

Pyry Salmi

KONFIGUROITUVAN TUOTTEEN PARAMETRINEN 3D-MALLINNUS

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Kandidaatintyö
Toukokuu 2021

TIIVISTELMÄ

Pyry Salmi: Konfiguroituvan tuotteen parametrinen 3D-mallinnus: Parametric 3D modeling of a configurable product
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Toukokuu 2021

Massakustomointi on yrityksille tapa yhdistää massatuotannon skaalaetu ja asiakasvaatimusten mukainen tuotteiden kustomointi. Massakustomoinnissa on tärkeää tunnistaa asiakkaiden kannalta oleelliset kohteet, joissa muuntelumahdollisuutta vaaditaan. Muilta osin tuotteessa pyritään hyödyntämään massatuotannon piirteitä.

Tuotteiden massakustomointia voidaan toteuttaa esimerkiksi konfiguroituvien tuotteiden avulla. Konfiguroituvien tuotteiden tuoterakenne voidaan jakaa osiin, jotka on suunniteltu uudelleenkäytettäväksi, ennalta määritellyin ehdoin muunneltaviksi tai yksilöllisiksi, tiettyyn toimitukseen suunniteltaviksi kokonaisuuksiksi. Työn alussa käsitellään tuoterakenteen teoriaa yleisesti ja konfiguroituihin tuotteisiin liittyvää teoriaa.

Teollisuusyrityksissä tehtävässä suunnittelytyössä käytetään laajasti parametrista 3D CAD-mallinnusta (Computer-aided design). Parametrisen mallinnuksen avulla suunnittelija voi luoda helposti muokattavia komponentteja ja näistä komponenteista edelleen rakennettuja komponenttikokoonpanoja. Parametrisessa mallinnuksessa kappale luodaan yksilöityjen ja muunneltavien dimensioiden avulla. Dimensioiden välille voidaan luoda myös riippuvuuksia: esimerkiksi viivan pituutta muutettaessa, muuttuu myös jonkin toisen viivan pituus. Kappaleeseen voidaan luoda myös geometrisiä riippuvuuksia, kuten kohtisuoruusvaatimuksia. Parametriseen mallinnukseen liittyvää tutkimusta käsitellään kokoonpano- ja komponenttitasolla.

Tässä työssä tutkitaan, kuinka parametrinen malli soveltuu konfiguroituvien tuotteiden mallinnukseen tuoterakenteen muunneltavuuden ja uudelleenkäytön näkökulmasta. Lisäksi mallinnusteknisestä näkökulmasta tutkitaan, miten kappaleen tai kokoonpanon luomisessa voidaan pyrkiä tehokkaaseen geometrian muunneltavuuteen tai 3D-mallin uudelleenkäytettävyyteen. Työssä käsitellään myös parametrisen mallin käyttöä tuotekehityksen apuvälineenä ja suunnittelutyön automatisointia parametriseen malliin liitetyn erillisen suunnittelujärjestelmän avulla.

Työn tuloksena todetaan, että parametrinen malli soveltuu hyvin konfiguroituvien tuotteiden mallinnukseen. Mallinnustekniikan näkökulmasta työssä esitellään suositeltavia mallinnusmenetelmiä komponentti- ja kokoonpanotasolla. Esiteltyjen menetelmien käyttö mallinnusstrategioina edesauttaa mallien muunneltavuutta, uudelleenkäyttöä ja mallinnettujen komponenttien tai kokoonpanojen käyttöä konfiguroituvien tuotteiden mallinnuksessa. Parametrinen malli todetaan tehokkaaksi apuvälineeksi tuotekehityksen ja suunnittelun automatisoinnin yhteydessä erityisesti silloin, kun malli liitetään erilliseen suunnittelujärjestelmään. Tässä työssä tällaisena suunnittelujärjestelmänä käsitellään KBE-järjestelmiä (Knowledge-based engineering system).

Avainsanat: konfiguroituva tuote, parametrinen 3D-mallinnus, top-down mallinnus, skeleton-mallinnus, KBE-järjestelmä

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. TUOTERAKENTEEN TEORIAA.....	3
2.1 Tuotemallit	3
2.2 Tuotearkkitehtuuri	4
2.3 Tuotealusta	6
2.4 Standardointi.....	7
3. TUOTEKONFIGUROINNIN TEORIAA	9
3.1 Konfigurointi ja konfiguraatio	10
3.2 Konfiguroituva tuote	11
3.3 Modulaarinen systeemi konfiguroituvan tuotteen suunnittelun lähtökohtana	13
4. PARAMETRINEN SOLIDIMALLI.....	17
4.1 Komponenttien mallinnus	18
4.2 Kokoonpanojen mallinnus	21
4.3 Suunnittelun automatisointi	23
4.4 Parametrinen malli ja tuotekehitys.....	24
5. PARAMETRISEN MALLIN LUONTI	29
5.1 Säiliön parametrinen malli	30
5.2 Säiliön suunnittelun automatisointi	34
6. PÄÄTELMÄT.....	37
LÄHTEET.....	39

