnotolla, sekä kuinka ne liittyvät toisiinsa.</p> <p>Käytännön osuutta käsittelevässä osassa kuvataan levynkäsittelylinjan toiminta, sekä mallien käsittelyprosessi Creo Parametric ohjelmaa käyttäen. Lisäksi kuvataan virtuaaliseen käyttöönottoon käytetyt ohjelmat, niiden yhteistoiminta ja simulaatorakenne. Näiden lisäksi kuvataan myös käsittelyprosessia käyttäen Creo Direct ja 3D Evolution ohjelmistoja, jotka mahdollistavat mallien tehokkaamman käsittelyn.</p> <p>Opinnäytetyön lopputuloksena saavutettiin toimivat yksinkertaistetut mallit, joita käytettiin hyväksi virtuaalisessa käyttöönnotossa. Malleilla on myös muita mahdollisia käyttökohteita, joten niiden hyöty ei rajaudu pelkästään virtuaaliseen käyttöönottoon.</p>		
Asiasanat Virtuaalinen käyttöönotto, Digitaalinen kaksonen, 3D mallinnus, Teollisuus 4.0		

## Abstract

Author(s) Tirkkonen, Ville	Type of Publication Thesis, UAS	Published 2021
	Number of Pages 46	
Title of Publication Simplifying machine design 3D models for virtual start-up		
Degree and field of study Bachelor of Engineering, Mechanical Engineering		
Name, title and organisation of the client Dieffenbacher Panelboard Oy		
Abstract <p>The goal of the thesis was to simplify machine design 3D models for virtual commissioning. The client for the thesis was Dieffenbacher Panelboard OY. In this case, the virtual commission included the raw board handling line, which has 36 different machines and models. Simplified models are important part of the virtual commission as usage of the detailed models will cause performance problems.</p> <p>Theoretical part of the thesis covers topics and phenomena relevant to virtual commission. The goal of theoretical part is to give the reader an understanding of what simulation, digital twin and virtual commission mean and how they are connected.</p> <p>The section covering the practical part describes the functionality of the raw board handling line and the simplifying process using the Creo Parametric program. Also, the programs that are used for virtual commission are presented as well as how they work together and how the simulation structure is built up. In addition, a simplification process using the Creo Direct and 3D Evolution programs that allows more efficient processing of the models has been described.</p> <p>The result of the thesis was a well-functioning simplified 3D model which is utilized in the virtual commission. Simplified models also have other potential uses, so their benefits are not limited to the virtual commission.</p>		
Keywords Virtual commission, Digital Twin, 3D modeling, Industry 4.0		

## Sisällys

1. Johdanto.....	1
2. Teoreettinen tarkastelu .....	2
2.1 3D-mallinnus/CAD .....	2
2.2 Simulointi .....	4
2.2.1 Simulaatiomallit .....	5
2.2.2 Hyödyt ja haasteet .....	7
2.3 Teollisuus 4.0/IIoT .....	8
2.3.1 Kyberfyysiset järjestelmät .....	11
2.4 Digitaalinen kaksonen (DT).....	12
2.4.1 Tausta .....	12
2.4.2 Digitaalisen kaksonen määritelmä ja tasot .....	13
2.4.3 Monimutkaiset systeemit ja niiden käyttäminen .....	17
2.5 Virtuaalinen käyttöönotto .....	19
2.5.1 Silmukkasimulaatiot .....	22
2.5.2 Virtuaalinen käyttöönotto ja digitaalinen kaksonen.....	23
3. Toimeksianto .....	25
3.1 Tavoitteet ja tausta .....	25
3.2 Levyn käsittelylinja.....	25
3.3 Toteutus .....	27
3.3.1 3D mallien yksinkertaistaminen Creo Parametricilla.....	27
3.3.2 Simulointi Siemens NX MCD ohjelmistolla .....	31
4. Tulokset.....	36
4.1 Tulosten todentaminen .....	36
4.2 Jatkotutkimus ja kehitys .....	38
4.2.1 Creo Direct .....	38
4.2.2 3D Evolution .....	40
4.3 Mallien muut mahdolliset käyttökohteet .....	41
4.3.1 Lujuuslaskenta (FEM).....	41
4.3.2 Tehdassuunnittelu Aveva E3D ohjelmistolla .....	42
4.3.3 Adobe 3D Max.....	44
5. Yhteenveto ja pohdinta .....	45
Lähteet .....	47

## **Lyhenteet**

CAD – Tietokoneavusteinen suunnittelu

CPS – Kyberfyysinen järjestelmä

DT – Digitaalinen kaksonen

FEM – Elementtimenetelmä

IIoT – Teollinen internet

PLM – Tuotteen elinkaaren hallinta

TTM – Markkinoilletuontiaika

VC – Virtuaalinen käyttöönotto

## 1. Johdanto

Dieffenbacher konserni on yksi maailman johtavista puu- ja komposiittiteollisuuden tuotantolaitosten valmistajista. Yritys on perustettu vuonna 1873 ja se työllistää n. 1700 työntekijää 16 eri toimipisteessä ympäri maailmaa. Yrityksen liikevaihto oli vuonna 2020 noin 435 miljoonaa euroa. Yrityksen pääkonttori sijaitsee Saksan Eppingenissä. (Dieffenbacher 2019.)

Opinnäytetyön toimeksiantaja Dieffenbacher Panelboard OY suunnittelee, tuottaa ja toimittaa korkealaatuisia laitteita, linjastoja, tuotantolaitoksia sekä yksilöityjä jälkimarkkinointipalveluita levyteollisuudelle maailmanlaajuisesti. Yritys tarjoaa ratkaisua raakamateriaalin seulontaan ja puhdistukseen, liimaukseen, levyjen käsittelyyn, varastointiin ja viimeistelyyn. Yritys sijaitsee Lahden Nastolassa, työllistää noin 65 työntekijää ja liikevaihto on ollut viime vuosina noin 20–30 miljoonaa euroa. (Dieffenbacher 2019.)

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tuottaa toimeksiantajalle yksinkertaistetut 3D mallit virtuaalisin käyttöönoton tarpeisiin, ja samalla tutkia mahdollisuuksia prosessin nopeuttamiseksi. Työ tehtiin yhteistyössä yrityksen Saksassa sijaitsevan päätoimiston kanssa, jossa tehdastason virtuaalista käyttöönottoa rakennettiin simuloitun mallin avulla. Tavoitteena oli testata tuotantolinjaa ja sen ohjausjärjestelmän toimintaa simuloimalla, ennen varsinaisen käyttöönoton aloittamista. Simulointia varten laitteiden 3D-mallit oli yksinkertaistettava useasta eri syystä, esimerkiksi simulointiohjelmiston suorituskyvyn vuoksi.

Aihepiiri rajattiin opinnäytetyölle sopivaksi niin käytännön kuin teoreettisen tarkastelun kannalta. Tietoperusta käsittelee työhön liittyviä aiheita, käsitteitä ja määritelmiä yleisluontoisesti ja sisältää myös perustelut sille, miksi kyseiset aiheet ovat liiketoiminnan ja kannalta tarpeellisia.

Työn tarkempi toimeksianto, tavoite ja tarkoitus on kuvattu tietoperustan jälkeisissä luvuissa. Myös työn käytännön toteutus on siinä kuvattu tarkemmin ja syvemmin. Lopussa käsitellään ja todennetaan tulokset ja pohditaan jatkotutkimuksen tarvetta sekä kehittämisen kohteita.

## 2. Teoreettinen tarkastelu

Teoreettinen osuus käsittelee työn kannalta oleellisia aihealueita ja ilmiöitä. Vaikka varsinainen työ koostui 3D mallien yksinkertaistamisesta, on teoreettinen osuus rakennettu niin, että se kattaa koko virtuaalisen käyttöönottoon ja siihen liittyviä ilmiöitä. Tarkoituksena on, että lukija saa laajemman käsityksen mitä tarkoitetaan simulaatiolla, virtuaalisella käyttöönotolla, digitaalisella kaksoosella, ja miten ne liittyvät toisiinsa. Lisäksi halutaan erottaa nämä termit ja niiden määritelmät toisistaan.

Huomion arvoista on, että yllä mainitut ilmiöt ovat varsin laajoja, joten niiden käsittelyä on rajattu, jottei työ kasva turhan laajaksi.

Varsinaista 3D mallinnuksen teoriaa käsitellään suppeammin, sillä ilmiönä se on tunnettu verrattuna muihin edellä mainittuihin. Näin ollen sen laajempi teoreettinen käsittely ei toisi työlle lisäarvoa.

Lähteiksi teorialle on pyritty etsimään mahdollisimman uusia ja laadukkaita lähteitä. Lähteitä on pyritty käyttämään runsaasti, jotta tieto olisi mahdollisimman luotettavaa. Tiedonhaku on tehty lähes täysin verkossa. Hakemistoina ovat toimineet esimerkiksi: LUT/LAB Primo, Google Scholar, Research Gate, Science Direct sekä yritysten verkkosivut.

Mallien yksinkertaistamista ja käytettyjä ohjelmistoja käydään läpi yksityiskohtaisemmin myöhemmissä kappaleissa. Sama koskee muita ohjelmistoja ja käytännön ratkaisuja virtuaalisen käyttöönoton kohdalla.

### 2.1 3D-mallinnus/CAD

3D-mallinnuksesta puhuttaessa tarkoitetaan tässä yhteydessä CAD (Computer-aided design) suunnittelua. CAD termillä viitataan prosessiin, jossa luodaan tietokoneen, ja suunnitteluohjelmiston avulla kaksiulotteisia kuvia ja kolmiulotteisia malleja kappaleista. CAD suunnittelu on mahdollistanut eri alojen suunnittelijoiden ideoiden kehittämisen, vaihtoehtojen tutkimisen ja prototyyppien luomisen paljon nopeammin, ja tarkemmin kuin aikaisemmin. (Douglas 2014.)

CAD mahdollistaa kappaleiden suunnittelun sekä-, visuaalisen- ja teknisen tarkastelun tekemisen nopeasti. Mahdollisuus teknisten virheiden löytämiseen helpottuu, ja myös osien yhteensopivuus voidaan tarkastaa helposti. Lisäksi lopullisen tuotteen ulkonäköä voidaan tarkastella ja parantaa helposti jo suunnitteluvaiheessa. (Douglas 2014.) Esimerkki CAD-järjestelmässä luodusta kappaleesta on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Creo Parametric ohjelmalla mallinnettu kappale.

CAD helpottaa eri tekijöiden välistä kommunikointia suunnittelu- ja valmistusvaiheessa, sillä tieto siirtyy vaivattomasti mallien mukana yksiköltä ja valmistajalta toiselle. Ohjelmien avulla voidaan tuottaa valmiit yksityiskohtaiset valmistus- ja kokoonpanokuvat, osaluettelot ja materiaalitiedot, jolloin informaatiokatkokset ja väärymmärrykset vähenevät. (Douglas 2014.)

Parametrisen suunnittelun avulla on edelleen mahdollisuus parantaa suunnittelun laatua-, ja tehokkuutta. Parametristä suunnittelua tukevissa ohjelmissa on mahdollista tehdä erilaisia yhteyksiä parametrien välillä. (Douglas 2014.) Esimerkiksi yksikertaista mäntämootoria suunnitellessa männän halkaisija voisi olla parametri, joka on yhteydessä sylinterin sisä- ja ulkohalkaisijaan, jolloin yhtä mitta muuttamalla molemmat kappaleet muuttuvat. Parametrisyys voidaan toteuttaa niin kappale- kuin kokoonpanotasolla (Douglas 2014). Monimutkaisimmillaan puhutaan satojen, tai jopa tuhansien osien kokoonpanoista, joita ohjaa esimerkiksi laitteen ääriimitat. Parametrinen mallinnus on nopeuttanut tuoteperheiden luomista.

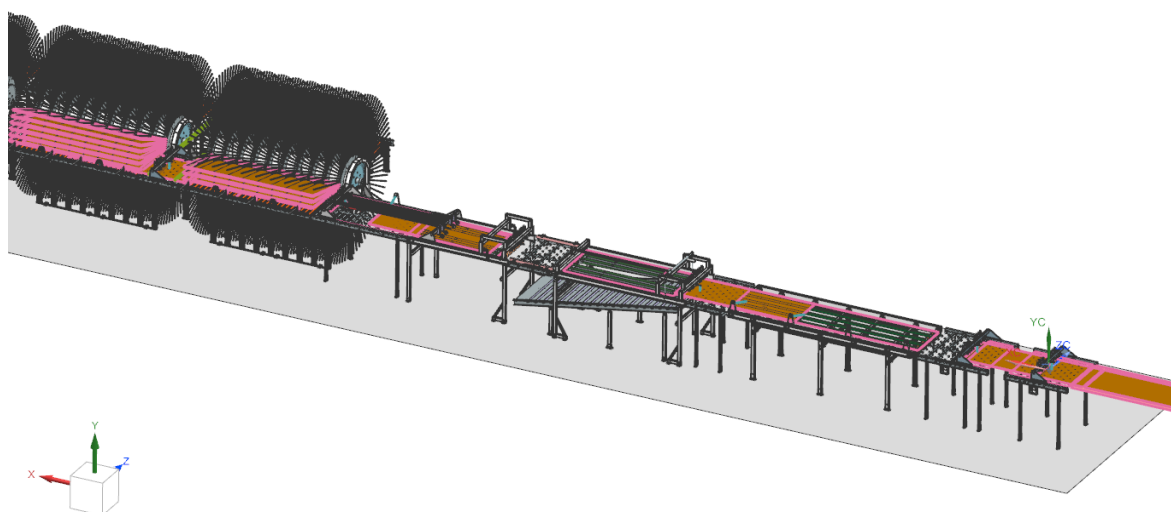
Useiden, ellei nykyään jopa kaikkien CAD pohjaisten ohjelmien avulla on mahdollista tehdä myös simuloitteja, jolla voidaan varmistaa esimerkiksi haluttujen liikeratojen suorittaminen.

Lisäksi yksittäisten kappaleiden ja kokoonpanojen rasituksia voidaan laskea. Eri jännitykset ja rasitukset ovat helposti nähtävissä myös visuaalisesti ohjelmien tekemien visuaalisten korostusten avulla.

CAD ohjelmistoilla tehtyjä malleja voidaan tuoda myös muihin ohjelmiin, joilla on jokin tarkasti määritelty käyttötarkoitus. Esimerkkeinä tästä ovat FEM (Finite Element Method/Elementtimenetelmä) laskentaan suunnitellut ohjelmat tai simulaatiokäyttöön tarkoitetut ohjelmat. Nykyään myös 3D tulostus (additive manufacturing) ohjelmistot ovat suuressa roolissa. Niiden avulla esimerkiksi yksittäisten kappaleiden prototyyppien fyysinen tuottaminen on helpottunut. Näissä tilanteissa on tosin huomioitava tallennusmuodot ja ohjelmien yhteensopivuus.

## 2.2 Simulointi

Simulaatio on jonkin systeemin tai toiminnon jäljitelmä. Systeemillä tarkoitetaan jotain reaali maailman prosessia tai toimintoa, jota simulaatiolla tarkastellaan. Simulointi on yksi monista menetelmistä, joita on kehitetty eri järjestelmien tutkimiseksi (Law 2015). Simulaatiota käytetään tilanteissa, jossa kokeita ei voi suorittaa varsinaisella järjestelmällä. Tämän avulla voidaan myös hyötyä taloudellisesti, kun kalliit laitetestit voidaan jossain tilanteissa välttää jopa täysin. (Lappalainen 2004.) Simulointi voidaan toteuttaa fyysisesti (simulaattorit), tietokoneellisesti (ohjelmistot) tai näiden yhdistelmällä. Kuvan 2 mukaisen tuotantolinjan testaaminen laitteet asentamalla olisi kallista ja se veisi paljon aikaa. Simuloimalla tuotantolinjan ohjausjärjestelmä ja sen toimivuus voidaan testata kohtuullisen tarkasti.



Kuva 2. Tuotantolinjan simulaationäkymä.

Simulaatiomalli sisältää jäljitellyn järjestelmän dynaamiset ominaisuudet. Tämän myötä sillä voidaan tehdä erilaisia kokeita tiedon hankkimiseksi ja järjestelmän tutkimiseksi (Bako & Božek 2016). Simulaatiomalleja on erilaisia, ja oikean mallin valinta on tärkeää, jotta mallista saadaan mahdollisimman todenmukainen (Law 2015).

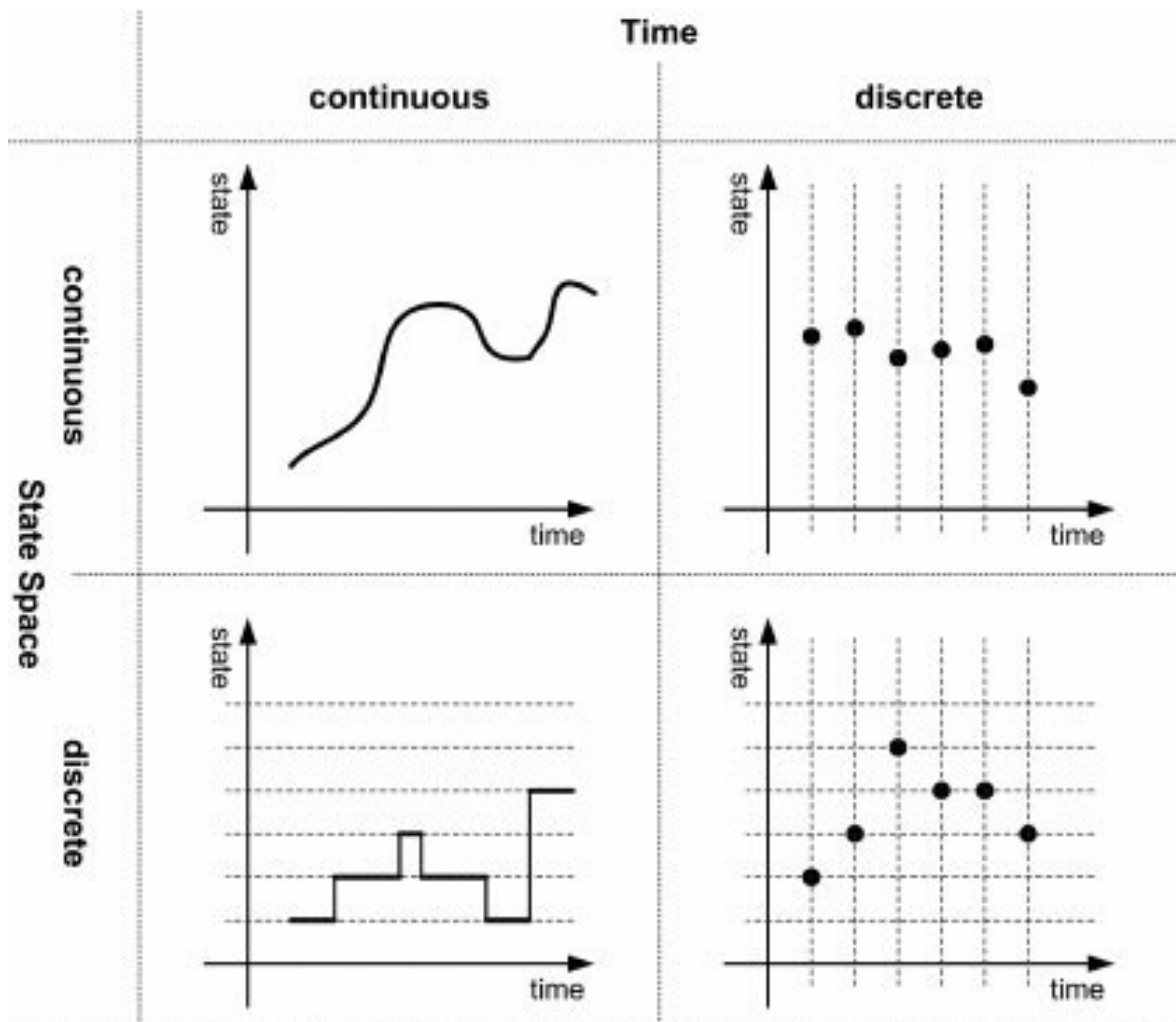
### 2.2.1 Simulaatiomallit

Law (2015) jakaa simulaatiomallit kahdeksi eri kokonaisuudeksi, *staattiseksi* ja *dynaamiseksi*. Näiden erona on se, kuinka ne käyttäytyvät ajan suhteen. Staattinen malli tarkastelee järjestelmää määrätyllä ajanhetkellä tai pelkkää järjestelmää jättäen ajan kokonaan huomiotta. Dynaaminen malli sen sijaan tarkastelee järjestelmän tilan muuttumista ajan suhteen.

Dynaaminen malli antaa staattiseen malliin verrattuna paljon paremman ja realistisemmän kuvan todellisuudesta. Dynaamisen mallin käyttö onkin edellytys siihen, että simulaatiosta saadaan suurin mahdollinen hyöty irti. (Kalliola 2019.) Tästä eteenpäin puhuttaessa simulaatiomallista, oletuksena onkin dynaaminen malli, ellei toisin mainita.