1. JOHDANTO

Massakustomoinnin avulla yritykset pyrkivät yhdistämään massatuotannon skaalaedun ja asiakasvaatimusten mukaisesti kustomoidut tuotteet. Massakustomoinnin tehokas toteuttaminen edellyttää yritykseltä hyvää ymmärrystä asiakasvaatimuksista. Tällöin tuotteeseen osataan luoda asiakkaiden kannalta oikeanlaista variaatiota ja muilta osin tuotteen rakenteessa yritys voi saavuttaa massatuotannon hyötyjä. Massakustomoinnin avulla yritys voi erottua kilpailijoista esimerkiksi yhdistämällä perustuotteeseen erilaisia arvoa lisääviä ominaisuuksia tai tarjoamalla eri tavoin varioituja tuotteita eri markkinasegmenteille. (Riitahuhta & Pulkkinen 2001, s. 1–2; Fogliatto & Silveira 2011, s. 35–36)

Yksi massakustomointia edesauttava tekijä ovat konfiguroituvat tuotteet, joihin liittyvää teoriaa esitetään tässä työssä Juutin ja Lehtosen (2006) ja Juutin (2008) mukaan. Konfiguroituvissa tuotteissa tuoterakenne voidaan jakaa osiin, joissa toteutuvat yhtäältä muunneltavuus ja toisaalta uudelleenkäytettävät vakioratkaisut (Juuti 2008 s. 46–47). Tehokas muunneltavuus ja määrittely siitä, mihin osiin tuotteessa muuntelun mahdollisuutta sisällytetään, on tärkeää asiakasvaatimusten edullisessa toteuttamisessa, kun taas uudelleenkäyttö tuotteen sisällä ja tuoteperheissä mahdollistaa muun muassa kustannussäästöjä suunnittelussa, virheettömämpiä toimituksia ja lyhyempiä toimitusaikoja.

Teollisuusyritykset käyttävät nykypäivänä suunnittelutyössä laajasti parametrissa CAD-mallinnusta (Computer-aided design). Parametriset mallit ovat tehokkaita suunnittelutyössä niiden joustavan muokattavuuden vuoksi. Lisäksi parametrisiin malleihin voidaan sisällyttää tuotetietoa ja niitä voidaan hyödyntää tuotekehityksessä. (Camba et al. 2016 s.18; Demoly & Roth 2017, s. 104). Mallien yhteyteen voidaan myös luoda suunnittelun automatisointia edesauttavia tietokonesovelluksia (La Rocca 2012; Schäffer et al. 2021).

Tässä työssä pyritään selvittämään mitä parametrisen CAD-mallin muunneltavuus ja uudelleenkäytettävyys vaativat mallinnusteknisesti komponenttimallinnuksen ja kokoonpanomallinnuksen osalta ja miten parametrissa CAD-mallia voidaan hyödyntää konfiguroituvien tuotteiden mallinnuksessa. Lisäksi tutkitaan, miten parametrisen mallin käyttöä voidaan automatisoida ja mitä hyötyjä se tuo. Työ jakaantuu tuoterakenteen ja

konfiguroituvien tuotteiden teorian tarkasteluun, parametrinen mallinnuksen teorian tarkasteluun sekä osaan, jossa luodaan parametrinen CAD-malli.

Termit *muunneltavuus* ja *uudelleenkäyttö* esiintyvät tässä työssä kahdessa eri merkityksessä. Konfiguroituvien tuotteiden teorian kohdalla termejä käytetään kuvaamaan tuotteen variointia sen tuoterakenteen muuntelulla ennaltamääritellyin tavoin ja esimerkiksi komponenttien tai suunnittelutiedon uudelleenkäyttöä. CAD-mallinnuksen teorian yhteydessä termejä käytetään kuvaamaan yksittäisen mallin geometrian muuntelua tai mallin uudelleenkäytettävyyttä ja muuntelun joustavuutta esimerkiksi toisessa suunnittelutehtävässä. CAD-mallien kohdalla muuntelua ja uudelleenkäyttöä tarkastellaan myös konfiguroituvien tuotteiden näkökulmasta ja pohditaan, mikä mahdollistaa mallien uudelleenkäytön eri kokoonpanoissa ja miten mallia voidaan suunnitellusti muunnella esimerkiksi tiettyyn konfiguroituvaan tuotteeseen liittyvien sääntöjen mukaan.

Luvussa kaksi käydään läpi tuoterakenteen teoriaa. Luvun alussa esitetään, että tuotteen ja sen rakenteen tarkastelulle on useita lähtökohtia tarkastelijan näkökulmasta riippuen. Tässä työssä näkökulma liittyy pääosin tuotteiden mekaaniseen suunnitteluun yleisluontoisesti. Luvussa käsitellään pääosin tuotearkkitehtuuria ja siihen liittyvää teoriaa.

Kolmas luku keskittyy konfiguroituvien tuotteisiin. Luvun alussa konfiguroituvien tuotteiden todetaan liittyvän massakustomoinnin paradigmaan Victorin ja Boyntonin (1998) mukaan. Konfiguroituvien tuotteiden tarkempi käsittely perustuu Juutin ja Lehtosen (2006) ja Juutin (2008) tutkimuksiin. Luvussa esitellään myös modulaarisen systeemin teoriaa Juutin (2008) ja Pakkasen et al. (2013) mukaan, sillä sen katsotaan antavan hyvän perustan asioille, joita konfiguroituvien tuotteiden suunnitteluun liittyy.

Neljännessä luvussa esitellään lyhyesti parametrinen CAD-mallinnuksen teoriaa ja komponenttien sekä kokoonpanojen mallinnukseen liittyviä strategioita. Luvussa tarkastellaan suunnittelun automatisointia mahdollistavia tietokoneohjelmia ja parametrinen CAD-mallin käyttöä tuotekhityksessä.

Viidennessä luvussa luodaan parametrinen CAD-malli Dassault Systemes:in SolidWorks suunnitteluohjelmistolla ja yhdistetään se Excel-pohjaiseen suunnittelujärjestelmään. Suunnittelujärjestelmän luomisessa käytetään CadWorks Oy:n AutomateWorks ohjelmistoa. Luku kuusi sisältää työn myötä tehtyjen päätelmien läpikäyntiä.

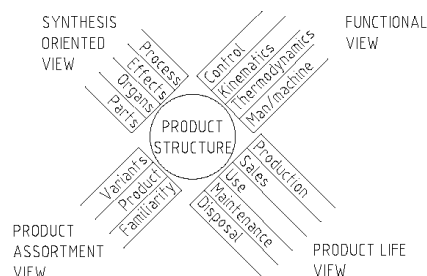
2. TUOTERAKENTEEN TEORIAA

Teollisuusyritykset valmistavat tai jalostavat tuotteita markkinoille. Tuotteet voivat olla lähestulkoon mitä vain tietokoneohjelmistoista konkreettisiin tuotteisiin, kuten ajoneuvoihin tai kokonaisiin voimalaitostoimituksiin. Martio (2015, s. 14) kuvaa tuotetta teollisen toiminnan tuloksena. Ulrichin ja Eppingerin (2012, s. 2) mukaan tuote on jotain, mitä yritys myy asiakkailleen.

2.1 Tuotemallit

Tässä työssä käsitellään tuotteita, joilla on jonkinlaisia suunniteltuja mekaanisia ominaisuuksia tai toimintoja. Tällaisten tuotteiden rakennetta voidaan tarkastella monella tapaa. Ulrichin ja Eppingerin (2012, s. 184) mukaan tuotteella on fyysinen ja toiminnallinen puoli. Tuote jakautuu toiminnallisiin kokonaisuuksiin sen mukaan, minkälaisista operaatioista tuotteen toiminta muodostuu, tai tuotteen voidaan ajatella koostuvan eri komponenteista ja komponenttikokoonpanoista, jotka suorittavat edellä mainitut operaatiot. (Ulrich & Eppinger 2012, s. 184)

Toisaalta tuotetta voidaan tarkastella hyvinkin abstraktisti ja samasta tuotteesta voidaan löytää erilaisia rakenteita. Andreasenin et. al. (1996, s. 17) mukaan tuoterakenteen tarkastelu voidaan jakaa neljään luokkaan tarkastelunäkökulman mukaan. Luokat ovat suunnittelutehtävän tasot (prosessitaso, vaikutustaso, rakenteellinen taso ja osataso), tuotteen toiminnallisuus, tuotteen elinkaari sekä tuotevalikoima. Luokan ja näkökulman perusteella voidaan tuotteelle määrittellä erilaisia rakenteita tai malleja. Tuotteen elinkaari jakautuu esimerkiksi myyntiin, tuotantoon ja käyttöön. (Andreasen et. al. 1996, s. 29) Kuvassa 1 on esitetty tuoterakenteen kokonaiskuva Andreasenin et. al. (1996) mukaan.



Kuva 1. Tuoterakenteen jaottelu mukailen lähteestä (Andreasen et. al. 1996).

Martio (2015, s. 111) määrittelee termin *tuotemalli* tiettyä tarkoitusta varten tehtynä kuvauksena tuotteesta ja toteaa, että tuotteesta on yleensä useampia toisiaan täydentäviä malleja. Esimerkkeinä mainitaan teknologiaperustaiset tuotemallit, kuten

hinnoittelumalli ja koneistusmalli, sekä prosessiperustaiset tuotemallit (Martio 2015, s. 111).

Pakkasen (2015, s. 36) mukaan erilaisten tuoterakenteiden ja -mallien tunnistaminen ja määrittely on tarpeellista, sillä esimerkiksi yrityksen suunnitteluosastolla tuotetta tarkastellaan hyvinkin yksityiskohtaisesti, kun taas myyntipuolella riittää usein yleisemmän tason tieto. Tuoterakenteet ja -mallit eivät ole irrallisia toisistaan vaan niitä joudutaan käyttämään yhtäaikaisesti (Pakkanen 2015, s. 36). Suunnittelija voi esimerkiksi työskennellä tietynlaisen tuoteperheen tuotteiden parissa, käyttää saatavilla olevia komponentteja ja suunnittelutietoa, sekä tarvitsee tietoa tuotteen ohjauksesta ja muusta toiminnallisuudesta. Malleja, rakennäkökulmia ja tietoa yhdistelemällä saadaan kuhunkin suunnittelutehtävään (tai esimerkiksi myyntitehtävään) sopiva malli. Tässä työssä tarkasteltavana olevat CAD-ohjelmalla (Computer-aided design) luodut 3D-mallit ovat esimerkki paljon erilaista tietoa sisältävästä tuotemallista.