Malli luokitellaan joko *diskreetiksi* tai *jatkuvaksi* sen mukaan, miten sen tila muuttuu ajan funktiona. Jatkuvalle mallille tila muuttuu jatkuvasti suhteessa aikaan. Diskreetissä muutokset ovat välittömiä, ja niitä tapahtuu vain tietyillä ajanhetkillä. Näkökulmasta ja tutkittavasta asiasta riippuen malli määritellään joko diskreetiksi tai jatkuvaksi. Esimerkkinä voidaan pitää liikennettä. Jos kuvataan ja tutkitaan yksittäistä autoa, voidaan sitä kuvata

diskreettinä tapauksena. Systeemiä voidaan kuitenkin kuvata myös jatkuvana mallina, jos liikennevirta muutetaan ns. yhdeksi virtaavaksi massaksi. (Law 2015.) Kuviossa 1 on esitetty erilaisia malleja sekä mallien yhdistelmiä.



Kuvio 1. Diskreettejä ja jatkuvia malleja sekä yhdistelmiä (Holzer ym. 2010).

Malli voidaan edelleen luokitella olevan *deterministinen* tai *stokastisen*, sen mukaan sisältääkö se sattumanvaraisuuksia. Jos malli ei sisällä sattumanvaraisuuksia, on se deterministinen. Jos malli taas sisältää sattumanvaraisuuksia, on se stokastinen. Monet mallit pitää kuitenkin kuvata niin, että niissä on edes jonkinlaista sattumanvaraisuutta. Tämä lisää stokastisten mallien määrää huomattavasti. (Law 2015.)

Haansola (2009) jakaa mallia tästä edelleen Law (1991) mukaan aika ja tapahtuma perusteisiin malleihin. Aikaan perustuvassa mallissa systeemin tilaa tarkastellaan etukäteen määritetyillä ajanhetkillä, kun taas tapahtumaan perustuvassa mallissa tila

muuttuu välittömästi tapahtumien seurauksena. Esimerkiksi ihmisen astuminen kaupan sisäpuolelle muuttaa kaupan asiakasmäärän välittömästi.

### 2.2.2 Hyödyt ja haasteet

Teknologian kehittyessä ja digitalisoituessa on fyysistä testausta vähennetty ja tietokoneella tehtävät simulaatiot yleistyvät jatkuvasti (Kalliola 2019). Simulointi onkin nykypäivänä yksi tärkeimmistä ja käytetyimmistä tekniikoista teollisuuden alalla. Käytännön edut tulevat esille etenkin tuotekehityksessä ja tuotannon optimoinnissa. Simuloinnin avulla esimerkiksi pullonkaulojen, teknisten- sekä ohjelmallisten virheiden etsintä tuotannossa helpottuu, ja näitä voidaan tehdä jo ennen tuotannon aloitusta. Simulaatiomallien käyttö onkin keskittynyt tuotteen elinkaaren alku- ja keskiosaan. Perimmäinen tarkoitus teollisuuden kannalta on lyhentää aikaa, joka jää tuotteen suunnittelun, ja myynnin väliin (TTM, Time to market). (Kalliola 2019 & Polenghi ym. 2018.) Dieffenbacher Panelboard OY:n kohdalla suurimmat edut tulevat esiin siinä, että laitteita ja linjoja voidaan simuloida jo siinä vaiheessa kun suunnittelu on tehty ja laitteet menevät valmistukseen. Tämän ansioista valmistus ja toimitusaika voidaan käyttää hyödyksi ja kun käyttöönottoa aloitetaan tekemään, on laitteiden ja linjastojen toiminta jo testattu simuloimalla. Tällä voidaan saavuttaa suuria ajallisia ja taloudellisia säästöjä käyttöönottoajan lyhentyessä.

Polenghi ym. (2018) listaavat kirjallisuuskatsauksessaan useita simuloinnin käyttökohteita, ja niiden sijaintia tuotteen elinkaarella. Kuten aikaisemmin on jo mainittu, käyttö on keskittynyt alku- ja keskivaiheilla ja tuotteen elinkaaren loppupää on sivuutettu, vaikka sielläkin olisi mahdollisesti potentiaalisia kohteita. Käyttökohteita ovat esimerkiksi: tuote-, järjestelmä- ja laitossuunnittelu, materiaalinkäsittely, toiminnanohjaus ja suunnittelu, toimitusketjun suunnittelu ja hallinta, suorituskyvyn arviointi, prosessinsuunnittelu ja kunnossapidon hallinta.

Simuloinnin haasteena on ollut tuotantojärjestelmien monimutkaisuus, tarvittavan tiedon määrittäminen ja simuloinnin rakentamiseen vaadittava erityisosaaminen. (Kalliola 2019.) Toisena haasteena on ollut etenkin suurten järjestelmien mukanaan tuoma simulaation monimutkaisuus ja tästä johtuva suuri suorituskyvyn tarve. Ongelmat ovat lieventyneet kuitenkin kehittyneiden ohjelmistojen myötä, jotka hoitavat osan ”ohjelmoinnista” itse. Tämän johdosta simulaatioiden tekeminen ja suorittaminen on helpottunut. Myös laskentatehon kasvu tietotekniikassa on tuonut apua suorituskykyongelmaan. (Law 2015.)

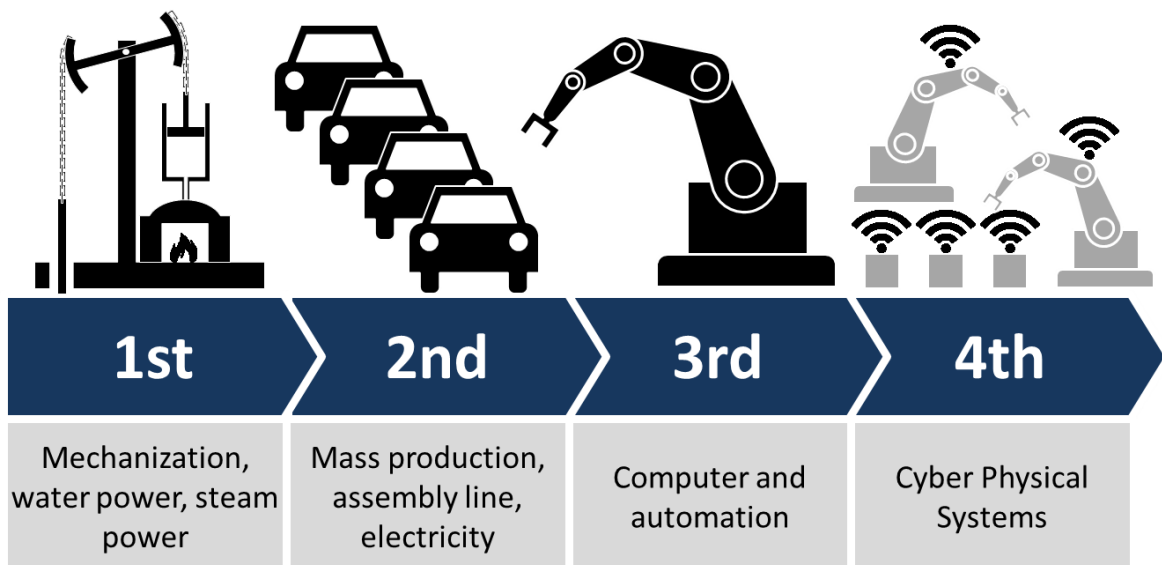
Law (2015) kertoo myös tekstissään, että oletus simuloinnista pelkkänä ”monimutkaisena harjoituksena” tietokoneelle on valitettavaa, ja että mallin käyttö johtopäätösten tekoon saattaa jäädä huomioimatta. Hän mainitsee myös, että testaus tulisi suorittaa oikealla

järjestelmällä, jos se on mahdollista ja kustannustehokasta, koska silloin tulokset ovat varmasti oikeita.

### 2.3 Teollisuus 4.0/IIoT

Teollisuus 4.0 (Industry 4.0) on nimensä mukaisesti kuvaus teollisuuden neljännelle vallankumoukselle. Se on Saksan hallituksen vuonna 2012 aloittama kansallinen hanke, jonka tavoite on maan valmistavan teollisuuden ja kilpailukyvyn vahvistaminen. (Collin & Saarelainen 2016.)

Historian ensimmäinen teollinen vallankumous sisälsi höyry- ja vesivoiman sekä mekaaniset valmistusmenetelmät. Toinen vallankumous mahdollisti massatuotannon sähkötekniikan kehittyessä. Kolmatta vallankumousta on kutsuttu niin sanotuksi digitaaliseksi vallankumoukseksi, ja siihen sisältyy automatisointi kehittyneen elektroniikan ja tietotekniikan avulla. (Kalliola 2019 & Hermann ym. 2015.) Neljäs vallankumous käsittää kyberfysiset järjestelmät (CPS, Cyber Physical Systems). Kuviossa 2 on esitetty teollisen vallankumouksen sisältöä.



Kuvio 2. Teollisuuden vallankumoukset (DevisonX 2019).

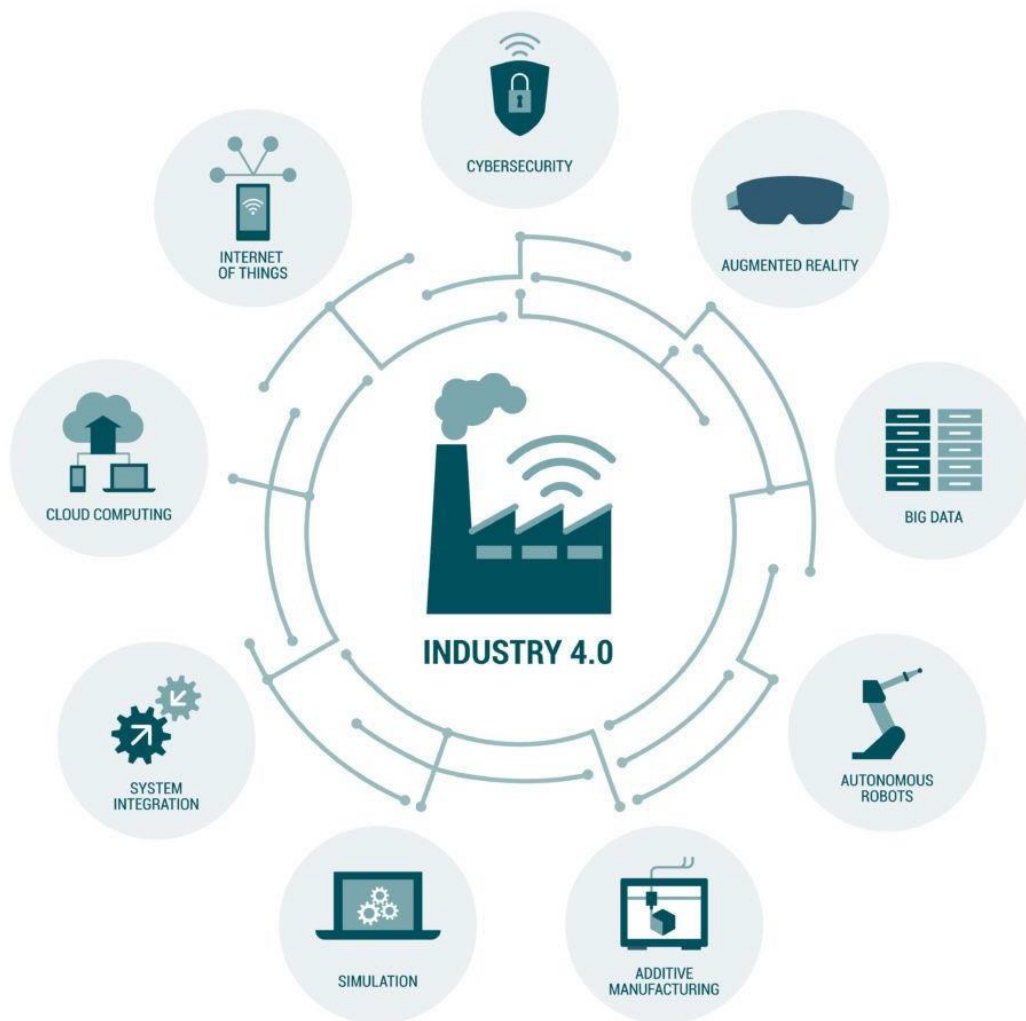
Teollisuus 4.0 on poikkeava muista vallankumouksista siinä mielessä, että se on ensimmäinen vallankumous, joka on voitu ennustaa tapahtuvaksi, eikä vasta todettu jälkeenpäin tapahtuneeksi. Tämä mahdollistaa sen aktiivisen muovaamisen yritysten ja eri instituutioiden toimesta. Lisäksi sillä ennustetaan olevan valtava taloudellinen vaikutus, sillä

sen katsotaan mahdollistavan täysin uusia yritysmalleja, tuotteita sekä palveluita. (Hermann ym. 2015.)

Teollisuus 4.0:stä puhuttaessa tulee usein esiin termi IIoT (Industrial Internet of Things). Termejä voidaan pitää synonyymeinä toisilleen. Tosin termiä ”IIoT” käytetään enemmänkin kuvaamaan teknologian suuntaa, ja termiä ”Industrial 4.0” sen aiheuttamia ja mahdollistamia taloudellisia vaikutuksia. (Jeschke ym. 2018.) Tässä tekstissä niitä pidetään toistensa ekvivalentteina ja käytetään vain termiä ”Teollisuus 4.0”.

Teollisuus 4.0 on yhteydessä teollisuusautomaation uuteen, digitalisaation ja analytiikan tuloksena syntyneeseen uuteen sukupolveen. Keskiössä on tuotteen valmistusteknologia ja tehdastuotanto sekä näiden yhdistyminen internetiin. (Collin & Saarelainen 2016.) Nedashkovskiy ym. (2020) kertovat tekstissään Teollisuus 4.0 pohjautuvan moniin eri innovatiivisiin teknologioihin. Näistä teknologioista merkittävimmät ovat: IoT (Internet of Things), AR (Augmented Reality) ja big data. Kalliola (2019) kertoo diplomityössään, että Kagermann (2015) mukaan IoS (Internet of Services), simulaatio ja pilvilaskenta ovat toimineet Teollisuus 4.0 mahdollistajana. Lisäksi hän viittaa, että Vaidya ym. (2018) pitävät pilvipohjaista valmistusta ja älykästä valmistusta avaintekijöinä Teollisuus 4.0:lle. Malakuti ym. (2018) taas luokittelevat Teollisuus 4.0 avaintekijäksi digitaalisen kaksosen konseptin, joka on osa kyberfyysisiä järjestelmiä.

Dieffenbacher Panelboard OY:n kohdalla esimerkiksi big datan avulla voidaan kerätä tietoa siitä, mitä tehtaalla tapahtuu suhteessa levynteon parametreihin. Kun dataa on saatu tarpeeksi laajasti kerättyä, voitaisiin sitä käyttää hyväksi kunnossapidon ennakointiin, esimerkiksi ennustaa tuleva laakerin rikkoutuminen. Ennakoivan huollon avulla laiterikkoja voidaan ehkäistä ja huolto ajoittaa tuotannon kannalta optimaalisesti sekä lyhentää seisokkiaikoja. Kuviossa 3 on esitetty Teollisuus 4.0 ja sen komponentit.



Kuvio 3. Teollisuus 4.0 ja sen komponentit (Nedashkovskiy ym. 2020).

Vaikka Teollisuus 4.0 on ollut pinnalla vuosia ja sen tuomia mahdollisuuksia on tuotu ilmi, selkeää määritelmää termille Teollisuus 4.0 on ollut vaikea löytää. Hermann ym. (2015) kirjallisuuskatsauksessaan ovat antaneet sille seuraavan määritelmän:

“Industrie 4.0 is a collective term for technologies and concepts of value chain organization. Within the modular structured Smart Factories of Industrie 4.0, CPS monitor physical processes, create a virtual copy of the physical world and make decentralized decisions. Over the IoT, CPS communicate and cooperate with each other and humans in real time. Via the IoS, both internal and cross organizational services are offered and utilized by participants of the value chain.”

Tarkastelun perusteella voidaan todeta, että verrattuna aikaisempiin vallankumouksiin, ei Teollisuus 4.0 ole niin selkeärajanen ja yksiselitteinen. Voisi jopa todeta että, kyse on vanhojen ja uusien teknologioiden integroitumisesta yhdeksi suureksi kokonaisuudeksi.

### 2.3.1 Kyberfyysiset järjestelmät

Kyberfyysisillä järjestelmillä (CPS) tarkoitetaan järjestelmiä, joiden toiminta pohjautuu järjestelmien ja laitteiden kykyyn kommunikoida, laskea sekä seurata ja ohjata toimintaansa kerätyn tiedon perusteella. Puhutaan siis sensori- ja toimielinverkoista. (Latvakoski 2016.) Nämä järjestelmät luokitellaan avainasemassa oleviksi mahdollistajiksi Teollisuus 4.0 kannalta. (Petrillo ym. 2019).

Kyberfyysiset järjestelmät ovat moniulotteisia, ja ne kykenevät integroimaan yhteen dynaamisen fyysisen maailman ja kybermaailman. Integraation ja yhteistyössä tehdyn kommunikoinnin, laskennan ja hallinnan avulla nämä järjestelmät tarjoavat reaaliaikaisen aistinnan, tiedon takaisinsyötön ja hallinnan. Yhteyden, tiedonsiirron ja palautesilmukoiden kautta fyysisistä ja laskennallisista prosesseista tulee riippuvaisia toisistaan. Tätä kautta kyberfyysinen integraatio ja reaaliaikainen vuorovaikutus saavutetaan. Vuorovaikutuksen voimin fyysisiä yksiköitä voidaan hallita ja valvoa luotettavalla, turvallisella ja tehokkaalla tavalla. (Tao ym. 2019.)

Petrillo ym. (2019) jakaa kyberfyysiset järjestelmät tekstissään viidelle tasolle niiden toiminnallisuuden mukaan:

- I. Älykkäät yhteydet: Kyky kerätä ja käsitellä dataa reaaliajassa älykkäiden sensoreiden avulla.
- II. Datasta tietoon kääntäminen: Kyky koota dataa, ja muuttaa sitä arvoa lisääväksi tiedoksi.
- III. Digitaalinen kaksonen: Kyky mallintaa nykyhetkeä digitaalisessa ympäristössä.
- IV. Havainnoiva: Kyky tunnistaa eri skenaarioita ja tukea päätöksentekoa prosessia.
- V. Konfiguroituva: Kyky kerätä palautetta fyysisestä maailmasta virtuaaliseen, ja tehdä korjaavia toimia sen perusteella.

Työn kannalta kyberfyysisistä järjestelmistä on aiheellista käsitellä digitaalista kaksosta tarkemmin omana lukunaan, sillä se liittyy läheisesti virtuaaliseen käyttöönottoon.

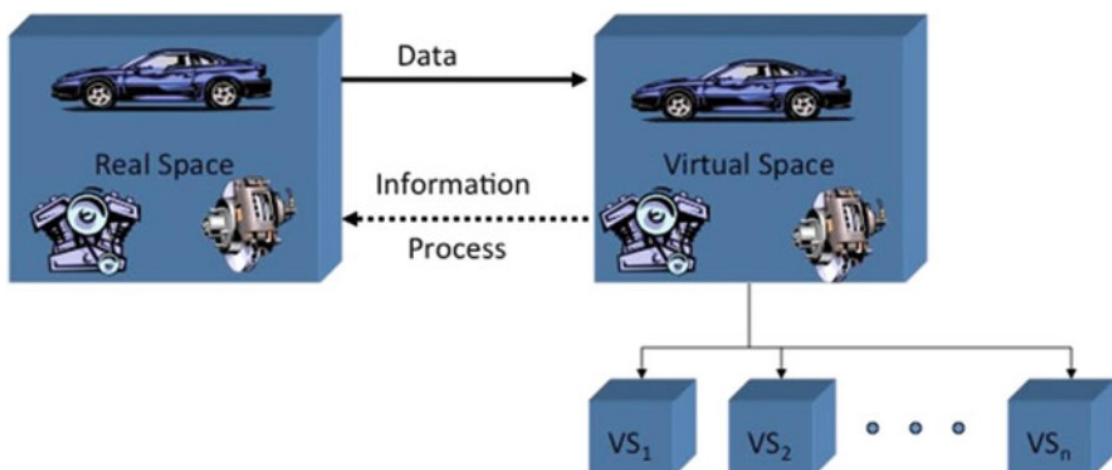
## 2.4 Digitaalinen kaksonen (DT)

### 2.4.1 Tausta

Digitaalisen kaksonen konseptin esitteli ensi kertaa Michael Grieves vuonna 2002 luennollaan Michiganin yliopistossa, joka käsitteli tuotteen elinkaaren hallintaa (PLM, Product Lifecycle Management). Konsepti oli yksinkertaisesti digitaalinen esitys fyysisestä tuotteesta ja niiden välisestä tiedonsiirrosta. (Grieves 2015; Grieves & Vickers 2017.) Tuohon aikaan digitaaliset esitykset fyysisistä tuotteista olivat melko uusia ja kehittymättömiä. Myös tieto mitä tuotteesta saatiin valmistuksen jälkeen kerättyä, oli hyvin rajallista ja manuaalisesti tehtävää. (Grieves 2015.)