2.2 Tuotearkkitehtuuri

Alaluvussa 2.1 esitettiin Ulrichin ja Eppingerin käyttämä tuotteen jako fyysiseen ja toiminnalliseen osaan. Fyysisen osan todettiin koostuvan komponenteista ja komponenttikokoonpanoista, jotka yhdessä toteuttavat tuotteen suunnitellut toiminnot. Ulrich ja Eppinger (2012, s. 185) määrittelevät tuotearkkitehtuurin kuvaukseksi, jonka mukaan tuotteen toimintoja toteuttavat osat on järjestelty edellä mainittuihin komponenttiyhdistelmiin ja siihen, kuinka ne vaikuttavat keskenään. Martio (2015, s. 198) kuvaa tuotearkkitehtuurin seuraavasti: ”Tuotearkkitehtuuri määrittelee tavan, jolla tuote on jaettu fyysisiin komponentteihin”. Fujimoton (2007) mukaan tuotearkkitehtuuri liittyy komponenttiperusteiseen suunnittelukonseptiin ja on kuvaus siitä, miten komponentit kootaan yhteen (Fujimoto 2007, Pakkanen 2015, s. 55 mukaan).

Ulrichin ja Eppingerin (2012, s. 191) mukaan tuotearkkitehtuurilla on merkittäviä vaikutuksia tuotteen mahdolliselle jatkokehitykselle, tuotteen valmistukselle ja sen markkinoinnille ja siitä syystä arkkitehtuurin suunnitteluun tulee panostaa. He toteavat, että suunnittelun lopputuloksena tulee pyrkiä muodostamaan likimääräinen geometrinen sommitelma tuotteesta, pääkomponenttien kuvaukset ja tieto komponenttien välisistä tärkeimmistä vuorovaikutuksista. Tälle suunnitteluprosessille he esittävät nelivaiheisen menetelmän, jonka vaiheet ovat: graafinen esitys (kaavio) tuotteen päätoiminnoista ja -elementeistä, toimintojen ja elementtien jaottelu osakokonaisuuksiin, geometrisen piirroksen (2D tai 3D) laatiminen osakokonaisuuksien perusteella ja olennaisten vuorovaikutusten (haluttujen) sekä sivuvuorovaikutusten tunnistaminen (esimerkiksi

lämpötilamuutokset ja niiden vaikutukset tai värähtelyt). (Ulrich & Eppinger 2012, s. 191–196)

Ulrich ja Eppinger (2012, s. 185–186) jakavat tuotearkkitehtuurin kahteen tyyppiin: modulaariseen ja yhteenrakennettuun (integral) arkkitehtuuriin. Modulaarisessa tuotearkkitehtuurissa tuote koostuu eroteltavista kokonaisuuksista, moduuleista, jotka toteuttavat kukin eri toimintoja. Näiden kokonaisuuksien rajapinnat ja vuorovaikutukset ovat selkeästi määriteltyjä. Kyseiset kokonaisuudet voivat olla yksittäisiä komponentteja tai komponenttikokoonpanoja. (Ulrich & Eppinger 2012, s. 185–186)

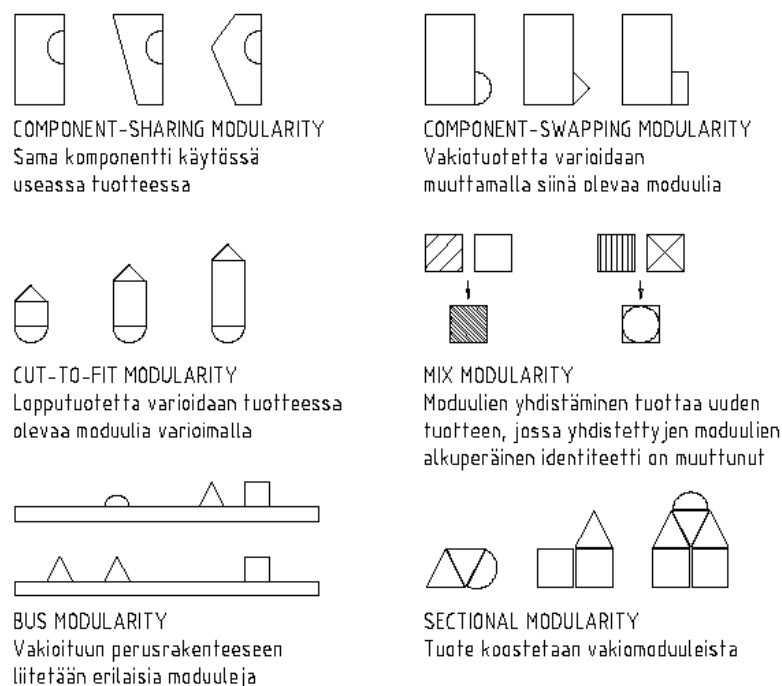
Yhteenrakennetulle arkkitehtuurille puolestaan on tyypillistä, että samaan toimintoon vaikuttaa useampi komponenttikokonaisuus tai että yksi kokonaisuus suorittaa montaa toimintoa. Lisäksi näiden komponenttikokonaisuuksien rajapintoja ei voida selkeästi osoittaa. Tuotteiden arkkitehtuuria ei useinkaan voida yksiselitteisesti määrittellä modulaariseksi tai yhteenrakennetuksi, vaan ennemminkin voidaan analysoida kuinka paljon modulaarisuutta tuotteessa on. (Ulrich & Eppinger 2012, s. 185–186) Monimutkaisten tuotteiden moduuleilla itsellään voi myös olla oma arkkitehtuurinsa. Samasta tuotteesta voidaan siis mahdollisesti osoittaa tuotearkkitehtuuri ja sen lisäksi moduulien arkkitehtuureja. (Ulrich & Eppinger 2012, s. 203)