Lähtökohtana konseptille oli, että jokainen systeemi koostuu *kahdesta erillisestä* systeemistä: fyysisestä systeemistä, joka on jo olemassa, ja virtuaalisesta systeemistä, joka pitää sisällään kaiken tiedon fyysisestä systeemistä. Tämä tarkoitti, että tapahtui systeemin tilan peilautumista, virtuaalisen ja fyysisen tilan välillä. (Grieves 2017.)

Vaikka malli oli yksinkertainen, sisälsi se jo kaikki digitaalisen kaksonen elementit: todellisen tilan, virtuaalisen tilan, datan siirtymisen fyysisestä tilasta virtuaaliseen, tiedon siirtymisen takaisin fyysiseen tilaan ja virtuaalisia alatilajoja (Grieves & Vickers 2017). Kuviossa 4 on esitetty digitaalisen kaksonen alkuperäinen konsepti.



Kuvio 4. Digitaalisen kaksonen alkuperäinen konsepti vuodelta 2002 (Grieves 2017).

## 2.4.2 Digitaalisen kaksosen määritelmä ja tasot

Vaikka digitaalisen kaksosen perusidea on pysynyt samana, on konseptin kehittyessä sen tarkka määrittäminen muuttunut hankalaksi. Digitaaliseksi kaksoseksi on määritelty hyvinkin erilaisia digitaalisia verisoita eri systeemeistä. (Grieves & Vickers 2017.)

Kalliola (2019) on diplomityössään koonnut hyvin kirjallisuudessa esille tulleita määritelmiä termille (Taulukko 1).

Author	Definition
Grieves, M. (2014, p. 1)	<i>“Virtual representation of what has been produced”</i>
Dongming, Z. et al. (2017, p. 1)	<i>“Digital twin is an integrated multi-physics, multi-scale, and probabilistic simulation of a complex product and uses the best available physical models, sensor updates, etc., to mirror the life of its corresponding twin”</i>
Glaessgen & Stargel (2012, p. 13)	<i>“A Digital Twin is an integrated metaphysics, multiscale, probabilistic simulation of an as-built vehicle or system that uses the best available physical models, sensor updates, fleet history, etc., to mirror the life of its corresponding flying twin”</i>
Boschert & Rosel (2016, p. 59)	<i>“Very realistic model of the current state of the process”</i>
Tao, F. (2017, p. 4)	<i>“Digital twin is a real mapping of all components in the product life cycle using physical data, virtual data and interaction data between them”</i>

Taulukko 1. Digitaalisen kaksosen eri määritelmiä (Kalliola 2019).

Grieves & Vickers (2017) toteavat että olisi helpottavaa nojata tiettyihin määritelmiin viitatessa digitaaliseen kaksoseen. He ehdottavat seuraavia määriytyksiä:

Digitaalinen kaksonen (DT, Digital Twin) on joukko virtuaalisia informaatorakenteita, jotka kuvaavat tarkasti mahdollisesti tulevaa tai jo olemassa olevaa fyysistä tuotetta. Parhaimmillaan kaikki informaatio mitä fyysisestä tuotteesta voitaisiin saada, on mahdollista saada sen digitaalisesta kaksosesta. Digitaalisen kaksosen voi jakaa kahdeksi kokonaisuudeksi: Digitaalisen kaksosen prototyyppi (DTP, Digital Twin Prototype) ja Digitaalisen kaksosen instanssiksi (DTI, Digital Twin Instance). Digitaaliset kaksokset toimivat Digitaalisen kaksosen ympäristössä (DTE, Digital Twin Environment). (Grieves & Vickers 2017.)

Digitaalisen kaksosen prototyyppi (DTP) kuvaa fyysisen tuotteen prototyyppiä. Se sisältää riittävän kuvaavan informaation, jotta voidaan valmistaa fyysinen tuote, joka vastaa digitaalisen kaksosen prototyyppiä. Informaation pitää sisältää vähintään seuraavat asiat:

tuotteen vaatimukset, 3D-mallit selityksineen, osaluettelot materiaaleineen sekä prosessi-, palvelu- ja hävittämiskuvauksen. (Grieves & Vickers 2017.)

Digitaalisen kaksosen instanssi (DTI) kuvaa tiettyä määrättyä, vastaavaa fyysistä tuotetta johon yksilöllinen digitaalinen kaksonen on kytköksissä koko sen elinkaaren ajan. DTI sisältää siis informaatiota laajemmin kuin DTP. DTI:n kohdalla informaation pitää sisältää vähintään seuraavat asiat: täydelliset 3D-mallit mittoineen ja toleransseineen, osaluettelon joka sisältää tiedon nykyisistä ja mahdollisista aikaisemmin käytetyistä komponenteista, prosessikuvakseen joka kuvaa tarkasti toimenpiteet joita on tehty fyysistä tuotetta luodessa, mittaus- ja testaustiedot, huoltotiedot josta käy ilmi aikaisemmat huollot ja komponenttien vaihdot sekä lisäksi sensoritiedot joista ilmenee tuotteen tilan entiset, nykyiset ja ennustetut tilat. (Grieves & Vickers 2017.)

Digitaalinen kaksosen ympäristö (DTE) on integroitu, monialainen tila, jossa digitaalisia kaksosia voidaan käyttää moniin eri tarkoituksiin (Grieves & Vickers 2017).

Yksi näistä tarkoituksista on tuotteen tai systeemin tilan ja suorituskyvyn ennustaminen tulevaisuudessa ja/tai eri olosuhteissa. Prototyypitasolla (DTP) voitaisiin tutkia esimerkiksi eri toleranssien, tai osavaihtoehtojen vaikutusta tuotteen toimintaan. Instanssitasolla (DTI) ennustus tapahtuu määrätyn tuotteen tiedoilla ja sisältää tuotteen varsinaiset komponentit ja historian. Instanssitasolla ennustus tapahtuu tuotteen elinkaaren nykyhetkellä ja tutkii sitä elinkaaren aikajanalla eteenpäin. (Grieves & Vickers 2017.)

Toinen päätarkoitus koskee instanssitasoa (DTI). Tarkoituksena on, että digitaaliselta kaksoselta voi "kysyä" nykyisestä ja menneistä tiloista. Riippumatta fyysisen vastineen sijainnista maailmalla, voisi sen yksilölliseltä digitaaliselta kaksoselta saada tietoa sen tilasta esimerkiksi: jännityksistä, lämpötiloista, asetuksista tai virrankulutuksesta. Käytännössä siis kaikesta siitä mitä voisi fyysisestä vastineesta tutkia. Nyky- ja historiatietoja voisi taas käyttää hyväkseen, kun halutaan ennustaa tuotteen tai systeemin tilaa, kuten edellisessä kappaleessa on mainittu. (Grieves & Vickers 2017.)

### **Digitaalisen kaksosen kehitysvaiheet**

Ala-Mäyry (2021) kertoo digitaalista kaksosta käsittelevässä työssään eri yritysten tehneen erilaisia malleja digitaalisen kaksosen kypsyystasoista. Kypsyystasot selittävät digitaalisen kaksosen kehittymistä. Grieves ja Vickers (2017) avaavat enemmän perustermejä ja määrittämiä edellisissä kappaleissa.

Madni ym. (2015) määrittävät neljä eri kypsyystasoa systeemin virtuaaliselle tai digitaaliselle vastineelle (Taulukko 2). Jokaisella tasolla on oma tarkoituksensa sekä

laajuus, ja ne tukevat päätöksentekoa sekä vastaavat kysymyksiin läpi koko tuotteen elinkaaren ajan.

Level	Model Sophistication	Physical Twin	Data Acquisition from Physical Twin	Machine Learning (Operator Preferences)	Machine Learning (System/Environment)
1 Pre-Digital Twin	virtual system model with emphasis on technology/technical-risk mitigation	does not exist	Not applicable	No	No
2 Digital Twin	virtual system model of the physical twin	exists	performance, health status, maintenance; batch updates	No	No
3 Adaptive Digital Twin	virtual system model of the physical twin with adaptive UI	exists	performance, health status, maintenance; real-time updates	Yes	No
4 Intelligent Digital Twin	virtual system model of the physical twin with adaptive UI and reinforcement learning	exists	performance, health status, maintenance, environment; both batch/real-time updates	Yes	Yes

Taulukko 2. Digitaalisen kaksosen kypsyyssasteet (Madni 2019).

- I. Digitaalisen kaksosen esiaste (Pre-digital twin)
- II. Digitaalinen kaksonen (Digital Twin)
- III. Mukautuva digitaalinen kaksonen (Adaptive Digital Twin)
- IV. Älykäs digitaalinen kaksonen (Intelligent Digital Twin)

Digitaalisen kaksosen esiaste on perinteinen virtuaalinen prototyyppi. Se luodaan yleensä siinä vaiheessa, kun määritellään systeemin teknisiä vaatimuksia, ja keskimääräisiä kustannuksia. Sillä on tarkoitus minimoida teknisiä riskejä ja löytää ongelmia jo ennen varsinaista suunnittelutyötä. Tällaista virtuaalisista prototyypistä ei yleensä käytetä kuvaamaan lopullista systeemiä. Tällä mallilla ei ole fyysistä vastinparia, mutta sillä voidaan simuloida systeemin fyysistä käyttäytymistä ja tietoteknisiä toimia. (Madni ym. 2019.)

Digitaalisen kaksosen tasolla digitaalisella vastineella on olemassa jo fyysinen vastine. Virtuaalisen ja fyysisen vastineen välillä tapahtuu tiedonsiirtoa paketteina ja tiedonsiirto on

mahdollista molempiin suuntiin. Tämä myötä dataa siirtyy digitaaliselle kaksoselle ja tietoa takaisin fyysiselle vastineelle, joka voi tiedon avulla muuttaa tarvittaessa tilaansa. Tätä tasoa on mahdollista käyttää erilaisten skenaarioiden tutkimiseen, ja sitten nähdä kuinka fyysinen vastine vastaisi eri skenaarioissa. Jos muutoksen tarpeita tai puutoksia löydetään, ne voidaan tehdä fyysiseen malliin ja ne heijastuvat digitaaliseen kaksoseen, ja toisinpäin. (Madni ym. 2019.)

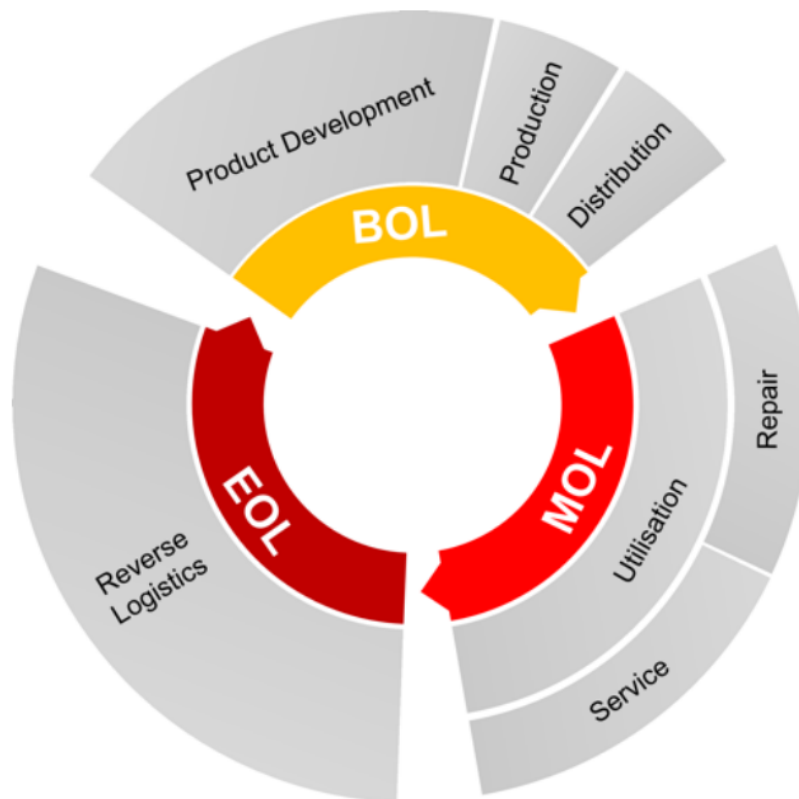
Mukautuva digitaalinen kaksonen sisältää mukautuvan käyttöliittymän sekä digitaaliselle, että fyysiselle vastineelle. Käyttöliittymä käyttää koneoppimista hyödykseen oppiakseen käyttäjän mieltymyksistä ja prioriteeteista. Tiedonsiirto on reaaliaikaista vastineiden välillä, mutta tiedonsiirto on mahdollista myös paketteina käytön jälkeen. Tasoa voidaan hyödyntää reaaliaikaista suunnittelua ja päätöksentekoa varten. (Madni ym. 2019.)

Kehittynein taso on älykäs digitaalinen kaksonen. Se sisältää kaikki aikaisempien tasojen ominaisuudet ja edistyksellistä koneoppimista. Koneoppimisen avulla on mahdollista oppia tunnistamaan uusia objekteja ja ”kuvioita”. Tämän tason kaksonen kykenee toimimaan paljon itsenäisemmin. Myös tiedon analysointi ja käyttö on tehokkaampaa kuin aikaisemmilla tasoilla. (Madni ym. 2019.)

Madni ym. (2019) mukaan se, että digitaalisesti kaksosiksi kutsutaan useita eri digitaalisia versioita systeemistä, johtaa ongelmaan määrittämisen kannalta. Tällainen laaja tulkinta asiasta johtaa seuraaviin kysymyksiin:

- Pitääkö fyysinen malli olla olemassa ennen digitaalista kaksosta?
- Täytyykö fyysisen systeemin siirtää dataa virtuaaliseen versioon ennen kuin sitä voidaan kutsua digitaalisesti kaksosiksi?
- Täytyykö koko määrittäminen muuttua, kun IIoT on mahdollistanut älykkäät fyysiset järjestelmät?

Vaikka termistö on muuttunut vuosien varrella, on digitaalisen kaksosen perusidea pysynyt pääosin ennallaan. Perusidea pohjautuu ajatukseen siitä, että digitaalinen informaatorakenne fyysisestä systeemistä voidaan luoda omana kokonaisuutena. Tämä digitaalinen informaatio toimii kaksosena informaatiolle, joka on upotettu fyysiseen systeemiin, ja tätä kautta se olisi kytköksissä fyysiseen systeemin läpi koko sen elinkaaren. (Grieves & Vickers 2017.) Kalliola (2019) toteaa Boschert ja Rosen (2016) mukaan: Digitaalinen kaksonen on identtinen virtuaalinen vastine fyysisestä systeemistä. Digitaalisen ja fyysisen vastineen pitäisi olla kytköksissä niin että ne voivat kommunikoida, ja siirtää dataa sekä tietoa keskenään. Tuotteen elinkaaren vaiheita on kuvattu kuviossa 5.



Kuvio 5. Tuotteen elinkaaren kolme vaihetta (Hribernik 2011).

### 2.4.3 Monimutkaiset systeemit ja niiden käyttäminen

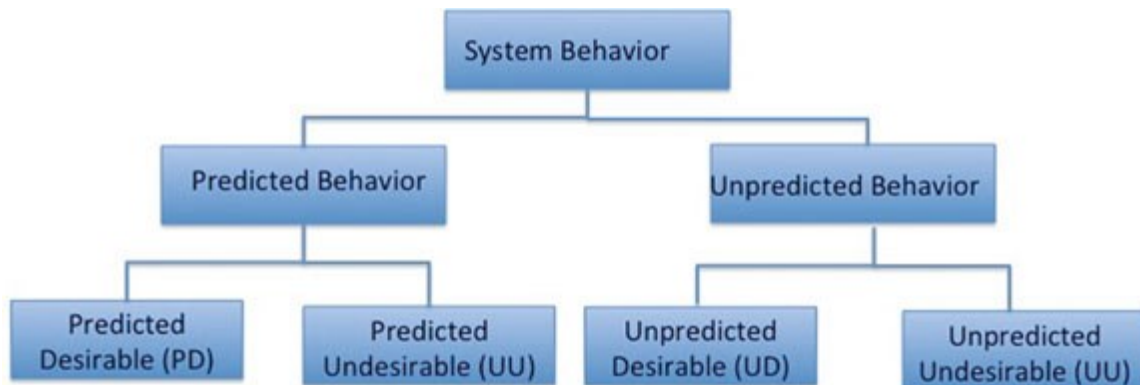
Systeemi voidaan katsoa olevan monimutkainen (Complex system), jos se sisältää suuren komponenttiverkoston, useita kommunikaatiokanavia ja/tai hienostunutta tiedonkäsittelyä. Edellä mainitut tekijät tekevät systeemin tilan ennakoinnista vaativaa. Voidaan sanoa, että tällaiset systeemin sisältävät yllätyslementtejä, jotka yleensä ovat ei-toivottuja. (Grieves 2017.) Monimutkaiset järjestelmät voidaan määrittää myös vuorovaikutuksien pohjalta. Suoraviivaiset vuorovaikutukset ovat esimerkiksi tuttuja ja odotettuja tuotannon sekä kunnossapidon sekvenssejä. Myös suunnittelemattomat, mutta melko selkeästi näkyvillä olevat vuorovaikutukset luokitellaan suoraviivaisiksi. Sen sijaan monimutkaiset vuorovaikutukset ovat ei-tunnettuja, odottamattomia tai sellaisia, jotka eivät ole selvästi näkyvillä tai helposti ymmärrettäviä. (Grieves & Vickers 2017.)

Myös ihmisen toiminnot yhdessä monimutkaisen systeemin kanssa luo lisähaasteita ja uhkan sen toiminnalle. Ihmisen lisääminen systeemiin tekee siitä sosioteknisen ja lisää siihen inhimillisen epäjohtonmukaisuustekijän. Tämä tekee systeemistä edelleen monimutkaisemman ja sen toiminnan vaikeammin ennustettavaksi. (Grieves & Vickers 2017.)

Tuotantolinjat ja laitokset voi edellä mainituin kriteerein luokitella monimutkaisiksi järjestelmiksi. Riippuen tarkastelutasosta, voi erilaisia komponentteja olla kymmenistä jopa satoihin tuhansiin. Lisäksi tuotantolaitokset sisältävät laajan tietoverkon ja joskus useita eri väylätekniikoita. Tämä johtaa suureen datamäärään, jota pitää käsitellä, jotta se saadaan muutettua käytettäväksi tiedoksi. Vaikka ihannetilanteessa vuorovaikutusten tulisi olla melko suoraviivaisia, ei kaikkea yleensä osata tunnistaa etukäteen. Yllätystekijöitä ilmenee viimeistään tuotantolinjojen käyttöönotossa.

### Käytösmallit

Systeemin käytösmallit voidaan jakaa kuvion 6 mukaisesti neljään eri kategoriaan sen mukaan onko käytös ennustettua vai ennustamatonta. Tästä käyttäytyminen jaotellaan edelleen toivottuun ja ei-toivottuun.



Kuvio 6. Systeemin käytösmallit (Grieves & Vickers 2017).

Lopulliset neljä käytösmallia ovat siis:

- Ennustettu, toivottu (PD, Predicted Desirable)
- Ennustettu, ei-toivottu (PU, Predicted Undesirable)
- Ennustamaton, toivottu (UD, Unpredicted Desirable)
- Ennustamaton, ei-toivottu (UU, Unpredicted Undesirable)

Systeemin kannalta PD on selvästikin haluttu käytösmalli. Se tarkoittaa, että systeemin tarkoituksenmukainen toiminta ja asetetut tavoitteet on saavutettu. (Grieves & Vickers 2017.)

PU-käytösmallit sisältävät ongelmia, jotka tiedetään etukäteen. Ne pyritään ehdottomasti ratkaisemaan. Näiden ongelmien huomiotta jättäminen on yksinkertaisesti virhe, sillä ne on tiedostettu. (Grieves & Vickers 2017.)

UD-käytösmalli on sellainen, jota ei ole osattu etukäteen ennustaa. Se on kuitenkin luonteeltaan positiivinen, sillä seuraamus on toivottu vaikkei olekaan tiedossa etukäteen. Tämänkaltaiset tapahtumat ovat lähinnä noloja suunnittelun kannalta, vaikkakaan eivät haitallisia. (Grieves & Vickers 2017.)