Fujimoto (2007, s. 86) lisää tuotearkkitehtuurin määrittelyyn avoimen ja suljetun arkkitehtuurin tyypit ja esittää tuotearkkitehtuurin kolmella perustyyppillä: avoin modulaarinen arkkitehtuuri, suljettu modulaarinen arkkitehtuuri ja suljettu yhteenrakennettu arkkitehtuuri. Yhteenrakennettu arkkitehtuuri on aina suljettua. Modulaarinen arkkitehtuuri voi olla avointa tai suljettua. (Fujimoto 2007, s. 86) Suljetun modulaarisen arkkitehtuurin mahdolliset moduulit ja rajapinnat ovat määritelmän mukaisesti tiedossa: ollakseen suljettu eli kokonaan määritelty, arkkitehtuuriin ei voi olla enää mitään lisättävää. Avoimessa modulaarisessa tuotearkkitehtuurissa puolestaan rajapinnat ovat määriteltyjä mutta kaikkia mahdollisia moduuleja ja niiden yhdistelmiä ei ole määritelty. (Pakkanen 2015, s. 68) Avoimen arkkitehtuurin tuotteissa rajapinnat ovat sellaisia, että tuotteita voidaan hyödyntää universaalisti. Esimerkiksi USB-liityntä on avoimen arkkitehtuurin tuote. (Fujimoto 2007, s. 86) Tuotearkkitehtuuri voi olla osittain tai kokonaan modulaarista tai se voi perustua alaluvussa 2.3 käsiteltävälle tuotealustalle.

Kuten tuotearkkitehtuurille, myös modulaarisuudelle löytyy kirjallisuudesta useita määritelmiä ja tarkennuksia. Edellä esitetyn mukaan kukin moduuli on olemassa jotakin tuotteen suorittamaa toimintoa varten. Lehtonen (2007, s. 88) kuitenkin jakaa modulaarisuuden kahteen tyyppiin sen mukaan mitä modulaarisuudella tavoitellaan: tuotemuunteluun tähtäävään M-modulaarisuuteen ja tuotteen elinkaareen liittyvään

modulaarisuuteen. M-modulaarisuus on modulaarisuutta, joka pyrkii helpottamaan tai parantamaan tuotteen muunneltavuutta (Lehtonen 2007, s. 91). Tuotteen elinkaareen liittyvä modulaarisuus tarkoittaa Lehtosen (2007 s. 89) mukaan modulaarisuutta, joka on lähtöisin valmistukseen, huollettavuuteen tai kuljetettavuuteen liittyvistä vaatimuksista. Tuotteesta tunnistettavat elinkaareen liittyvät moduulit eivät siis välttämättä liity tuotteen toimintoihin vaan tällaisen moduulijaon tarkoituksena voi olla esimerkiksi helpompi tai halvempi kuljetettavuus valmistuspaikalta asennuspaikalle.

Modulaarisuutta voidaan tarkastella myös sen mukaan, miten se on tuotteeseen rakennettu. Kuvassa 2 on esitetty kuusi modulaarisuuden tyyppiä Pinen (Pine 1993, Pakkanen 2015, s. 55 mukaan) mukaan.



Kuva 2. Modulaarisuustyyppit mukaillen lähteestä (Pine 1993, Pakkanen 2015, s. 55 mukaan), selitteet mukaillen lähteestä (Martio 2015, s. 193).

Modulaarisuutta käsitellään tässä työssä, sillä se liittyy olennaisesti massakustomointiin ja konfiguroituvien tuotteiden muunteluun. Lisäksi aluvussa 3.3 esitellään modulaarisen systeemin teoriaa. Aluvussa 3.2 todetaan konfiguroituvien tuotteiden kohdalla, ettei modulaarisuus ole vaatimus konfiguroitavuudelle, joten modulaarisuuteen liittyvää teoriaa esitellään tässä työssä lähinnä muun teorian tukena.