UU-kategoria on systeemin toiminnan kannalta haitallisin ja haastavin. Se sisältää kaikki sellaiset tapahtumat, joita ei ole osattu ennustaa ja ne ovat myös haitallisia. Tällaiset tapahtumat voivat olla systeemille yksinkertaisesti katastrofaalisia ja johtaa rikkoutumiseen tai aiheuttaa pahimmillaan henkilövahinkoja. Tämän vuoksi UU on se kategoria, johon tulee keskittyä käytösmaalleja tarkastellessa. Uusia tehokkaita menetelmiä ja työkaluja tarvitaan, jotta tällaisia tapahtumia saadaan estettyä. (Grieves & Vickers 2017.)

Digitaalista kaksosta pidetään keskeisenä lähestymistapana, kun halutaan parantaa järjestelmän reaktiivisuutta epävarmoihin ja ei-toivottuihin (UU) tilanteisiin. Tämä johtuu sen kyvystä vastaanottaa dataa ”kentältä” ja käynnistää sen avulla määrättyjä toimia fyysisestä vastineestaan. Modernin teknologian kehityksen ja muuttuvat työympäristöt huomioiden, on todennäköistä, että yritysten tarvitsee sovittaa uudelleen järjestelmiään digitaalisen kaksosen integroinnilla. (Barbieri 2021.)

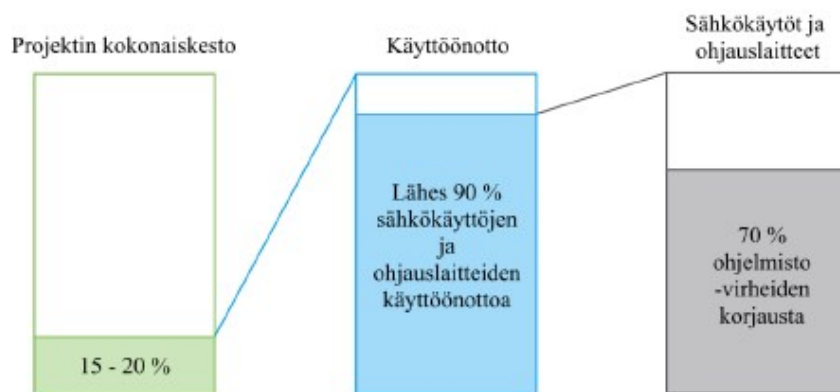
## 2.5 Virtuaalinen käyttöönotto

Käyttöönotolla tarkoitetaan tässä yhteydessä automatisoidun tuotantolaitoksen käyttöönottoa. Tuotantolaitokset koostuvat useista eri elementeistä kuten: varastojärjestelmästä, kuljettimista, roboteista, ohjauspaneeleista sekä kappaleen käsittely-, työstö- ja kokoonpanoasemista. Tällaisen monimutkaisen systeemin suunnittelu sisältää monia vaiheita, esimerkiksi: laitossuunnittelua, koneenrakennusta sekä sähkö- ja automaatio suunnittelua. (Hoffmann ym. 2010.)

Automaatiojärjestelmien suunnitteleminen ja käyttöönotto ovat monimutkaisia prosesseja. Merkittävä osa virheitä löytyykin yleensä vasta ensikäynnistyksen vaiheessa (Hoffmann ym. 2010). Arviolta noin 20 % koko projektin kestosta kuluu automaatio suunnittelun jälkeiseen käyttöönottoon. Käyttöönotosta taas noin 90 %, eli valtaosa ajasta kuluu sähkö- ja ohjauslaitteiden käyttöönottoon (Kuvio 7). Tästä sähkö- ja ohjauslaitteiden käyttöönottoon kuluva ajasta noin 70 % kuluu automaatiojärjestelmien virheiden korjaukseen. Kokonaisuudessaan arviolta 9–12.6 % projektin kokonaiskestosta kuluu ohjelmistovirheiden korjaamiseen. (Eloranta 2015.)

Tällainen "on-site-aika" eli kentällä kuluva aika on erittäin kallista yritykselle, etenkin jos projektin aikataulu venyy yli suunnitellun, ja käyttöönotto viivästyy virheiden etsinnän ja korjaamisen vuoksi. Käyttöönotossa löytyy tyypillisesti myös teknisiä ja/tai mekaanisia suunnitteluvirheitä, mutta ohjelmistovirheisiin nähden nämä ovat harvinaisempia.

Eloranta (2015) toteaa virtuaalista käyttöönottoa käsittelevässä diplomityössään: "On taloudellisesti erittäin kannattavaa, mikäli suunnittelu- ja käyttöönottoprosessia voidaan tehostaa, nopeuttaa ja yksinkertaistaa."

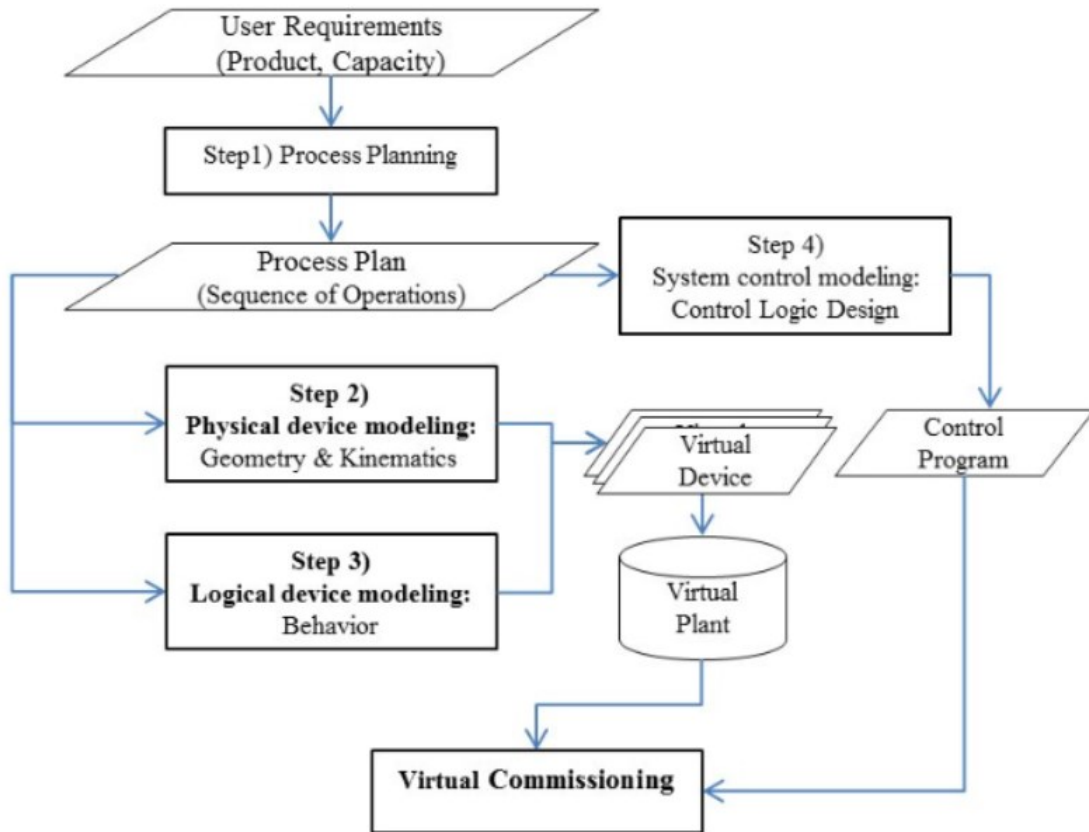


Kuvio 7. Käyttöönottoon ja virheiden korjaukseen kuluva aika (Eloranta, 2015 mukailen Wunsch 2008).

Suunnittelun ja käyttöönoton tehostamiseksi sekä nopeuttamiseksi on mahdollista rakentaa virtuaalinen malli tuotantolaitoksesta. Virtuaalimaailmassa on mahdollista tehdä käyttöönotto etukäteen ennen fyysisten laitteiden olemassaoloa. Tällaista käyttöönottoa kutsutaan nimellä virtuaalinen käyttöönotto (VC, Virtual Commission). (Lechler ym. 2019.)

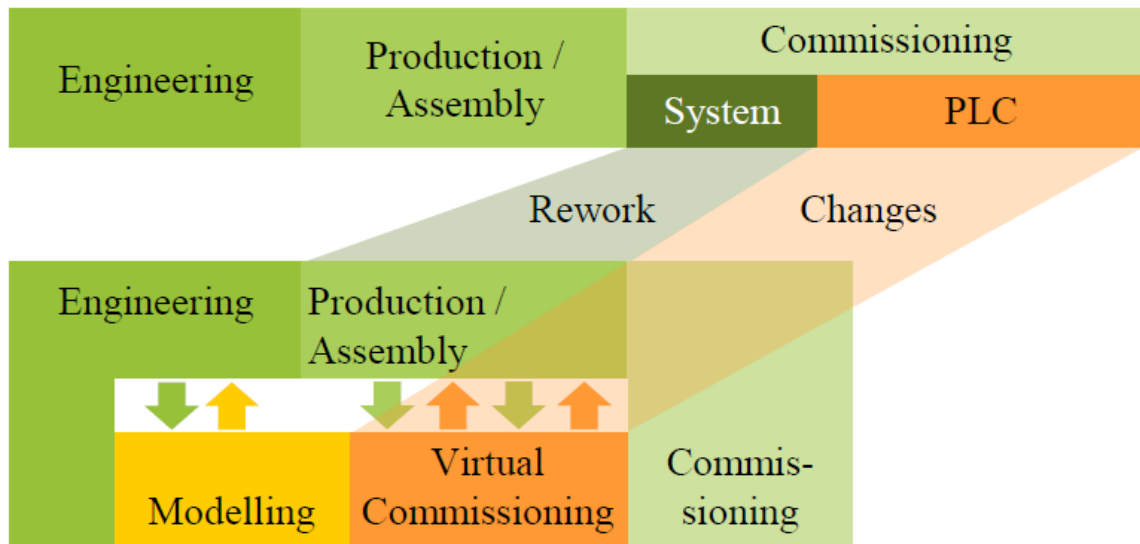
Virtuaalinen käyttöönotto mahdollistaa tuotantojärjestelmän toiminnan varmistamisen, ja optimoinnin. Sen avulla voidaan luoda tehokas toimintaympäristö, missä tuotetta/järjestelmää voidaan testata jo aikaisessa vaiheessa. Tämä mahdollistaa niin kone-, sähkö- kuin automaatio suunnittelussakin tapahtuneiden virheiden havainnoinnin. Virheisiin voidaan puuttua siis jo ennen varsinaista käyttöönottoa. Onnistuneelle virtuaaliselle käyttöönotolle on edellytyksenä, että se sisältää realistiset 3D-mallit (geometria, kinematiikka, dynamiikka), sähkö- ja ohjauslaitteet sekä laitetta ohjaavan PLC ohjelmiston. (Lee & Park 2014.) Lisäksi vaaditaan ohjelmisto, jonka ympäristössä virtuaalinen

käyttöönotto suoritetaan. Usein ohjelmia joudutaan käyttämään rinnakkain. Kuviossa 8 on esitetty esimerkin omaisesti virtuaalisen käyttöönoton vaiheita.



Kuvio 8. Esimerkki virtuaalisen käyttöönoton vaiheista (Lee & Park 2014).

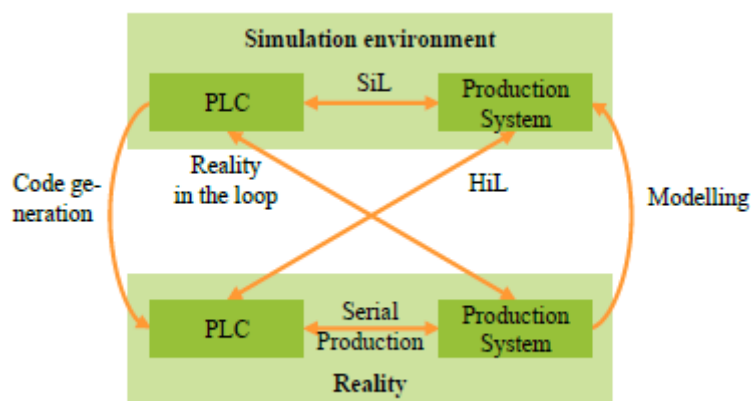
Perinteisessä suunnittelu- ja käyttöönottoprosessissa on tuotteen suunnittelu- ja valmistusvaiheen oltava täysin tehtynä ennen käyttöönottoa. Vasta tämän jälkeen fyysinen käyttöönotto ja samalla automaation testaaminen on mahdollista. Suunnittelu- ja käyttöönottoprosessin järjestys muuttuu, jos käyttöönotto on mahdollista tehdä virtuaalisesti. Kun itse tuotetta ja se ohjelmaa voidaan testata jo suunnitteluvaiheessa, voidaan eri vaiheita tehdä samanaikaisesti. Tämä mahdollistaa virheiden aikaisemman havaitsemisen, niin itse laitteen kuin ohjelmistojen kohdalla. (Lechler ym. 2019.) Kuviossa 9 on havainnollistettu erot suunnittelu- ja käyttöönottoprosesseissa.



Kuvio 9. Suunnittelu- ja käyttöönottoprosessi ilman virtuaalisen käyttöönoton mahdollisuutta, ja virtuaalisen käyttöönoton kanssa (Lechler ym. 2019).

### 2.5.1 Silmukkasimulaatiot

Virtuaalinen käyttöönotto perustuu "In-Loop" eli silmukkasimulaatioihin. Näillä tarkoitetaan simulaatiotapaa, jossa simuloitava osa on vuorovaikutuksessa ulkoisen, erillisen komponentin kanssa. Simulaation tarkempi nimi määritetään sen mukaan, mikä erillinen komponentti on kyseessä. (Nokka 2013.) Kuviossa on havainnollistettu simulaatioperiaatteita.



Kuvio 10. Simulaatioperiaatteet (Lechler ym. 2019).

*Hardware-in-the-loop (HiL)* menetelmässä simulointi yhdistetään reaali maailman fyysiseen komponenttiin. Komponenttina voi toimia esimerkiksi oikosulkumoottori tai logiikkaohjain. Virtuaalinen osa reagoi tässä todelliselta komponentilta tuleviin syötteisiin, ja palauttaa tiedon takaisin komponentille. Toimiakseen yhdessä tarvitaan fyysisen ja simuloitun osan välille jokin rajapinta, esimerkiksi tiedonsiirto-ohjelma. (Lechler ym. 2019 & Nokka 2013.)

*Simulation in the loop (SiL)* simuloinnissa ei tarvita lainkaan reaali maailman fyysisiä komponentteja. Tässä menetelmässä tieto siirtyy virtuaalisten komponenttien ja ohjaimien välillä. (Lechler ym. 2019 & Nokka 2013.) Menetelmä voidaan siis toteuttaa täysin virtuaalisesti. Tämä menetelmä on oleellinen virtuaalisen käyttöönoton kohdalla, jos järjestelmän toimintaa halutaan testata ennen fyysisen laitteiston olemassaoloa.

*Reality in the loop (RiL)* kohdalla virtuaalinen logiikkaohjain kytketään esimerkiksi tuotantojärjestelmään. Tällöin sen tiettyjen komponenttien toimintaa voidaan testata eri logiikkaohjelmissa. Virtuaalinen laitteen/järjestelmä malli voidaan myös yhdistää sitä vastaavaan todelliseen osaan, jolloin sen tulevaa toimintaa voidaan testata. Tällöin puhutaan *hybridisimulaatiosta*. (Lechler ym. 2019.)

## 2.5.2 Virtuaalinen käyttöönotto ja digitaalinen kaksonen

Virtuaalinen käyttöönotto sisältää siis itsessään aina simulaatiota, jollain edellä mainituista silmukkaperaiaatteista. Lisäksi simulaatiomalli määritellään edelleen tarkemmin kuten teoriassa on aikaisemmin mainittu. Simulaatioteknologia mahdollistaa virtuaalisen käyttöönoton, ja digitaalisen kaksonen toiminnan. Mutta miten virtuaalinen käyttöönotto ja digitaalinen kaksonen ovat yhteydessä ja miten ne *eroavat* toisistaan?

Virtuaalinen käyttöönotto suoritetaan simulaation avulla ennen kuin varsinainen järjestelmä on rakennettu. Sillä voidaan testata, varmentaa ja optimoida järjestelmää. Samalla järjestelmän ongelmia ja vikoja voidaan havaita, jolloin niihin puuttuminen on helpompaa ja edullisempaa kuin varsinaisen järjestelmän käyttöönotossa. Tietoa ei siis kulje varsinaisesta järjestelmän ja virtuaalisen järjestelmän välillä, sillä varsinaista järjestelmää ei ole olemassa. Tämän vuoksi ei luonnollisesti voida myöskään saada dataa mistään varsinaisen järjestelmän komponenteista. (Jackson, 2020.) *HiL* menetelmällä tämä on mahdollista, mutta se koskee vain yksittäisiä komponentteja, ei koko järjestelmää.

Digitaalinen kaksonen määritelmänsä mukaan taas sisältää digitaalisen sekä fyysisen vastineen järjestelmästä, sekä näiden välisen reaaliaikaisen tiedonsiirron. Tällöin digitaalisen vastineen antama ”kuva” on realistinen verrattuna todelliseen, eikä toimita vain virtuaaliseen malliin käyttäjän syöttämien tietojen perusteella. Jackson (2020) tiivistää eron

lyhyesti seuraavasti: Keskeinen ero näiden menetelmien välillä on se, että virtuaalinen käyttöönottoprosessi käyttää tuotantojärjestelmästä tehtyä mallia, kun taas digitaalinen kaksosen on virtuaalinen kopio varsinaisesta fyysisestä järjestelmästä.

Virtuaalinen käyttöönotto, ja siinä käytettävä malli, voidaan kuitenkin Madni (2019) mukaan luokitella digitaalisen kaksosen esiasteeksi. Sen avulla voidaan simuloida systeemin fyysistä käyttäytymistä ja tietoteknisiä toimia. Virtuaalisen käyttöönotossa käytettävä malli täyttää myös ainakin osaksi Grieves & Vickers (2017) määritelmän digitaalisen kaksosen prototyypistä (DTP).

### 3. Toimeksianto

#### 3.1 Tavoitteet ja tausta

Työn tavoitteena oli luoda Dieffenbacher Panelboard OY:lle yksinkertaistetut versiot konesuunnittelun 3D malleista. Näitä malleja sovelletaan yrityksen ensimmäisessä virtuaalisessa käyttöönotossa. Mallit ovat konesuunnittelun tarkkoja malleja, joiden perusteella laitteet valmistetaan. Täten mallit ovat hyvin yksityiskohtaisia, sisältäen tuhansia erillisiä komponentteja ja piirteitä. Tämä johtaa siihen, että jo yhden täydellisen mallin käyttäminen eri ohjelmistoilla on raskasta. Tämä aiheuttaa helposti suorituskyvyn laskemisen simulaatio-ohjelmistossa.

Virtuaalisessa käyttöönotossa oli tarkoituksena simuloida kokonainen tuotantolinjasto, jolloin suorituskyky ei käytössä olevissa ohjelmistoissa ja tietokoneissa yksinkertaisesti riitä. Tulevaisuudessa on suunnitelmana tehdä jopa koko tehtaan laitteiston kattavia virtuaalisia käyttöönottoja. Ongelma on todennettu Locher (2020) diplomityössä, joka käsittelee virtuaalisen käyttöönoton rakentamista Dieffenbacher konsernille. Yksityiskohtien ja komponenttien määrän vähentäminen ovat avainasemassa suorituskyvyn nostamiseksi. Locher (2020) työstä esille nousseet suorituskyvyn ongelmat ovat peruste sille, miksi malleja tulee yksinkertaistaa.

Mallien työstäminen aloitettiin yksittäisestä kitkarullakuljettimesta. Alussa ajatus oli kokeilla, kuinka tämä käytännössä onnistuu käytössä olevalla CAD ohjelmistolla (Creo Parametric). Kun kitkarullakuljettimen yksinkertaistaminen oli tehty, mallia testattiin. Testi osoitti mallin toimivuuden ja yksinkertaistetut mallit päätettiin toteuttaa koko levylinjaston laitteista. Tässä vaiheessa todettiin, että aihe soveltuu opinnäytetyöksi, sillä aihe on ajankohtainen, innovatiivinen ja varsin laaja.

#### 3.2 Levyn käsittelylinja

Virtuaalisen käyttöönoton kohteena oli levynkäsittelylinja, eli RBH-linja (Raw Board Handling). Linja sisältää n. 40 laitetta, joista virtuaaliseen käyttöönottoa varten 36 laitetta oli oleellisia. Laitteet ja niiden positiot ovat nähtävissä taulukosta 3.

040.010	Puristimen ulostulokuljetin
040.020	Kuplasaha
040.050	Reunasaha
040.100	Lentäväsaha
040.120	Kitkarullakuljetin

040.140	Kitkarullakuljetin
040.150	Hihnakuljetin
040.170	Kitkarullakuljetin
040.250	Lajittelukuljetin
040.260	Levy murskaimen kuljetin
040.290	Kitkarullakuljetin
040.300	Esipinonta-asema
040.320	Jäähdytyskääntäjän kuljetin
040.330	Kitkarullakuljetin
040.340	Jäähdytyskääntäjän kuljetin
040.350	Kitkarullakuljetin
040.400	Jäähdytyskääntäjä
040.420	Jäähdytyskääntäjä
040.500	Jäähdytyskääntäjän kuljetin
040.510	Kitkarullakuljetin
040.520	Jäähdytyskääntäjän kuljetin
040.530	Kitkarullakuljetin
040.540	Jäähdytyskääntäjän kuljetin
040.550	Kitkarullakuljetin
040.560	Jäähdytyskääntäjän kuljetin
040.600	Jäähdytyskääntäjä
040.620	Jäähdytyskääntäjä
040.700	Jäähdytyskääntäjän kuljetin
040.710	Kitkarullakuljetin
040.720	Jäähdytyskääntäjän kuljetin
040.750	Kitkarullakuljetin
040.770	Vinorullakuljetin
040.790	Nipun muodostus
040.800	Nipun muodostusasema
040.820	Pinorullakuljetin
040.850	Ketjukuljetin

Taulukko 3. Työssä käytetyt RBH linjan laitteet ja niiden positiot.

Levyn käsittelylinja kattaa laitteet jatkuvatoimisen puristimen jälkeen välivarastointiin saakka. Pääpiirteittäin linjan toiminta on seuraavanlainen: Kuumapuristimessa valmistettu puulevy saapuu linjalle jatkuvana levyaihiona. Aluksi levyn pinnassa mahdollisesti olevat höyrynpaineesta muodostuneet kohoumat puhkaistaan levypinnan yläpuolella olevan kuplasahayksikön avulla. Tämän jälkeen reunasahauksessa levyaihio sahataan haluttuun leveyteen. Sen jälkeen levyaihio sahataan tuotanto-ohjelman mukaisiin pituusmittoihin lentävällä sahalla levyaihion liikkeessä jatkuvasti eteenpäin. Seuraavaksi levyn paksuus,

massa ja sisäinen laatu mitataan erityismittavälineillä automaattisesti. Tästä eteenpäin levyjä kuljetetaan kitkarulla- ja hihnakuljettimilla, joissa niitä kiihdytetään paikoittain, jotta levyjen väliin saadaan sopiva väli. Huonolaatuiset levyt menevät kuljetuksen aikana joko erilliseen pinoon, tai suoraan murskaimeen. Hyväksytyt levyt esipinotaan, josta ne menevät jäähdytyskääntäjille, missä ne jäähdytetään sopivaan lämpötilaan. Jäähdytyksen jälkeen esipinotuista levyistä muodostetaan korkeampi pino yhdessä tai useammassa vaiheessa, linjan layout-ratkaisusta riippuen. Pino päättyy lopulta kuljetetuksi varastoon. Tämän jälkeen leypino ajetaan toiselle linjastolle, jossa levyt ajetaan tarkkoihin mittoihin sekä viimeistellään. Opinnäytetyössä tätä jälkimmäistä linjastoa ei käsitelty.

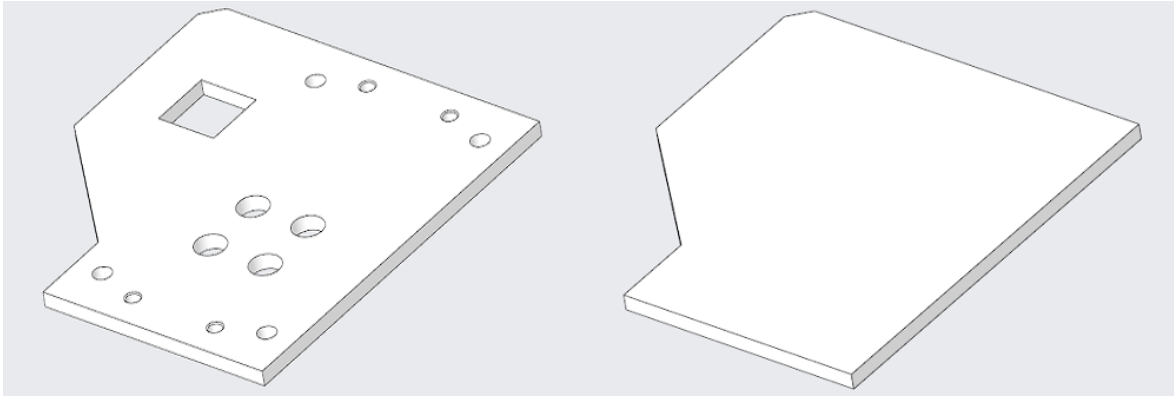
Vaikka linjan toiminta on itsessään hyvinkin suoraviivaista, sisältää se huomattavan määrän erilaisia laitteita. Linjasto toimii täysin automatisoidusti, joten erilaisten sensorien sekä sähkö- ja ohjaustoimilaitteiden määrä on suuri. Tämä johtaa usein ongelmiin käyttöönoton aikana. Tästä syystä linjan testaus virtuaalisesti on kannattavaa, sillä ongelmien paikallistaminen ja korjaaminen varsinaisessa käyttöönottovaiheessa on erittäin kallista.

### 3.3 Toteutus

#### 3.3.1 3D mallien yksinkertaistaminen Creo Parametricilla

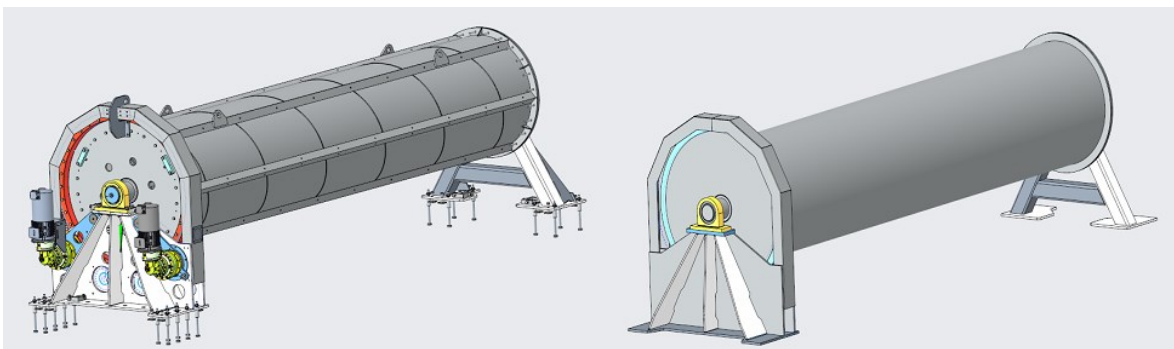
Mallien yksinkertaistaminen tehtiin Dieffenbacher Panelboard OY:n käyttämällä Creo Parametric ohjelmalla. Creo Parametric on PTC:n tarjoama CAD-ohjelma, jolla on mahdollista luoda esimerkiksi kolmiulotteisia malleja, kokoonpanoja, valmistus-, hitsaus- ja kokoonpanokuvia, erilaisia simulointeja sekä analyyssejä. Ohjelmisto tukee lisäksi parametristä mallinnusta. (PTC 2021a.)

Mallien yksinkertaistamisessa tarkoituksena oli poistaa mahdollisimman paljon yksityiskohtia eli piirteitä ja komponentteja laitteiden CAD-malleista. Poistettavat piirteet riippuivat käsiteltävästä osasta, mutta tyypillisesti ainakin seuraavat piirteet poistettiin: viisteet, pyöristykset, ja reiät. Lisäksi palkit voitiin esittää umpinaisina. Komponenttien osalta poistettiin kaikki aluslevyt, mutterit, pultit ja ruuvit. Mallin yksinkertaistamista kuvataan kuvassa 3.



Kuva 3. Yksittäisen laitteen osan alkuperäinen ja yksinkertaistettu esitystapa.

Yksinkertaistusta tehdessä piti huomioida, että laitteen toiminnallisuus on mahdollista simuloida edelleen realistisesti. Tämä tarkoitti, että erilaiset anturit tuli säilyttää mallissa tarkasti paikoitettuna, tämä koski myös esimerkiksi sylinterejä, painopyöriä ja akseleita. Toimilaitteista voitiin kuitenkin laitteesta riippuen poistaa määrättyjä piirteitä. Muista toimilaitteista poiketen sähkömoottorit voitiin poistaa täysin, sillä ne eivät olleet simulaation kannalta tärkeitä, sillä akselien pyöriminen ja sähkömoottoreilla toteutetut lineaariliikkeet voidaan simuloida ilman niitä. Simulaatiossa käsiteltävien puulevyjen tuli paikoittaa myös realistisesti, joten toiminnan kannalta tärkeät mitat eivät saaneet muuttua, kun malleja käsiteltiin. Kuvassa 4 on esitetty jäädytyskääntäjän alikokoonpanon alkuperäinen ja yksinkertaistettu mallin esitystapa.



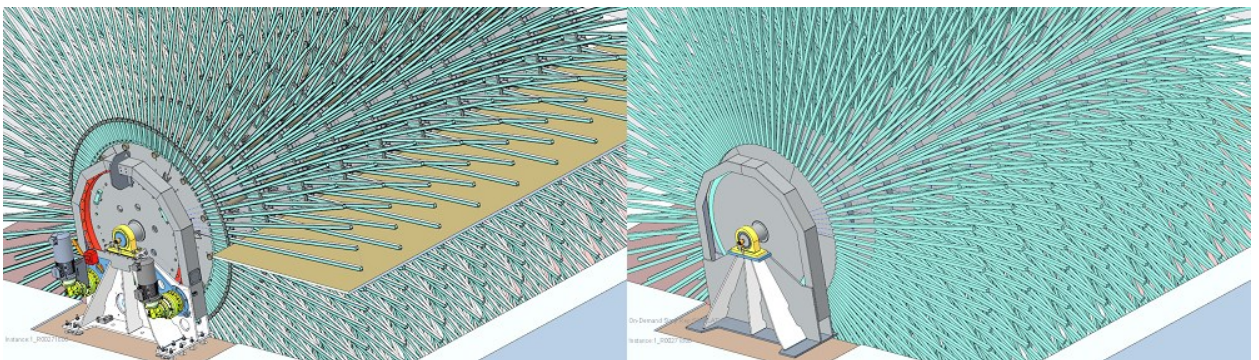
Kuva 4. Alikokoonpanon alkuperäinen ja yksinkertaistettu esitystapa.

Malleista ei kuitenkaan haluttu tehdä kokonaan uusia versioita, vaan yksinkertaistetut mallit haluttiin sisällyttää alkuperäisten mallien sisään. Tämä oli mahdollista Creo Parametric ohjelman "Simplified representation" työkalun avulla. Tämän niin sanotun SIMP REP:in

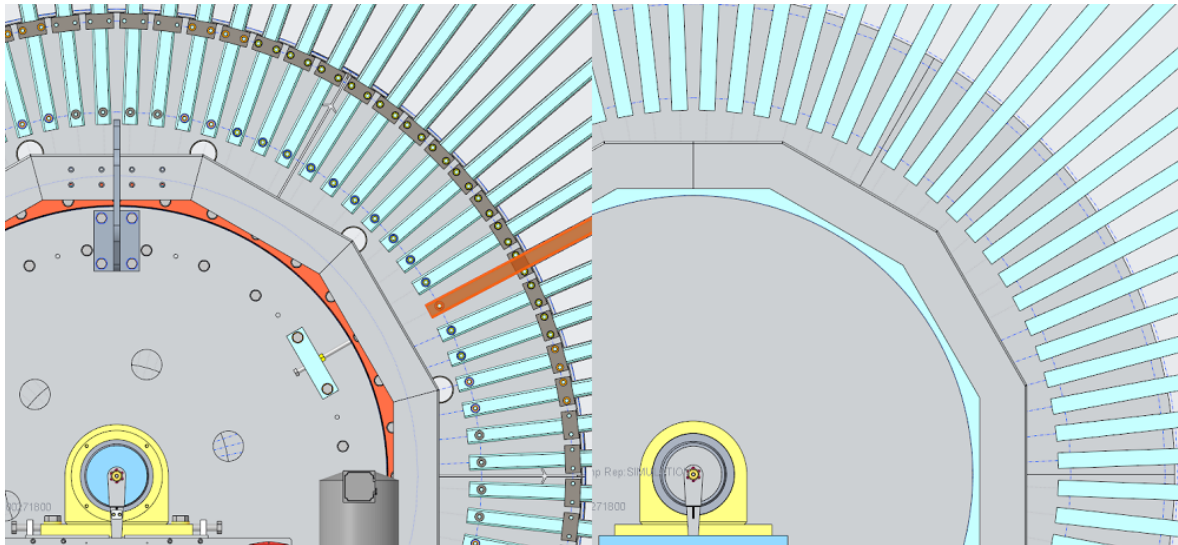
avulla voidaan luoda eri esitystapoja käsiteltävästä mallista. SIMP REPin avulla voidaan siis määrittää, mitkä piirteet ja komponentit malliin sisällytetään luodussa esityksessä. Lisäksi voidaan määrittellä mitä esitystapaa mistäkin komponentista käytetään.

Suuria kokoonpanoja käsitellessä oli edettävä niin sanotusti alhaalta ylöspäin (kuvat 5 & 6). Käytännössä tämä tarkoittaa, että suuren kokoonpanon yksinkertaistusprosessi on suhteellisen työläs ja eteni seuraavanlaisesti:

- Avataan pääkokoonpanotaso.
- Edetään ”alaspäin” kokoonpanossa, kunnes ollaan osatasolla.
- Tehdään osalle uusi esitystapa ja poistetaan osasta epäolennaiset piirteet → saadaan yksinkertaistettu esitystapa yksittäisestä osasta.
- Palataan aikaisempaan alikokoonpanoon, poistetaan ylimääräiset komponentit (ruuvit, mutterit jne.) ja määritellään säilytettävien komponenttien esitystapaksi yksinkertaistettu versio → saadaan yksinkertaistettu esitystapa alikokoonpanosta.
- Jatketaan prosessia kohti pääkokoonpanoa, kunnes on edetty takaisin pääkokoonpanoon, sen jälkeen käsitellään toinen alikokoonpano edellä mainitulla tavalla.
- Kun kaikki pääkokoonpanon alikokoonpanot on käsitelty, määritellään pääkokoonpanoon kuuluvien alikokoonpanojen esitystapa yksinkertaistetuksi → saadaan valmis yksinkertaistettu malli.



Kuva 5. Pääkokoonpanon alkuperäinen ja yksinkertaistettu esitystapa.



Kuva 6. Tarkennettu näkymä pääkokoonpanon esitystavoista.

Huomioitavaa on, että pääkokoonpanotaso sisältää useita alikokoonpanoja, jotka edelleen jakautuvat omiksi alikokoonpanoiksi. Tästä syystä yhden mallin yksinkertaistaminen saattaa viedä useita tunteja, tai jopa päiviä. Prosessia kuitenkin helpotti huomattavasti, että toimittiin PDM ympäristössä. Lisäksi käytettiin hyväksi "Family tableja", jos se oli mahdollista.

PDM ympäristössä toimimisen suurena etuna oli se, että jos samaa osaa käytettiin useassa laitteessa, ei siihen tarvinnut tehdä uutta esitystapaa, sillä kappaleet haettiin PDM-järjestelmän avulla serveriltä. Tällöin samalle osalle ja/tai kokoonpanolle ei tarvinnut tehdä yksinkertaista esitystapaa kuin kerran, vaikka osaa tai kokoonpanoa käytettiin useissa kohteissa.

Family table on taulukko, joka sisältää määrätyn kappaleen eri versiot eli instanssit. Family table sisältää lisäksi "geneerisen" mallin, jonka kaikki ominaisuudet periytyvät taulukon jäsenille, ellei toisin määritellä. Jos suuri kokoonpano sisältää esimerkiksi eri halkaisijalla olevia painopyöriä, mutta ne ovat samaa "perhettä", riittää että geneeriseen malliin tehdään yksinkertaistettu esitystapa, jolloin se periytyy muillekin jäsenille. Tämä nopeuttaa prosessia laitteissa, jossa samojen perheiden osia on paljon.

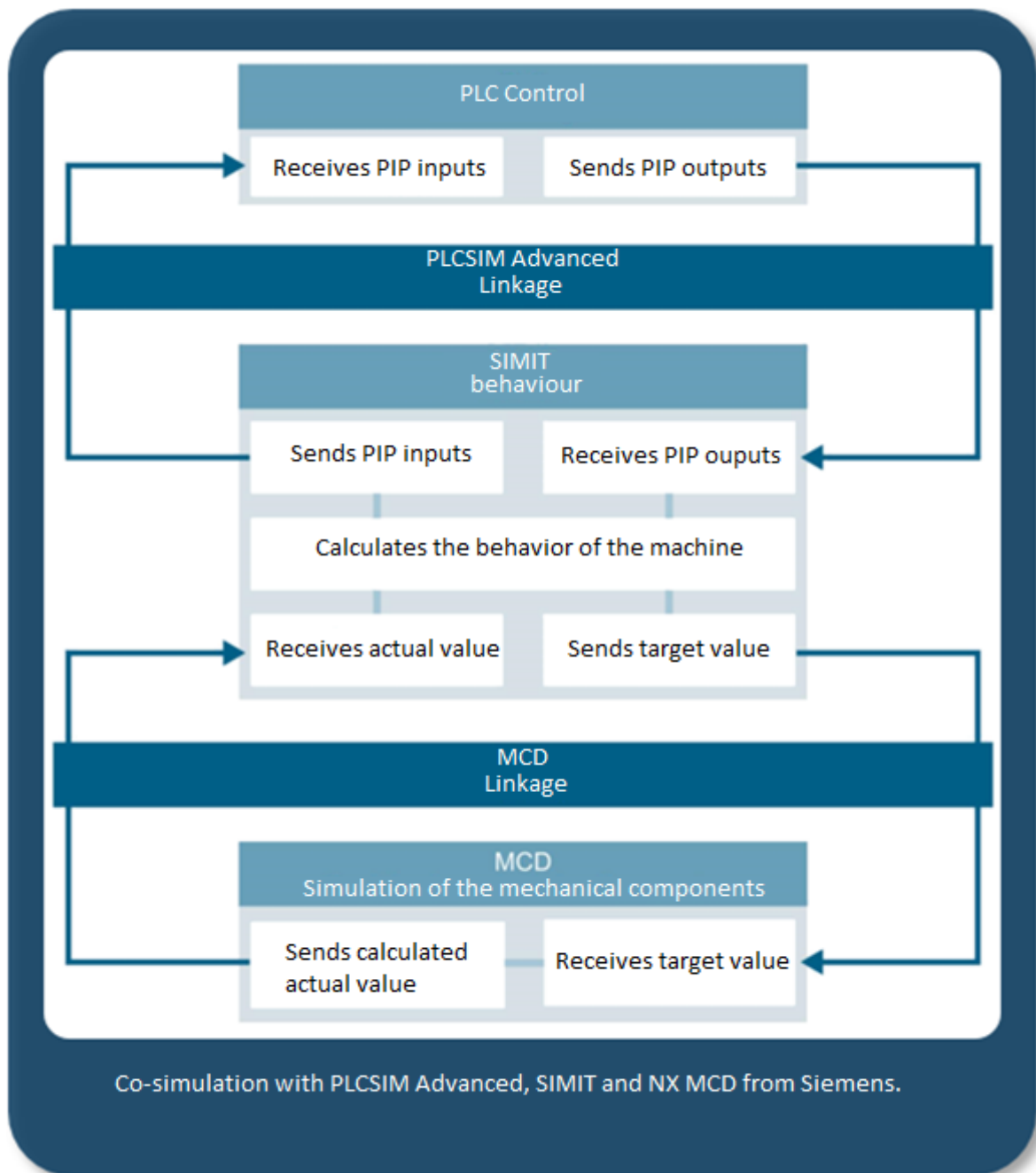
PDM ja family tablen hyödyt tulivat esille etenkin laitteiden kohdalla, joita esiintyy linjalla useampia. Tällaisia laitteita olivat esimerkiksi kitkarullakuljettimet. Kitkarullakuljettimet ovat pääosin samankaltaisia, joten niissä on käytetty paljon samoja perheiden komponentteja. Tästä johtuen ensimmäisen mallin yksinkertaistamisen jälkeen muiden kuljettimien käsittely oli huomattavasti nopeampaa. Monet laitteista ovat kuitenkin itsenäisiä kokonaisuuksia,

joten näissä edut eivät toistaiseksi tulleet niin selkeästi esille. PDM-ympäristössä toimiminen mahdollistaa kuitenkin sen, että tulevaisuudessa, jos nykyisten laitteiden osia käytetään uusissa laitteissa, niissä on jo olemassa yksinkertaistetut esitystavat.