2.3 Tuotealusta

Tuotearkkitehtuuriin liittyy käsite tuotealusta. Eri kuluttaja- tai asiakasryhmille ei välttämättä kannata suunnitella kokonaan erilaista tuotetta. On hyödyllistä, jos tuotteesta

voidaan tunnistaa jokin muuttumaton osa, minkä päälle komponentteja tai niiden määrää muuntelemalla voidaan rakentaa eri ryhmille suunnattu, ryhmien tarpeiden mukaan muunneltu tuote (Ulrich & Eppinger 2012, s. 200). Aaslandia et al. (Riitahuhta & Pulkkinen 2001, s. 43) mukailen tuotealusta onkin jokin osa-alue tuotteesta, joka täyttää tuotteelle asetetut keskeisimmät vaatimukset ja jota ei haluta muuttaa.

Tuotealusta ei aina ole pelkästään yksi komponentti tai komponenttikokoonpano, esimerkiksi auton runko, vaan tuotealustaan voi liittyä myös se, onko alustan muodostavilla komponenteilla lopputuotteeseen liittyvää osatoiminnallisuutta. Lehtonen (2007, s. 81) esittää, että pidemmälle kehitetty tuotealusta koostuu kokoonpanosta tai toiminnallisista moduuleista. Tuotealustan muodostavat elementit voivat olla täysin valmiita moduuleja tai komponentteja, tuotealusta voi olla suunnittelualusta tai -aihio, tai tuotealusta voi olla näiden yhdistelmä. (Lehtonen 2007, s. 81)

Suunnittelun ja valmistuksen kannalta on hyödyllistä käyttää mahdollisimman paljon samoja komponentteja ja rakenteita. Näin menetellen ei kuitenkaan voida tehdä rajattomasti variaatioita. Toisaalta tuotteen myynnin kannalta on hyödyllistä, jos tuotteesta on paljon erilaisia muunnelmia eri markkinoille. Ulrich ja Eppinger (2012, s. 200) esittävätkin, että tuotealustan suunnittelu on iterointia näiden kahden ongelman välillä.

Pakkanen (2015, s. 71) määrittelee tuotealustan kautta termin tuoteperhe: tuoteperhe koostuu tuotemuunnelmista, jotka on rakennettu saman tuotealustan pohjalta. Yrityksessä tehty tutkimus- ja kehitystyö mahdollistavat myös tuotealustojen kehittämisen ja sitä myöden tuoteperheiden kehityksen. Tuotealustat ja siten myös tuoteperheet kuitenkin vanhenevat tekniikan kehittyessä ja markkinoiden vaatimusten muuttuessa. (Pakkanen 2015, s. 71) Yhteenvetona todetaan, että tuotealusta voidaan määritellä uudelleenkäytettäväksi vakio-osaksi, joka pysyy muuttumattomana tuoteperheen sisällä, ja jonka päälle rakennetaan konfiguroitua tuote komponentteja varioimalla (Pakkanen 2015, s. 1).

2.4 Standardointi

Kotimaisten kielten keskuksen (Kotimaisten kielten keskus) web-sanakirjan mukaan standardoiminen tarkoittaa muun muassa yhtenäistämistä ja vakiointia. Standardoinniksi voidaan tämän myötä katsoa niin fyysisten komponenttien kuin esimerkiksi suunnitteluprosessienkin vakiointi. Standardikomponentti on Ulrichin ja Eppingerin (2012, s. 266) mukaan sellainen komponentti, joka on käytössä useammassa kuin yhdessä tuotteessa. Standardointi voi olla kansainvälistä, kansallista, teollisuusalan

sisäistä tai yrityksen sisäistä (Pakkanen 2015, s. 50). Näiden lisäksi standardointia voi yrityksissä esiintyä saman tuotteen sisällä tai yrityksen tuotteiden välillä (Juuti 2008, s. 47).

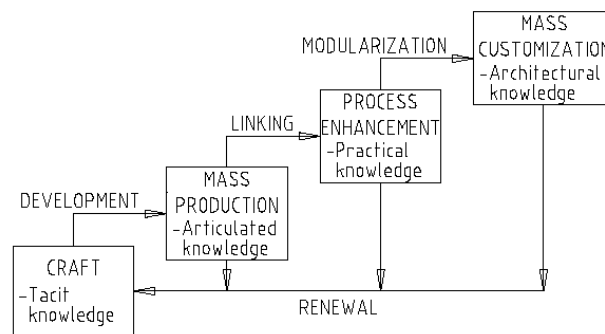
Standardisuunnittelun määritelmä täyttyy Harloun (2006) mukaan kolmen vaatimuksen toteuduttua. Ensimmäinen vaatimus on uudelleenkäyttö siten, että tehtyä suunnittelua käytetään tai tullaan käyttämään myös muissa tuoteversioissa. Kaksi muuta vaatimusta liittyvät tehdyn suunnittelun hallintaan. Suunnitelmat pitää dokumentoida sovitulla tapaa ja standardoitujen suunnitelmien hallinnoinnille pitää osoittaa vastuullinen taho. (Harlou 2006, Pulkkinen 2007, s. 54 mukaan) Tässä työssä uudelleenkäyttö on merkittävä termi ja sitä käytetään kuvaamaan myös olemassa olevan suunnittelutiedon, ei vain fyysisten komponenttien, uudelleenkäyttöä. Standardoinnin tavoite on Juutin (2008, s. 40) mukaan tarpeettoman muuntelun tai vaihtelun vähentäminen, mihin päästään uudelleenkäytöllä.