Osasta laitteita ei ollut olemassa 3D-malleja, vaan ainoastaan kaksiulotteiset mallit. Nämä mallit oli suunniteltu Auto-CAD ohjelmalla. Laitteet olivat kuitenkin oleellisia linjan simuloinnin kannalta, joten niistä tehtiin Creo Parametric ohjelmalla 3D-versiot. Tässä hyödynnettiin muiden tehtaiden laitteiden malleja. Haasteena oli kuitenkin se, että täysin vastaavia ei käytetty muissa tehtaissa. Tämä tarkoitti sitä, että malleja piti muuttaa, niin mittojen kuin toiminnallisuudenkin kannalta. Malleja muokattiin niin että niiden toiminnan kannalta tärkeät mitat vastasivat Auto-Cad malleja. Lisäksi antureita ja toimilaitteita jouduttiin siirtämään ja muokkaamaan.

### 3.3.2 Simulointi Siemens NX MCD ohjelmistolla

Virtuaaliseen käyttöönnoton tekemiseen yrityksessä on käytössä Siemens NX-ohjelmisto. Ohjelman valinnan perusteina on ollut ohjelman suorituskyky, käytettävyys ja kustannustehokkuus (Locher 2020). Tarkemmin määriteltynä virtuaalinen käyttöönnotto tehtiin Siemens NX MCD (Mechatrical Concept Design) ohjelmalla. MCD on Siemens NX-ohjelmiston lisäosa, jossa simuloidaan mekaanisten laitteiden toimintaa virtuaalisessa ympäristössä. Siinä CAD-malliin luodaan kinematiikka, liikeradat, kosketuspinnat ja anturit. Sillä voidaan myös tehdä osien välinen törmäystarkastelu. (Siemens 2021a.) Lisäksi MCD:n rinnalla on käytössä Siemensin TIA-Portal, PLC-SIM Advanced ja SIMIT ohjelmat. Virtuaalinen käyttöönnotto tehtiin yrityksen pääkonttorilla Saksassa. Kuviossa 11 on esitetty simulaatorakenne ja tiedonsiirto ohjelmien välillä.

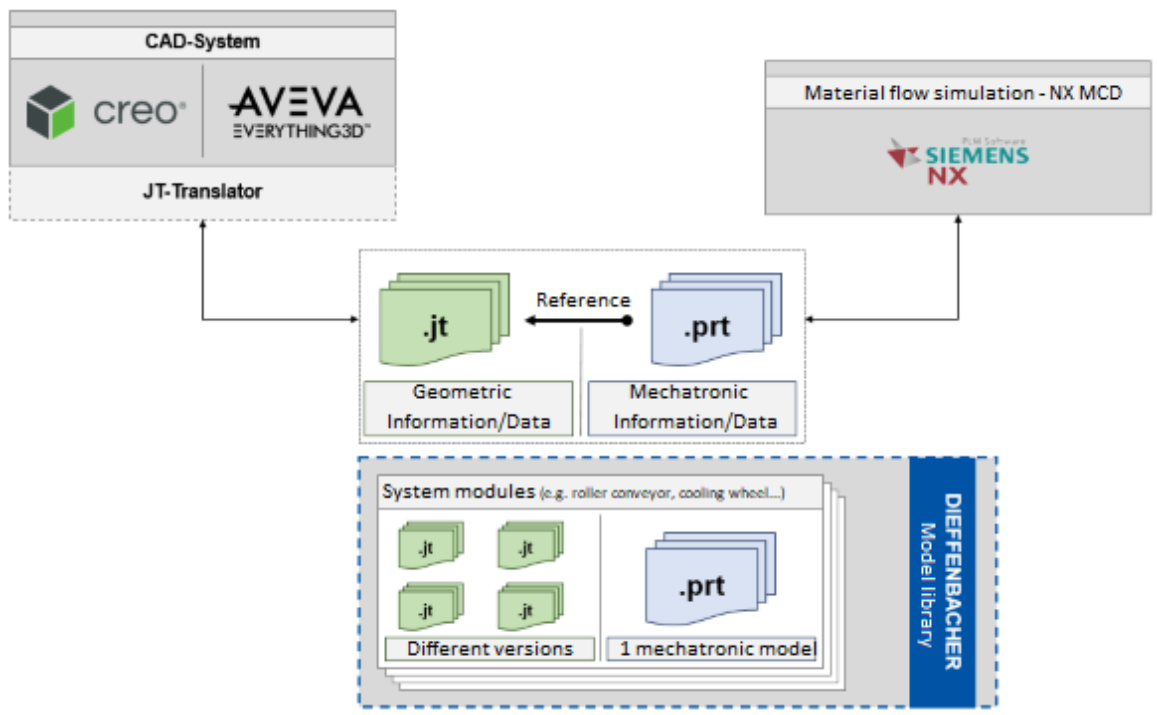


Kuva 11. Simulaattorirakenne (mukailtu Locher 2020).

### Mallin vieminen Creo Parametric-ohjelmistosta Siemens NX-ohjelmaan

Kun alkuperäinen malli oli yksinkertaistettu, se tuotiin Siemens NX ohjelmaan. Siemens NX ei tue Creo Parametricin tallennusmuotoa (.prt), joten tiedostomuoto muutettiin ensin yhteensopivaksi. Haluttuun tallennusmuotoon (.jt) päästiin niin sanotulla kääntäjällä, jolla tiedostomuoto oli mahdollista muuttaa Creo Parametric ohjelman kautta oikeaksi. Tiedostomuotoa kääntäessä tehtiin myös erilaisia määrittäyksiä, jotka vaikuttavat lopullisen, käytettävän mallin ominaisuuksiin.

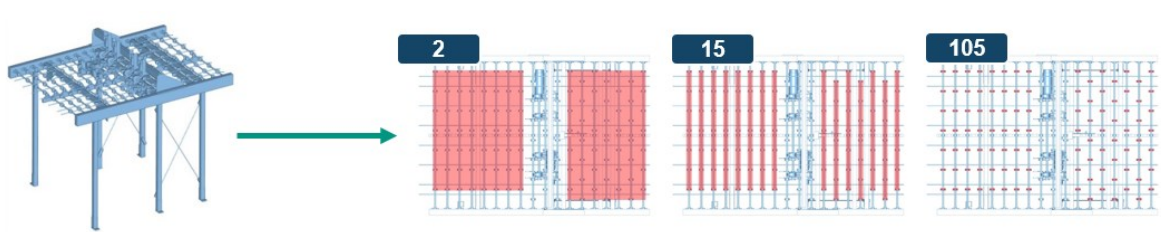
Kun tiedostomuoto oli oikea, tuotiin se Siemens NX ohjelmaan. Tämä tiedosto jaettiin kahteen eri osaan, jolloin saatiin prt- ja .jt-tiedostot. Tiedostoista .prt-muotoon sisällytetään mallin kinemaattisen tiedot ja niiden geometriset referenssit. Tähän tiedostoon jää yhteys .jt-tiedostoon. Toinen tiedosto (.jt) sisältää mallin geometrian. Tiedostojen välinen yhteys mahdollistaa pelkän geometrian muutokset, esimerkiksi kuljettimen pituuden muutos. Tämän jälkeen pelkkä kinemaattisen ominaisuuden referenssin muutos riittää, eikä uutta kinemaattikan mallia tarvitse luoda. Yhteys mahdollistaa lisäksi sen, että samaa kinemaattista mallia voidaan käyttää useissa eri geometrioissa, jos niiden kinemaattisissa ominaisuuksissa ei ole eroa. Kuvio 12 havainnollistaa tiedostomuodon muuttamista, sekä .jt ja .prt mallin välistä yhteyttä.



Kuvio 12. Tiedostomuodot ja niiden väliset yhteydet (mukailtu Locher 2020).

Tiedostomuodon tuomat edut olivat syy miksi .jt tiedostomuoto valittiin käytettäväksi. Siemens NX tukee myös Creo Parametricin tallennusmuotoa .STEP, mutta tässä kinemaattinen ja geometrinen malli olisivat olleet yhtenäisiä. Tämä olisi tarkoittanut, että geometriset muutokset olisivat vaatineet myös kinemaattisten ominaisuuksien uuden määrittelyn ja ne olisivat olleet mallikohtaisia.

Siemens NX MCD ohjelmaan tuotu malli toimi simulaation prosessimallina. Prosessimalli sisältää siis laitteen fyysiset ominaisuudet (geometria, kinematiikka) ja vuorovaikutuksen eri antureiden kanssa. Prosessimalliin määritellään myös liike- ja kosketuspinnat, pyörimisakselit sekä voimat. Se, miten tarkasti esimerkiksi liike- ja kosketuspinnat tulee määritellä, riippuu tarkasteltavasta tilanteesta. Tässä tapauksessa esimerkiksi kitkarullakuljettimelle määriteltiin vain 2 liikepintaa, sillä se riitti simuloimaan puulevyn liikettä riittävän tarkasti. Jos kuljetinta ja sen toimintaa haluttaisiin tarkastella erittäin tarkasti, olisi mahdollista luoda liike- ja kosketuspinnat jokaiselle kitkarullalle erikseen. Tämä nostaisi liikepintojen määrää 103:lla kappaleella ja vaikuttaisi haitallisesti suorituskykyyn, mutta ei toisi lisäarvoa tällaisen suuren mittakaavan simulaatiossa. Kuvassa 7 on esitetty eri liikepintojen määrittelyjä kitkarullakuljettimesta.



Kuva 7. Kitkarullakuljettimen liikepintojen eri määrittelyvaihtoehtoja (Locher 2020).

### Simulaatiomalli ja menetelmä

Simulaatiomalli luokitellaan ei-reaaliaikaiseksi aikadiskreetiksi malliksi, jossa ohjauslaite (PLC, Programmable Logic Controller) mukauttaa sykliajan simulaatiomallin mukaan. Simulaatiomenetelmänä käytettiin SiL (Software in the Loop) menetelmää. SiL oli joustava ja tehokas menetelmä virtuaalista käyttöönottoa tehdessä, sillä kaikki komponentit ovat simuloituja, ja edelle mainittu sykliajan mukautuminen on mahdollista.

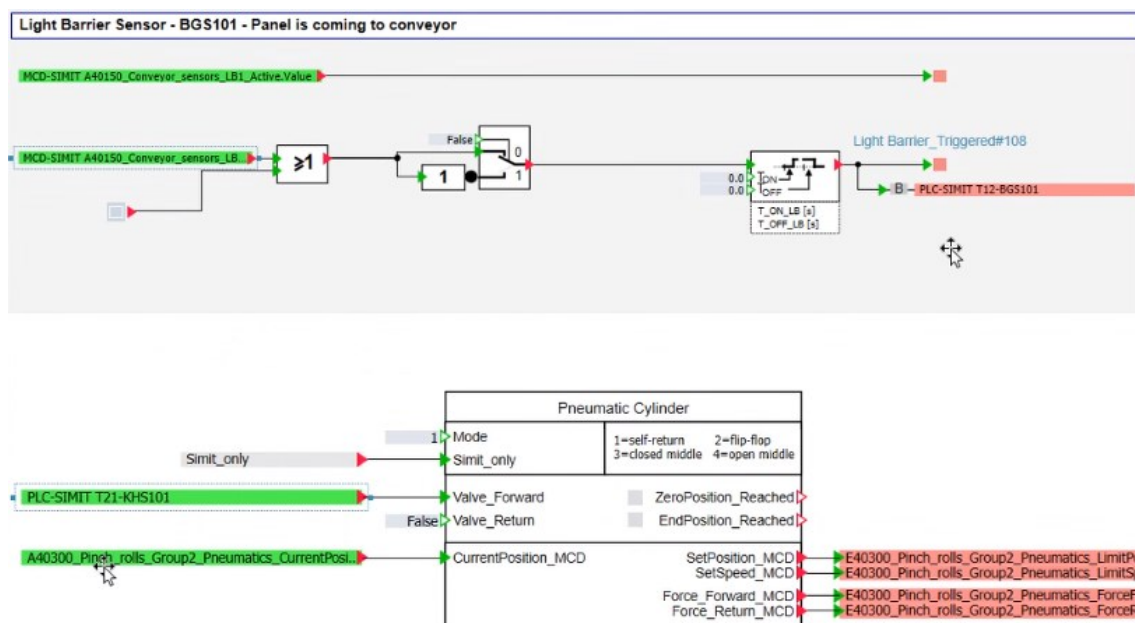
### Ohjelmat ja niiden välinen tiedonsiirto

Ohjauslaitteen toiminnan simuloimiseen käytettiin Siemensin PLCSim Advanced ohjelmaa. Ohjelma mahdollistaa erilaisten logiikkaohjaimien simuloimisen käyttöpaneeli-, (HMI, Human Machine Interface) turva- ja liikkeenohjausominaisuuksilla (Siemens 2021a). Simuloitu ohjauslaite oli Siemensin S7-1500 ohjelmoitava logiikka.

Laitteiden ohjaukseen tehdyt PLC-ohjelmat olivat samoja, joita olisi todellisuudessa käytetty perinteisen käyttöönoton aikana. Ohjelmat toimivat Siemensin TIA-Portal ympäristössä. TIA-Portal on Siemensin ohjelmointiympäristö, jossa ohjelmia voidaan luoda, muokata ja

testata. Myös laitteiden käyttöpaneelit voidaan tehdä TIA-Portal ohjelmassa. (Siemens 2021b).

Lisäksi käytössä oli Siemensin SIMIT ohjelmisto. SIMIT on simulointialusta, joka mahdollistaa ohjaus- ja automaatiojärjestelmien tekemisen ja testaamisen (Siemens 2021c). Tässä käyttöönotossa SIMIT ohjelma toimi PLC:n ja MCD välisenä IO-rajapintana. PLC-ohjelmalta tuleva tieto syötettiin SIMITille, jossa se tarvittaessa käsiteltiin ja siirrettiin edelleen MCD:ssä olevaan käytösmalliin. SIMIT toimi myös toiseen suuntaan, esimerkiksi kun jokin anturi vaikutti MCD mallissa, tieto siirtyi SIMITille käsiteltäväksi ja siitä takaisin edelleen ohjauslaitteelle ja TIA-Portaliin. SIMIT sisälsi kaikkien käytössä olevien toimilaitteiden käytösmallit, joita laitteiden prosessimallit vaativat toimiakseen realistisesti. SIMITiin pystytään yksilöllisesti määrittämään esimerkiksi, minkälainen venttiili tai anturi on kyseessä. Kuviossa 13 on esitetty paineilmasylinterin ja valoverhon käytösmallit.



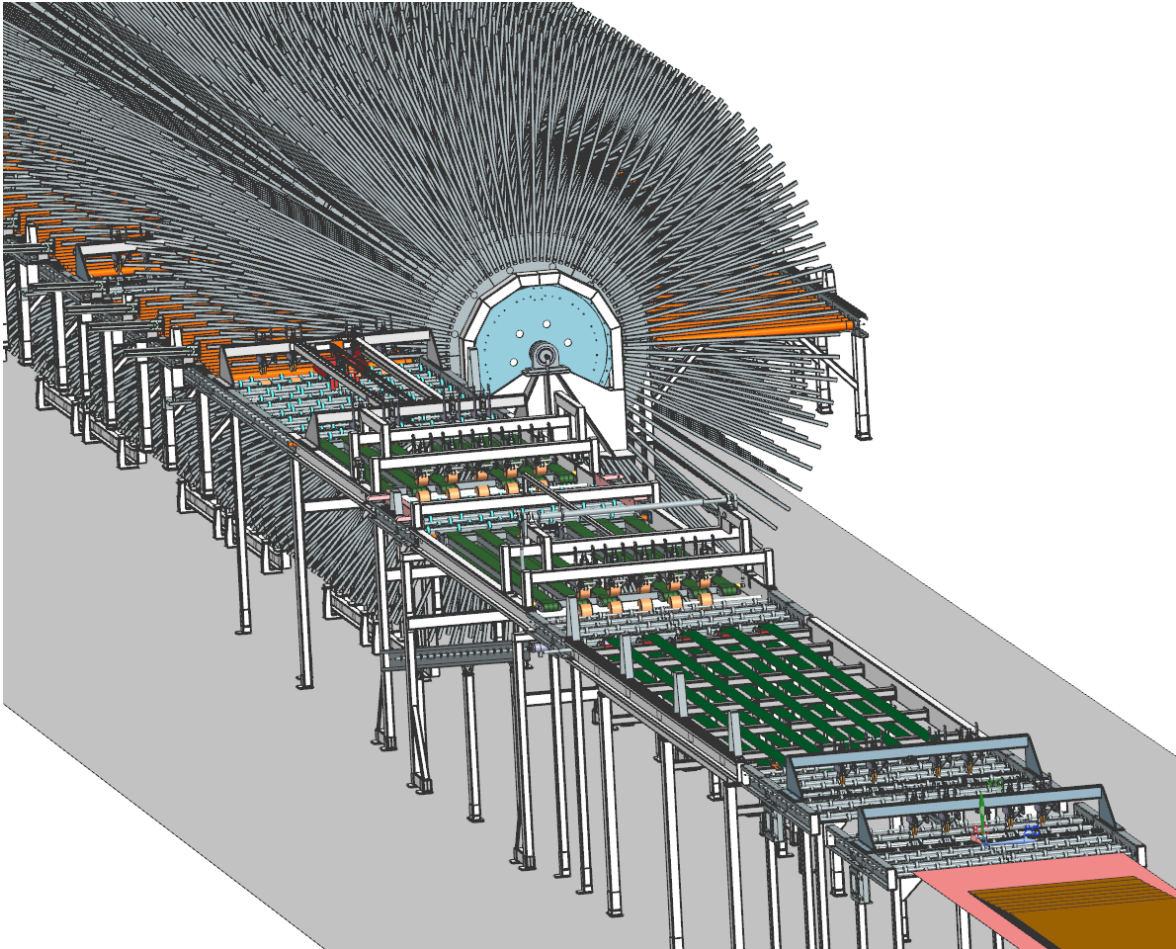
Kuvio 13. Kahden eri toimilaitteen käytösmallit.

Virtuaalisen käyttöönoton onnistuminen vaatii siis usean rinnakkaisen ohjelman toimintaa. Lisäksi vaaditaan hyvää yhteistyötä ja ymmärrystä eri osastojen välillä.

## 4. Tulokset

### 4.1 Tulosten todentaminen

Tuotantolinjaston kaikki 36 mallia saatiin yksinkertaistettua ja hyödynnettyä simulaatiomallin tekemisessä. Tuotantolinjan simulaatiomalli saatiin lähes kaikkien laitteiden osalta valmiiksi. Kuvassa 8 on esitetty linjaston alkupään simulointia Siemens NX ympäristössä yksinkertaistettuja malleja käyttäen.

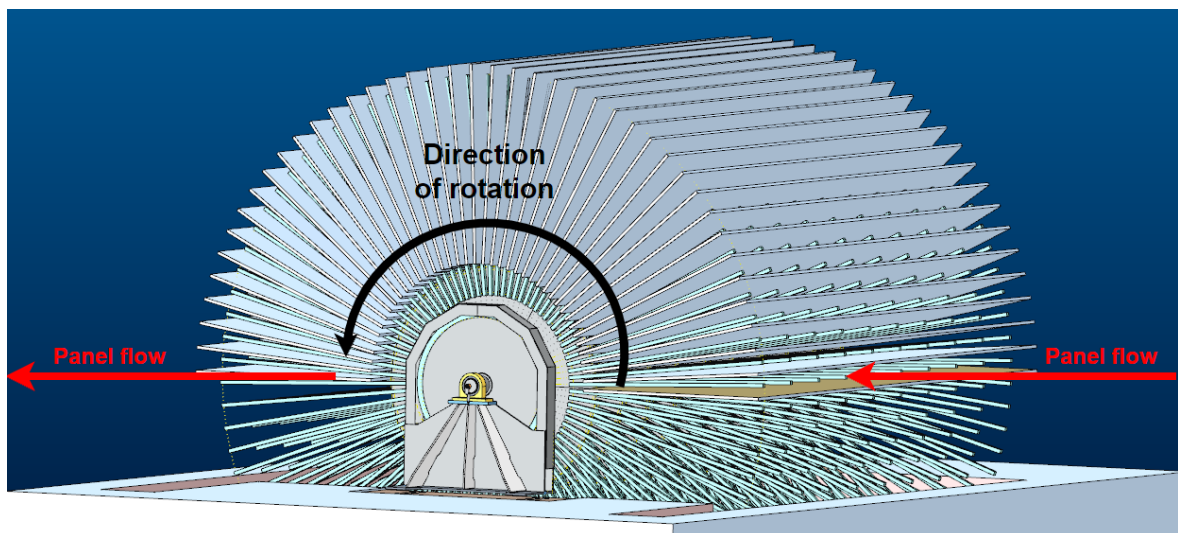


Kuva 8. Näkymä Siemens NX ohjelmalla tehdystä simulaatiosta.

Malleista poistettiin keskimäärin yli 6000 komponenttia laitetta kohden. Monimutkaisimmista ja suurimmista laitteista osia poistui paljon keskiarvoa enemmän, esimerkiksi jäähdytyskääntäjän yksinkertaistettu malli sisälsi 96 % vähemmän komponentteja kuin alkuperäinen malli. Yksinkertaistuksen ansiosta koko simuloitava tuotantolinjasto saattaa lopulta sisältää vähemmän komponentteja kuin yksi suuri alkuperäinen laite.

Piirteitä laitteista saatiin poistettua keskimäärin yli 8000 jokaista laitetta kohden. Piirteiden siirtymisessä Creo Parametric mallista Siemens NX ohjelmaan oli kuitenkin haasteita. Tästä johtuen osa piirteistä tuli Siemens NX ohjelman mallissa näkyviin, vaikka ne oli poistettu käytöstä SIMP REP työkalulla samaan tapaan kuten komponentit.

Piirteiden epätäydellisestä siirtymisestä huolimatta vaikutus simulaatioon oli selkeä. Vaikutus on todettu käytännössä tuotantolinjan simulaatiomallia tehdessä. Lisäksi todentamista varten tehtiin koe, jossa alkuperäistä ja yksinkertaistettu mallia verrattiin. Kokeessa rakennettiin yksinkertainen simulaatio yhdelle laitteelle. Laitteeksi valittiin jäähdytyskääntäjä, koska siinä oli mallien välillä suurin ero komponenttien määrässä. Kokeessa tehtiin jäähdytyskääntäjälle yksinkertainen sekvenssiohjelma. Sekvenssiohjelmassa jäähdytyskääntäjän vaakatasossa olevien sakaroiden väliin ajettiin puulevy, tämän jälkeen jäähdytyskääntäjää käännettiin 4–5°, jonka jälkeen jälleen uusi puulevy ajettiin sakaroiden väliin. Tätä jatkettiin, kunnes jäähdytyskääntäjä oli kääntynyt 180°. Tämän jälkeen puulevyjä aloitettiin ajamaan jäähdytyskääntäjän sakaroilta pois samaan tahtiin, kun uusia ajettiin toiselle puolelle. Tämä vastaa laitteen oikeaa toimintaa tuotantolinjastossa. Kuva 8 havainnollistaa kokeen tapahtumaa.



Kuva 8. Jäähdytyskääntäjä täyteen ladattuna ja puulevyjen liikesuunnat testissä.

Aluksi kokeessa testattiin yksinkertaistetun mallin toimintaa. Yksinkertaistettu malli toimi hyvin Siemens NX ohjelmistossa. Ohjelman suorituskyvyssä ei havaittu laskua ja ruudunpäivitysnopeus (FPS, Frames Per Second) pysyi hyvällä tasolla. Ohjelmistoa yritettiin kuormittaa kasvattamalla kääntäjien määrää yhdestä neljään ja simulaationopeutta

nostamalla. Kuormituksen lisäämisestä huolimatta ohjelma toimi hyvin, eikä suorituskyvyn kanssa tullut ongelmia. Tämän jälkeen testattiin alkuperäistä mallia. Heti testin alussa, erilaisia määrittämiä tehdessä, ohjelman toiminta hidastui. Ruudunpäivitysnopeus laski selvästi ja ohjelman toiminnassa havaittiin viiveitä. Kun jäähdytyskääntäjän sekvenssiohjelmaa suoritettiin, suorituskyvyn ongelmat tulivat selkeästi esille. Ohjelman suorituskyky laski niin paljon, ettei sillä pystyisi suorittamaan käyttöönottoa alkuperäisiä malleja käyttämällä.

Testillä ei saatu selville tarkkoja numeraalisia arvoja testien lopputuloksista. Esimerkiksi prosessorin, näytönohjaimen tai keskusmuistin kuormituksesta ei saatu luotettavia lukuja. Tämä johtui siitä, että tietokoneella oli käynnissä muitakin ohjelmia. Ohjelmiston suorituskyvyn ja käytettävyyden erot olivat kuitenkin niin huomattavat, että tämä osoitti riittävästi alkuperäisten ja yksinkertaistettujen mallien väliset erot sekä nimenomaan yksinkertaistettujen mallien tarpeellisuuden.

## 4.2 Jatkotutkimus ja kehitys

Mallien yksinkertaistaminen Creo Parametric ohjelmalla on työläs ja aikaa vievä prosessi, kuten kappaleesta 3.3.1 käy ilmi. Lisäksi piirteiden täydellinen siirtyminen ohjelmien välillä ei onnistu. Tulevaisuudessa tavoitteena on löytää ohjelma, jolla mallien yksinkertaistaminen virtuaaliseen käyttöönottoon tapahtuisi tehokkaasti. On myös tutkittu mahdollisuutta prosessin automatisoimiseksi, mutta toistaiseksi tähän ei ole saatu ratkaisua.

Yrityksessä tehtiin ohjelmistotestauksia, joilla pyrittiin löytämään ratkaisu prosessin tehokkuuteen. Testattavana oli kaksi ohjelmaa, Creo Direct ja 3D Evolution. Molemmat ohjelmat osoittautuivat toimiviksi ja niiden avulla mallein yksinkertaistaminen oli tehokasta verrattuna Creo Parametriciin. Seuraavissa kappaleissa käsitellään pääpiirteisesti molemmat ohjelmat ja käsittelyprosessi.

### 4.2.1 Creo Direct

Creo Direct on PTC:n tarjoama CAD-ohjelma. Perinteisten CAD-työkalujen lisäksi Creo Direct sisältää ”Simplification” työkalun. Simplification-työkalulla voidaan tehdä helposti yksinkertaistettuja versioita alkuperäisistä ja yksityiskohtaisista malleista. (PTC 2021b.) Lisäksi Creo Direct tukee Creo Parametricin tiedostomuotoja .prt ja .asm, joten tiedostomuotoja ei tarvitse muuttaa ohjelmien välillä. Creo Direct on myös mahdollista liittää yrityksen PDM-järjestelmään.

#### **Mallin tuominen Creo Direct ohjelmaan**

Ohjelmaa testattaessa ohjelmaa ei liitetty PDM-järjestelmään, vaan sitä testattiin erillisenä ohjelmana. Tästä johtuen tiedostot tallennettiin kovalevylle ennen käsittelyä. Tallennusta tehdessä Creo Parametricissä tuli määrittää, että alkuperäisten tiedostojen lisäksi luodaan erilliset .xsm tai .xas tiedostot osille ja kokoonpanoille, joilla on useita instansseja. Näihin tiedostoihin tallentuu instanssitiedot. Ilman näitä lisätiedostoja Creo Direct ei pysty tunnistamaan mitä instanssia osista käytetään, joten se automaattisesti ja usein virheellisesti käytti geneerisiä malleja. Kun malli oli tallennettu lisätiedostojen kanssa, voitiin sitä käyttää Creo Directissä.

### **Mallin käsittely Creo Directillä**

Mallin yksinkertaistaminen tehtiin Creo Directiin saatavalla "Simplification" työkalulla. Prosessi on nopeampi kuin Creo Parametricissä, mutta vaatii toimiakseen käyttäjän tekemiä määrytyksiä. Määrytyksiä voidaan tehdä viidessä eri luokassa: rakenne (structure), yhdistäminen (merge), geometria (geometry), tasot (faces) ja muut (misc). Jos kaikkia määrytyksiä ei tehdä, ohjelma tekee oletuksia yksinkertaistusta tehdessään.

Rakenteellisissa määrytyksissä tehdään erilaisia osiin liittyviä määritelmiä. Poistettavat ja säilytettävät osat voidaan esimerkiksi määritellä manuaalisesti tai koon mukaan. Lisäksi mallin sisällä olevat osat saadaan poistettua automaattisesti. Yhdistämiseen liittyvissä määrytyksissä voidaan yhdistää osia tai kokoonpanoja yhtenäisiksi kokonaisuuksiksi. Lisäksi voidaan tehdä muita määrytyksiä osien ja kokoonpanojen yhdistämiselle. Geometrisissa määrytyksissä voidaan määrittää poistettavat geometriset piirteet, kuten pyöritykset, urat ja reiät. Poistettavat geometriset piirteet voidaan tyyppin lisäksi määrittää koon suhteen. Tasojen määrytyksissä voidaan yksinkertaisesti määrittää poistettavat ja säilytettävät pinnat. Muissa määrytyksissä on valittavana geometriaan, näkyvyyteen ja massaan liittyviä seikkoja.

Ohjelmaa testatessa oleellisimmiksi määrytyksistä nousivat rakenteeseen ja geometriaan liittyvät määrytykset. Näiden määrytysten avulla saatiin poistettua pienet osat, kuten ruuvit, mutterit ja aluslevyt. Lisäksi reiät ja pyöritykset saatiin poistettua ja ontot rakenteet muutettua umpinaisiksi. Monimutkaisissa laitteissa rakenteellisia määrytyksiä tuli tehdä enemmän, sillä antureita ja säilytettäviä toimilaitteita oli paljon. Säilytettävät anturit ja toimilaitteet tuli valita manuaalisesti, sillä niillä ei ollut yhdistävää tekijää, joilla ne olisi voinut erotella. Prosessi oli alustavan testauksen perusteella huomattavasti tehokkaampi kuin Creo Parametricillä.

### **Tiedostomuodot ja ohjelmistojen yhteensopivuus**

Creo Directillä voidaan avata siis Creo Parametricin tiedostoja, mutta ei kuitenkaan tallentaa niitä. Tämän vuoksi ne on tallennettava .STEP muotoon, joka voidaan avata Creo Parametricilla, josta ne voidaan .jt kääntäjän kautta muuttaa Siemens NX:lle sopivaksi. Niin Creo Parametriciin kuin Creo Directiin on olemassa erillisiä adaptoreja, jotka toimivat ohjelmien rajapintana ja parantavat edelleen yhteensopivuutta. Myös Siemens NX ohjelmaan on saatavana erillinen adapteri, joka mahdollistaa Creo Direct mallien avaamisen suoraan Siemens NX ohjelmalla.

#### 4.2.2 3D Evolution

3D Evolution on Coretechnologien tarjoama ohjelmisto. 3D Evolution ei ole perinteinen CAD-ohjelma, vaan se on tarkoitettu pääasiassa CAD-mallien yksinkertaistamiseen ja tiedostomaattien muokkaamiseen. Lisäksi ohjelmalla voidaan tehdä FEM-laskentaa, analyysejä ja mallien korjauksia. (Coretechnologie 2021.)

##### **Mallin tuominen 3D Evolution ohjelmaan**

3D Evolutionia ei ole mahdollista yhdistää yrityksen PDM järjestelmään. Näin ollen sitä testattiin omana ohjelmistonaan ja mallit oli tallennettu kovalevylle testiä varten. 3D Evolutionilla pystyy avaamaan myös Creo Parametric malleja. Tässä on huomioitava samat asiat kuin Creo Directin kohdalla, eli osista ja kokoonpanoista tulee olla myös instanssitiedostot tallennettuina. Avatessa Creo Parametric tiedostomuotoja kohdattiin kuitenkin haasteita, sillä malleihin saattoi ilmaantua geometrisiä virheitä. Koska mallit haluttiin mahdollisimman hyvin siirrettyä ohjelmasta toiseen, käytettiin testissä .STEP malleja, jotka oli tallennettu Creo Parametricin kautta kovalevylle. Näiden mallien kohdalla ei huomattu virheitä siirtyessä ohjelmasta toiseen.

##### **Mallin käsittely 3D Evolutionilla**

Mallien yksinkertaistamiseen löytyy 3D Evolutionista useita eri työkaluja. Käsittelyprosessiin käytettiin pääosin ohjelman "shrinkwrap", valinta, poisto ja yksinkertaistus toimintoja. Se, miten ja missä järjestyksessä toimintoja käytettiin, riippui käsiteltävästä mallista.

Yksinkertaisten mallien kohdalla, joissa ei ollut esimerkiksi anturointia, prosessi eteni seuraavalla tavalla: Ensin tunnistettiin "shrinkwrap" työkalulla ulkoiset pinnat/rakenteet. Tämän avulla saatiin erotelluksi mallien sisäpuoliset osat, jotka voitiin tämän jälkeen poistamaan kaikki kerrallaan. Seuraavassa vaiheessa tunnistettiin osat tilavuuden perusteella. Tilavuuden perusteella voitiin erotella kaikki loput pienet poistettavat osat. Pienten osien poiston jälkeen tunnistettiin uudestaan ulkoiset pinnat ja rakenteet. Tämän jälkeen mallista oli yleensä saatu poistettua kaikki pienet ja toiminnan kannalta turhat osat.

Lopuksi valittiin ohjelman automaattinen mallin yksinkertaistus työkalu, joka poisti turhat piirteet mallista.

Edellä mainituin askelin saatiin malleista poistettua siis toiminnan kannalta turhat osat ja yksinkertaistettua mallien piirteet kuten reiät, kuorirakenteet ja viisteet. Osaa piirteistä, kuten pyöristöksiä ei automaattisesti aina saatu poistettua. Malli kuitenkin keveni huomattavasti. Lisäksi prosessi oli hyvin yksinkertainen.

Monimutkaisemmissa malleissa jouduttiin tekemään enemmän manuaalista työtä esimerkiksi osien poiston osalta, jotta säilytettävät toimilaitteet esimerkiksi anturit säilyivät. Myös automaattista yksinkertaistusta tehdessä osa laitteista suodatettiin ulkopuolelle, jotta niiden toiminnallisuus ei kärsisi. Kuten Creo Directillä, myös 3D Evolutionilla yksinkertaistusprosessi on huomattavasti tehokkaampaa kuin Creo Parametricillä.

Ohjelmaan on myös mahdollista luoda automaattisia prosesseja, jolloin ainakin osa käsittelystä voitaisiin mahdollisesti automatisoida. Haasteena on kuitenkin mallien yksilölliset erot niin komponenttien kuin toiminnallisuuden suhteen.

### **Tiedostomuodot ja ohjelmistojen yhteensopivuus**

3D Evolution ohjelmiston yksi vahvuus on mallien tiedostomuodon muuttaminen toiseksi. Tämä mahdollistaa sen, että ohjelmalla voidaan yksinkertaistamisen jälkeen muuttaa malli suoraan haluttuun muotoon ilman erillisiä adaptereja. Ohjelma tukee .jt tallennusmuotoa, jolloin ne ovat suoraan yhteensopivia Siemens NX ohjelman kanssa. Kuitenkin, kuten kappaleessa 3.3.2 on mainittu, tulee malleihin tiedostomuodon vaihdon yhteydessä tehdä erillisiä määrittämiä. Määrittämisen mahdollisuutta 3D Evolutionilla tutkitaan vielä.

### **4.3 Mallien muut mahdolliset käyttökohteet**

Simuloinnin ja virtuaalisen käyttöönoton lisäksi yksinkertaistetuilla malleilla voi olla muita käyttökohteita. Monet eri tarkoituksiin käytetyt ohjelmat eivät vaadi täydellisiä malleja toimiakseen optimaalisesti. Lisäksi yksityiskohtaisia malleja ei usein haluta näyttää julkisesti kilpailun vuoksi.

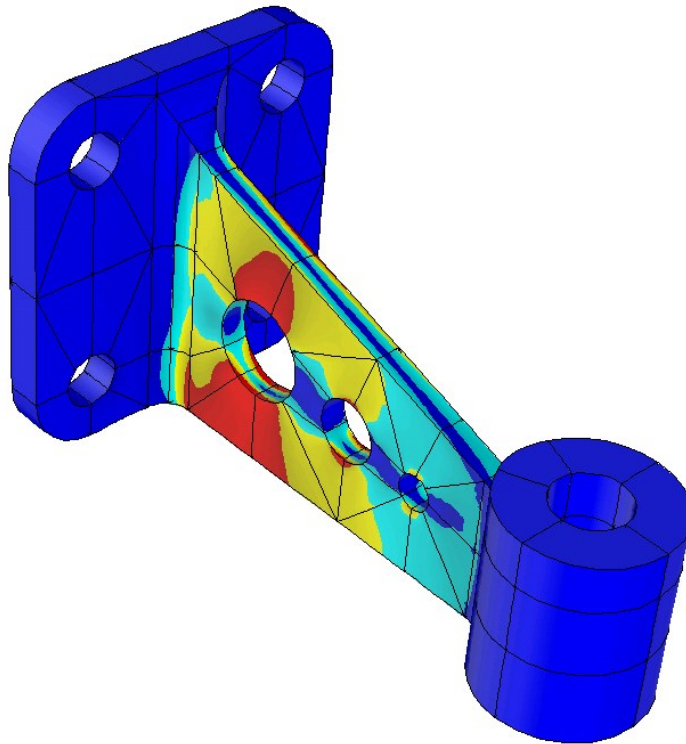
#### **4.3.1 Lujuuslaskenta (FEM)**

FEM (Finite Element Method) on numeraalinen ratkaisumenetelmä, jolla voidaan selvittää annettujen kuormitusten perusteella rakenteen siirtymä-, muodonmuutos- ja jännityskenttä, kun rakenteen tuenta tunnetaan. FEM laskennan avulla voidaan siis selvittää rakenteiden siirtymiä, muodonmuutoksia ja jännityksiä. (Lähteenmäki 2014.) Menetelmän tehokkuus perustuu sen joustavuuteen, sillä tarkasteltava malli voi olla

rakenteeltaan, tukiehdoiltaan ja kuormiltaan hyvin monimutkainen. Tällaisten monimutkaisten tapausten laskeminen tehdään tietokoneella. (Syrjä 2019.)

FEM laskentaan on olemassa useita eri ohjelmia, mutta nykyään lähes kaikki CAD-ohjelmat sisältävät oman työkalun FEM laskentaan. Dieffenbacher Panelboard OY käyttää FEM laskentaan Creo Parametricin omaa laskentatyökalua.

FEM laskentaa tehdessä ei vaadita täydellistä yksityiskohtaista mallia. Esimerkiksi ruuviliitoksia ei tarvita mallissa, sillä oikein tehtynä ruuviliitoksen osat voidaan luokitella yhdeksi yhtenäiseksi rakenteeksi. Myös monet muut yksityiskohdat voidaan jättää huomiotta. Tämä tarkoittaa, että yksinkertaistettuja malleja voidaan mahdollisesti hyödyntää jatkossa FEM laskennan tekemiseen. Kuvassa 9 on esitetty esimerkki FEM-ohjelmalla tehdystä jännityslaskemasta ilman numeraalisia arvoja.



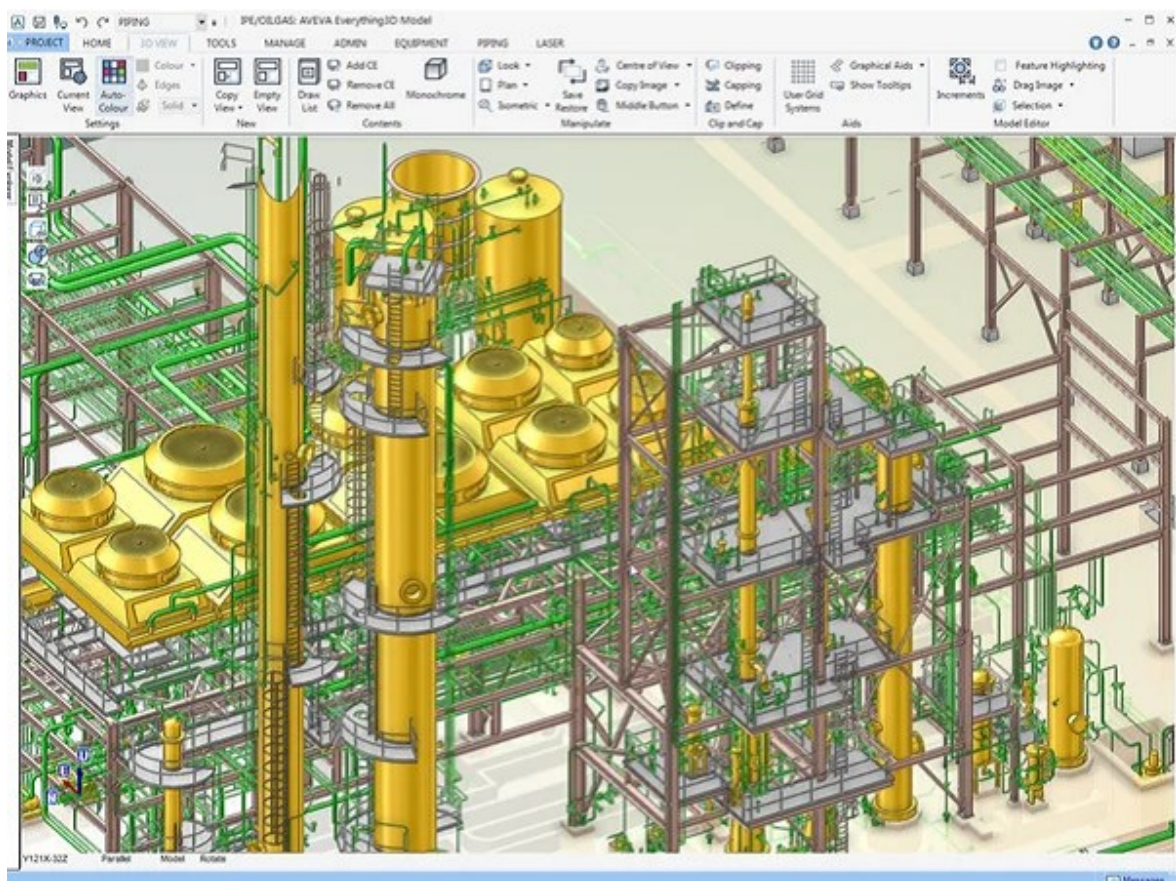
Kuva 9. Esimerkki FEM laskelman tuloksesta (University of Maryland n.d).