Standardointi mahdollistaa massatuotannon hyödyt ja skaalaedun eli suurista tuotantomääristä aiheutuvat taloudelliset hyödyt (Juuti 2008, s. 4). Suurten tuotantomäärien taloudellinen hyöty muodostuu siitä, että tuotantomäärän kasvaessa komponentin yksikköhinta laskee (Ulrich & Eppinger 2012, s. 266). Pakkanen (2015, s. 52) listaa laajasti standardoinnin hyötyjä tuotteen elinkaaren eri vaiheissa, joista mainittuna muutama: yhden standardoidun komponentin alhaisempi suunnittelukustannus korvaavien yksittäiskomponenttien suunnittelukustannuksiin nähden, standardikomponenttien varastointimahdollisuus ja sitä myöden nopeampi ja varmempi saatavuus (voi olla myös haitta lisääntyneiden varastointikustannusten takia) ja helpompi huollettavuus.

Lehtosen (2007, s. 92) mukaan standardointi on perusta alaluvussa 2.2 käsitellylle modulaarisuudelle. Vakioidut komponentit ja kokoonpanot mahdollistavat kokoonpanoperustaisen moduloinnin, joka on modulaarisuuden perustaso (Lehtonen 2007, s. 92). Tästä kehittyneemmät modulaariset rakenteet ovat toimintoperustainen modulaarisuus, asiakaslähtöinen tuotealustapohjainen modulaarisuus ja dynaaminen, koko tuotteen elinkaaren kattava modulaarisuus (Lehtonen 2007, s. 92). Yksi tärkeä modulaarisuuteen liittyvä standardointikohde ovat moduulien rajapinnat, sillä niiden avulla mahdollistetaan modulaaristen tuotteiden tehokas muunneltavuus (Pakkanen 2015, s. 85).

3. TUOTEKONFIGUROINNIN TEORIAA

Paradigmoja käytetään kuvaamaan yleisesti hyväksytyjä tieteellisiä saavutuksia, jotka tietyn aikaa edustavat ratkaisumallia havaittuihin ongelmiin. Victor ja Boynton (1998) tunnistavat viisi paradigmaa yritysten tuotantomalleihin liittyen (Victor & Boynton 1998, Pakkanen 2015, s. 13 mukaan). Esitetyt paradigmat ovat: käsityö (craft), massatuotanto (mass production), menetelmien tehostaminen (process enhancement), massakustomointi (mass customization) ja älykäs konfigurointi (co-configuration). Konfiguroituvat tuotteet liittyvät näistä massakustomoinnin paradigmaan. Tunnistetut paradigmat riippuvat usein siitä kuka ne esittää. Onkin olemassa useita eri paradigmajakoja ja eroja siinä, mikä tulee olemaan tulevaisuuden vallitseva paradigma. (Pakkanen 2015, s. 13–16) Kuvassa 3 on esitetty neljä ensimmäistä paradigmaa Victorin ja Boyntonin (1998) mukaan sekä tekijät, jotka mahdollistavat seuraavalle tasolle siirtymisen ja paradigmoihin liittyvä tietämyksen kehitys. Victor ja Boynton (1998) esittävät massakustomointia seuraavana paradigmana on älykkään konfiguroinnin, mutta esimerkiksi kestävä tuotanto (sustainable production) on myös esitetty massakustomointia seuraavana paradigmana (Jovane et. al. 2003, Pakkanen 2015, s.14 mukaan). Yksi mahdollinen paradigma on ainetta lisäävä valmistus ja massapersonointi, jotka ovat lisääntyneet 3D-tulostusmahdollisuuksien myötä. (Yao & Lin 2016, s. 1665)



Kuva 3. Tuotantomallin (paradigman) vaihtuminen mukaillen lähteestä (Victor & Boynton 1998, Pakkanen 2015, s. 13 mukaan).

Muuttuvat asiakasvaatimukset luovat tarvetta uusille tuotevariaatioille, joihin vastaaminen edellyttää menetelmien tehostamista ja tuotannon kehitystä. Tämän toistuvan prosessin myötä yrityksessä opitaan hallitsemaan muutoksia niin tuotannon kuin suunnittelun osalta ja käytännön kokemus kehittyy syvemmäksi tietämykseksi. Tämä tietämys mahdollistaa systemaattisen muutoksen ja mukautumisen yrityksen prosesseissa asiakkaiden vaatimusten täyttämiseksi. Tämä johtaa, tai tekee mahdolliseksi, massakustomointiin siirtymiseen ja sen peruseriaatteita ovat muun muassa: järjestelmien standardointi, korkea laatu ja asiatarpeisiin vastaaminen, tiedon

uudelleenkäyttö sekä työvoiman, tiedon, tuotteiden ja prosessien uudelleenkäyttöön tarpeen mukaan. (Pakkanen 2015, s. 18) Tässä luvussa käsitellään massakustomoinnin toteuttamisen kannalta olennaisia konfiguroituvia tuotteita ja niihin liittyviä käsitteitä *konfiguraatio* termistä lähtien.