#### 4.3.2 Tehdassuunnittelu Aveva E3D ohjelmistolla

Dieffenbacher Panelboard OY käyttää laitosuunnitteluun AutoCAD-ohjelman lisäksi Aveva E3D-ohjelmaa. Aveva E3D on suunnitteluohjelma, jonka avulla voidaan tehdä

laitossuunnittelua eri teollisuuden alojen tarpeisiin (Aveva 2021a). Laitossuunnittelussa ei ole tarvetta käyttää laitesuunnittelun yksityiskohtaisia malleja. Laitossuunnittelussa on tärkeää saada yleiskuva laitoksen toiminnasta, laitteista ja sen mitoista. Laitoksesta riippuen jotkin asiat halutaan esittää yksityiskohtaisemmin, mutta laitteiden yksityiskohtainen esitystapa ei ole oleellista. Riittää kun laitteista ilmenee niiden merkitys laitoksen toiminnan kannalta ja niiden koko.

Ohjelmasta löytyy oma työkalu mallien yksinkertaistamiseen (Aveva 2021a). Tämän työkalun käyttöä on tutkittu yrityksessä, mutta se ei sellaisenaan sovellu käytettyjen mallien yksinkertaistamiseen. Creo Parametric mallien käyttö Aveva E3D ohjelmassa on nyt harkinnassa. Tämä säästäisi paljon aikaa, jos malleja ei tarvitsisi yksinkertaistaa erikseen käyttöönottoa ja laitosuunnittelua varten, vaan voitaisiin käyttää samoja malleja. Kuvassa 10 nähdään Avevan E3D-ohjelmalla tehty laitosuunnittelukokonaisuus.



Kuva 10. Aveva E3D-ohjelmalla tehtyä laitosuunnittelua (Aveva 2021b).

### 4.3.3 Adobe 3D Max

Laitosten toimintaa voidaan esittää myös erilaisin animaatioin. Animaatiot ovat hyvä ja selkeä tapa esittää laitoksen toimintaa visuaalisesti. Tällaisia laitosanimaatioita tehdessä ei ole tarpeen käyttää yksityiskohtaisia malleja, sillä animaatiolla on tarkoitus esittää ainoastaan laitoksen toimintaa suurpiirteisesti. Animaatiosta tulee selvitä laitoksen toiminta ja esimerkiksi valmistettavan kappaleen eteneminen ja valmistuminen tuotantolinjastoilla sekä eri laitteiden merkitys tuotantolinjan osana. Eri toimilaitteiden realistisesta toiminnasta tai ohjausjärjestelmistä ei tarvitse siten välittää. Dieffenbacher Panelboard OY käyttää animaatioiden tekemiseen Adoben 3D Max ohjelmaa.

Yksinkertaistetut mallit olisivat siis soveltuvia myös laitosanimaatioiden tekemiseen, sillä niistä selviää tarpeeksi tarkasti laitteen toiminta tuotantolinjan osana mutta epäolennaiset yksityiskohdat on jätetty pois. Tämä nopeuttaisi animaatioiden tekemistä ja keventäisi myös ohjelman toimintaa. Yksityiskohtien puuttuminen olisi etu myös sen kannalta, ettei animaatiosta selviä kilpaileville yrityksille laitteen tarkka suunnittelu.

## 5. Yhteenveto ja pohdinta

Opinnäytetyön tavoitteena oli yksinkertaistaa konesuunnittelun 3D-mallit virtuaalista käyttöönottoa varten. Mallien yksinkertaistaminen tehtiin Creo Parametric ohjelmalla, joka on yrityksen käytössä oleva CAD-ohjelma. Työn teoreettisen osuuden tavoitteena oli antaa lukijalle selkeä kuva siitä, mitä ilmiöitä virtuaaliseen käyttöönottoon liittyy. Kirjallisen työn muussa osuudessa tavoitteena oli antaa lukijalle selkeä kuva levynkäsittelylinjan toiminnasta, mallien käsittelyprosessista ja kuinka virtuaalinen käyttöönotto rakentuu. Lisäksi haluttiin avata muita yksinkertaistetuista malleista saatavia hyötyjä.

Opinnäytetyön lopputuloksena saatiin toimivat mallit levynkäsittelylinjan virtuaaliseen käyttöönottoon. Yksinkertaistettujen mallien avulla linjaston simulaatiomallia pystyttiin rakentamaan ilman suorituskykyongelmia, joita ilmeni alkuperäisiä malleja käytettäessä. Tulokset todennettiin myös erillisellä testauksella, jossa jäähdytyskäntäjän yksinkertaistetun ja alkuperäisen mallin toimintaa testattiin Siemens NX ohjelmalla tehdyssä simulaatiossa.

Teoreettisen osuuden rakentaminen oli haastavaa, sillä virtuaaliseen käyttöönottoon liittyvät ilmiöt ovat hyvin laaja-alaisia, jonka vuoksi ne on pyrittävä pitämään varsin tiiviinä. Teoreettinen osuus kuitenkin saatiin tehtyä tarpeeksi kattavaksi, mutta sopivan tiiviiksi työn laajuuteen nähden.

Opinnäytetyön edetessä mallien käsittelyprosessi tuli hyvin tutuksi. Samalla tuli ilmi, että prosessia tulee kehittää tehokkaammaksi. Virtuaalisen käyttöönoton edetessä ilmeni myös kehitettävää mallien piirteiden siirtymisessä ohjelmasta toiseen.

Prosessin tehostamiseksi sekä piirteiden täydellisen siirtymisen ratkaisemiseksi otettiin opinnäytetyöprosessin aikana testiin Creo Direct ja 3D Evolution ohjelmistot. Niillä tehty testaus osoitti, että mallien yksinkertaistamisen voi tehdä tehokkaammin kuin alun perin tehtiin. Ohjelmien testaus jatkuu edelleen, joten lopullinen ohjelmavalinta on tätä kirjoitettaessa vielä kesken. Opinnäytetyön laajuuden vuoksi testattavia ohjelmia käsiteltiin vain suurpiirteisesti.

Yksinkertaistettuja malleja voidaan tulevaisuudessa hyödyntää virtuaalisen käyttöönoton lisäksi muissakin yrityksen sovelluksissa. Ensisijaisia muita käyttökohteita voisivat olla esimerkiksi lujuuslaskenta (FEM), tehdassuunnittelu sekä tehdasanimaatioiden tekeminen.

Opinnäytetyöprosessin aikana koin oppivani paljon uutta ja hyödyllistä asiaa. Laitteiden malleja käsitellessä niiden rakenne ja toiminta selkiytyi. Lisäksi sain hyvän käsityksen eri toimilaitteiden merkityksestä ja koko linjaston ja prosessien toiminnasta. Sain myös lisää

kokemusta Creo Parametric ohjelman käytöstä ja pääsin myös testauksia tehdessä opettelemaan kahden täysin uuden ohjelman käyttöä.

Vaikka työ koostuikin mallien käsittelystä ja ohjelmien testaamisesta, sain myös paljon tietoa simulaatioon, digitaaliseen kaksoseen ja virtuaaliseen käyttöönottoon liittyvistä asioista. Tästä tiedosta osa tuli teoreettista osuutta tehdessä, mutta myös seuraamalla virtuaalista käyttöönottoa. Varsinkin virtuaalisen käyttöönoton tekemisen seuranta oli erittäin hyödyllistä oppimisen kannalta, sillä eri ohjelmien yhteistoiminta ja simulaatorakenteet olivat täysin uutta asiaa.

Oppimiseen vaikutti myös paljon useat palaverit, jota käytiin työn edetessä niin työn ohjaajien kuin yrityksen päätoimipisteen työntekijöiden kanssa. Työn tekeminen tuntui merkitykselliseltä, koska sille oli todellinen tarve. Työn laajuus oli varsin suuri, koska siihen haluttiin sisällyttää mallien käsittelyn lisäksi virtuaalinen käyttöönotto ja siihen liittyvät ilmiöt. Laajuuden vuoksi osa asioita oli käsiteltävä pintapuolisesti, jotta työstä ei tulisi liian laaja. Kokonaisuutena koen työn onnistuneen hyvin ja pääsin haluttuun lopputulokseen.

## Lähteet

- Ala-Mäyry, E. (2021). Asiakastarpeet digitalisoituvassa suunnittelupalveluliiketoiminnassa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere. [Viitattu 31.8.2021] Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/105882/browse?type=author&value=Ala-M%C3%A4yry%2C+Elina>
- Aveva. (2021a). Aveva E3D Design. [Viitattu 10.10.2021] Saatavissa: <https://www.aveva.com/en/products/e3d-design/>
- Aveva. (2021b). Aveva E3D Design Cloud Training. [Viitattu 10.10.2021] Saatavissa: <https://www.aveva.com/en/training/cloud-training-center/>
- Barbieri, G., Bertuzzi, A., Capriotti, A., Ragazzini, L., Gutierrez, D., Negri, E., & Fumagalli, L. (2021). A virtual commissioning-based methodology to integrate digital twins into manufacturing systems. *Production Engineering*, 15(3), 397-412. [Viitattu 27.8.2021] Saatavissa: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11740-021-01037-3>
- Bako, B. & Božek, P. (2016). Trends in simulation and planning of manufacturing companies. *Procedia Engineering*, 149, 571-575. [Viitattu 24.8.2021] Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816312243>
- Boschert, S. & Rosen, R. (2016). Digital twin—the simulation aspect. In *Mechatronic futures* (pp. 59-74). Springer, Cham. [Viitattu 1.9.2021] Saatavissa: <http://alvarestech.com/temp/smar/Smar/Book2021/Mechatronic%20Futures%20Challenge%20and%20Solutions.pdf#page=79>
- Bryden, D. (2014). *CAD and rapid prototyping for product design*. Hachette UK.
- Collin, J. & Saarelainen, A. (2016) *Teollinen internet*. Talentum. Helsinki.
- Coretechnologie. (2021). 3D Evolution. [Viitattu 29.10.2021] Saatavissa: <https://www.coretechnologie.com/products/3d-evolution.html>
- DevisionX. (2019). *Industry 4.0: Technologies Integrations, Security, People/Workers and Society*. [Viitattu 29.9.2021] Saatavissa: <https://devisionx.com/fourth-industrial-revolution/>
- Dieffenbacher. (2019) *Yrityksen esittelymateriaali*. [Viitattu 23.8.2021] Saatavissa yrityksen sisäisin tunnuksin.
- Eloranta, H. (2015). *Virtuaalinen käyttöönottoympäristö automaatiojärjestelmälle*. Diplomityö. LUT-yliopisto. [Viitattu 3.9.2021] Saatavissa: <https://lutpub.lut.fi/handle/10024/117376>

- Grieves, M. (2015). Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. White paper, 1, 1–7. [Viitattu 27.8.2021] Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/275211047\\_Digital\\_Twin\\_Manufacturing\\_Excellence\\_through\\_Virtual\\_Factory\\_Replication](https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication)
- 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. [Viitattu 27.8.2021] Saatavissa: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-38756-7\\_4](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-38756-7_4)
- Haansola, J. (2009). Evaluation of 3D factory simulation software. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere.
- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016). Design principles for industrie 4.0 scenarios. In *2016 49th Hawaii international conference on system sciences (HICSS)* (pp. 3928-3937). IEEE. [Viitattu 26.8.2012] Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7427673>
- Hoffmann, P., Schumann, R., Maksoud, T. M., & Premier, G. C. (2010, June). Virtual commissioning of manufacturing systems a review and new approaches for simplification. In *ECMS* (pp. 175-181). [Viitattu 3.9.2021] Saatavissa: [https://www.researchgate.net/profile/Andrzej-Bargiela/publication/235991499\\_Proceedings\\_of\\_the\\_24th\\_European\\_Conference\\_on\\_Modelling\\_and\\_Simulation/links/0deec516006eaa13e0000000/Proceedings-of-the-24th-European-Conference-on-Modelling-and-Simulation.pdf#page=194](https://www.researchgate.net/profile/Andrzej-Bargiela/publication/235991499_Proceedings_of_the_24th_European_Conference_on_Modelling_and_Simulation/links/0deec516006eaa13e0000000/Proceedings-of-the-24th-European-Conference-on-Modelling-and-Simulation.pdf#page=194)
- Holzer, R., Wüchner, P., & De Meer, H. (2010). Modeling of self-organizing systems: An overview. *Electronic Communications of the EASST*, 27. [Viitattu 25.8.2021] Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/220053939\\_Modeling\\_of\\_Self-Organizing\\_Systems\\_An\\_Overview](https://www.researchgate.net/publication/220053939_Modeling_of_Self-Organizing_Systems_An_Overview)
- Hribernik, K. A., Von Stietencron, M., Hans, C., & Thoben, K. D. (2011). Intelligent products to support closed-loop reverse logistics. In *Globalized solutions for sustainability in manufacturing* (pp. 486-491). Springer, Berlin, Heidelberg. [Viitattu 30.8.2021] Saatavissa: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-19692-8\\_84](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-19692-8_84)
- Jackson, C. (2020) THE BLURRING LINE BETWEEN VIRTUAL COMMISSIONING AND DIGITAL TWINS. *Virtual Commissioning*. [Viitattu 10.9.2021] Saatavissa: <https://virtualcommissioning.com/the-blurring-line-between-virtual-commissioning-and-digital-twins/>

Jeschke, S., Brecher, C., Meisen, T., Özdemir, D., & Eschert, T. (2017). Industrial internet of things and cyber manufacturing systems. In Industrial internet of things (pp. 3-19). Springer, Cham. [Viitattu 25.8.2021] Saatavissa:

[https://www.cs.bgu.ac.il/~iiot201/wiki.files/Jeschke2017\\_Chapter\\_IndustrialInternetOfThingsAndC.pdf](https://www.cs.bgu.ac.il/~iiot201/wiki.files/Jeschke2017_Chapter_IndustrialInternetOfThingsAndC.pdf)

Kalliola, V. N. (2019). Benefits of simulation for Finnish manufacturing companies. Diplomityö. LUT-yliopisto. [Viitattu 24.8.2021] Saatavissa:

[https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/159687/Diplomity%C3%B6\\_Kalliola\\_Ville.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/159687/Diplomity%C3%B6_Kalliola_Ville.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Lappalainen, J. T. (2004). Paperin-ja kartonginvalmistusprosessien mallinnus ja dynaaminen reaaliaikainen simulointi. VTT. Lisensiaattityö.

Latvakoski, J. (2016). Small world for dynamic wireless cyber-physical systems. Väitöskirja. Oulun yliopisto. [Viitattu 26.8.2021] Saatavissa:

<https://cris.vtt.fi/en/publications/small-world-for-dynamic-wireless-cyber-physical-systems-dissertat>

Law, A. M. (2015). Simulation modeling and analysis. New York: McGraw-Hill. [Viitattu 24.8.2021] Saatavissa: <https://1lib.sk/book/3416276/88d81f>

Law, A. M., Kelton, W. D. (1991) Simulation modeling & analysis. Toinen painos. McGraw-Hill, Inc.

Lechler, T., Fischer, E., Metzner, M., Mayr, A., & Franke, J. (2019). Virtual Commissioning—Scientific review and exploratory use cases in advanced production systems. Procedia CIRP, 81, 1125-1130. [Viitattu 3.9.2021] Saatavissa:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827119305839>

Lee, C. G., & Park, S. C. (2014). Survey on the virtual commissioning of manufacturing systems. Journal of Computational Design and Engineering, 1(3), 213-222. [Viitattu 6.9.2021] Saatavissa: <https://academic.oup.com/jcde/article/1/3/213/5743371?login=true>

Locher, J. (2020). Entwicklung eines Proof of Concepts für die Virtuelle Inbetriebnahme von Pressensystemen. Diplomityö. Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Karlsruhe. Saatavissa yrityksen sisäisin tunnuksin.

Lähteenmäki, M. (2014). Elementtimenelmän perusteet. [Viitattu 1.10.2021] Saatavissa: [https://mlahteen.fi/arkistot/elpe\\_pdf/johdanto.pdf](https://mlahteen.fi/arkistot/elpe_pdf/johdanto.pdf)

Madni, A. M., Madni, C. C., & Lucero, S. D. (2019). Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering. *Systems*, 7(1), 7. [Viitattu 30.8.2021] Saatavissa: <https://www.mdpi.com/2079-8954/7/1/7>

Malakuti, S., Schlake, J., Grüner, S., Schulz, D., Gitzel, R., Schmitt, J., Platenius-Mohr, M., Vorst, P. & Garrels, K. (2018) Digital twin—a key software component of Industry 4.0. [Viitattu: 27.8.2021] Saatavissa: [\(PDF\) Digital twin – A key software component of industry 4.0 \(researchgate.net\)](#)

Nedashkovskiy, A., Azheganova, E., Gupta, R., & Teyssier, A. (2020). PROJECT RESEARCH REPORT: Application of digital twin in industry 4.0. LUT-yliopisto. [Viitattu 25.8.2021] Saatavissa: [https://www.researchgate.net/profile/Ekaterina-Azheganova/publication/348579377\\_Application\\_of\\_digital\\_twin\\_in\\_industry\\_40/links/6005f9c4a6fdccdc8641feb/Application-of-digital-twin-in-industry-40.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Ekaterina-Azheganova/publication/348579377_Application_of_digital_twin_in_industry_40/links/6005f9c4a6fdccdc8641feb/Application-of-digital-twin-in-industry-40.pdf)

Nokka, J. (2013). Kaivoslastauskoneen hybridisointianalyysi virtuaali- ja in-loop-simuloinnin avulla. Diplomityö. LUT-yliopisto. [Viitattu 6.9.2021] Saatavissa: <https://lutpub.lut.fi/handle/10024/90364>

Petrillo, A., De Felice, F., Cioffi, R., & Zomparelli, F. (2018). Fourth industrial revolution: Current practices, challenges, and opportunities. *Digital transformation in smart manufacturing*, 1-20. [Viitattu 17.9.2021] Saatavissa: <https://www.intechopen.com/chapters/58010>

Polenghi, A., Fumagalli, L., & Roda, I. (2018). Role of simulation in industrial engineering: focus on manufacturing systems. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 496–501. [Viitattu 24.8.2021] Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896318314927>

PTC. (2021a). 3D Design. [Viitattu 17.9.2021] Saatavissa: <https://www.ptc.com/en/technologies/cad/3d-design>

PTC. (2021b). Creo Elements/Direct. [Viitattu 29.10.2021] Saatavissa: <https://www.ptc.com/en/products/creo/elements-direct>

Siemens. (2021a). Virtuaalinen käyttöönotto – Kilpailuetua simuloinnilla. [Viitattu 6.10.2021] Saatavissa: <https://new.siemens.com/fi/fi/tuotteet/teollisuus/virtuaalinen-kayttoonotto.html>

Siemens. (2021b). Software in TIA Portal. [Viitattu 6.10.2021] Saatavissa: <https://new.siemens.com/global/en/products/automation/industry-software/automation-software/tia-portal/software.html>

Siemens. (2021c). Virtual commissioning and operator training with SIMIT. [Viitattu 6.10.2021] Saatavissa: <https://new.siemens.com/global/en/products/automation/industry-software/simit.html>

Syrjä, R. (2019). Elementtimenetelmään perustuvan ohjelman käytön perusteet. [Viitattu 1.10.2021] Saatavissa: [https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/952739/course/section/143156/L\\_FEM\\_FI\\_20190905.pdf](https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/952739/course/section/143156/L_FEM_FI_20190905.pdf)

Tao, F., Qi, Q., Wang, L., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital twins and cyber–physical systems toward smart manufacturing and industry 4.0: Correlation and comparison. *Engineering*, 5(4), 653-661. [Viitattu 26.8.2021] Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S209580991830612X>

University of Maryland. (n.d). What are Finite Elements? [Viitattu 1.10,2021] Saatavissa: <https://manilsuri.umbc.edu/what-are-finite-elements/>

Wünsch, G. (2008). Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme. Utz. [Viitattu 3.9.2021] Saatavissa: <https://www.utzverlag.de/assets/pdf/40795les.pdf>