Massakustomointi tai mikään muukaan toimintamalli ei ole itsetarkoitus, vaan yrityksen tulee analysoida toimintaympäristöään nyt ja tulevaisuudessa päättäessään mikä on sille sopivin toimintamalli (Pakkanen 2015, s. 19). On tuotteita, joiden kohdalla esimerkiksi käsityöläisyyttä arvostetaan, eikä ole yrityksen etujen mukaista vaihtaa massatuotantomalliin.

3.1 Konfigurointi ja konfiguraatio

Konfiguroinnille ja konfiguraatiolle on olemassa useita määritelmiä. Jopa niin että eri tieteenaloilla nämä saattavat tarkoittaa hieman eri asiaa. Sanoja käytetään tekniikan alan ohella muun muassa taiteen alalla. (Riitahuhta & Pulkkinen 2001, s. 71) Pulkkinen (Riitahuhta & Pulkkinen 2001 s. 71–72) esittää, että konfiguraatio on yksi mahdollinen järjestely määrittelystä joukosta komponentteja ja niiden välisiä suhteita. Kahden samasta joukosta muodostetun konfiguraation välillä voi olla sekä rakenteellisia, että toiminnallisia eroavaisuuksia. Kuitenkin niin että samasta lähtöjoukosta johtuen, eroavaisuudet konfiguraatioiden välillä ovat rajallisia. (Riitahuhta & Pulkkinen 2001, s. 71–72)

Järventaustan ja Pulkkinen (Riitahuhta & Pulkkinen 2001, s. 157) mukaan konfigurointi (tai konfigurointitehtävä, konfigurointiprosessi) on tuotteen variointia systemaattisesti. Konfigurointiprosessissa ei suoriteta uutta suunnittelua, vaan variointi tapahtuu ennalta määritettyjen rajojen sisällä. (Riitahuhta & Pulkkinen 2001, s. 157) Ennalta määritetyt rajat tarkoittavat, että konfiguroinnin kohteena olevasta tuotteesta täytyy olla olemassa konfigurointiprosessin vaatimat säännöt sisältävä konfigurointimalli (Martio 2015, s. 13). Pakkanen (2015, s. 71) esittää konfiguroinnista Haugin (2007) määritelmän: konfigurointi tarkoittaa ennalta määritettyjen olioiden yhdistämistä ja niiden muunneltavien ominaisuuksien määrittelyä mahdollisia rajoitteita ja sallittuja rajapintakombinaatioita noudattamalla. Haugin määritelmässä ei oteta kantaa siihen, liittyykö konfigurointi fyysisiin, vai ei-fyysisiin tuotteisiin. (Haug 2007, Pakkanen 2015, s. 71 mukaan) Edellisessä kappaleessa määritelty konfiguraatio on konfigurointitehtävän tulos (Pakkanen 2015, s. 71). Kuten edellä on esitetty, konfigurointiprosessissa valinta toteutetaan aina tietystä ennalta määrätystä joukosta komponentteja ja mahdollisia komponenttiyhdistelmiä. Siten tietystä joukosta muodostetut konfiguraatiot pohjautuvat samaan tuotealustaan ja muodostavat alaluvussa 2.3 esitetyn tuoteperheen.

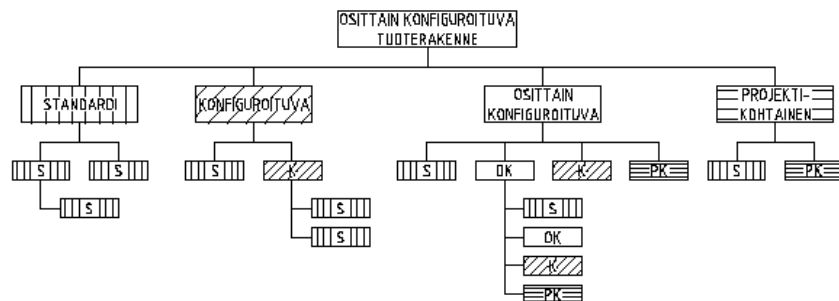
3.2 Konfiguroituva tuote

Juuti (2008, s. 33) määrittelee konfiguroituvan tuotteen seuraavasti:

Konfiguroituva tuote viittaa tuotteen yleiskuvaukseen, josta konfiguroituvan tuotteen variantit muodostetaan konfiguraatiomallin rajoitusten mukaan. Konfiguroituva tuote voidaan ymmärtää tuoteperheenä, joka pohjautuu ennaltasuunniteltuihin elementteihin, kuten moduuleihin.

Suomessa 1990-luvun lopulla toteutettu tutkimus asettaa konfiguroituvat tuotteet massatuotantotuotteiden ja projektituotteiden (one-of-a-kind) väliin, kun tarkastellaan tuotteen sopivuutta asiakasvaatimuksiin ja tuotettujen tuotteiden määrää (Juuti & Lehtonen 2006, s. 267). Massatuotantotuotteiden sopivuus tarkkoihin asiakasvaatimuksiin on projektituotteita heikompaa mutta projektituotteisiin verrattuna niitä valmistetaan suuria määriä. Juuti ja Lehtonen (2006, s. 267) selittävät, että tutkimuksessa konfiguroitavan tuotteen konfigurointitehtävä asiakastoimituksessa on määritely tuotteen muunteluksi olemassaolevien vaihtoehtojen pohjalta asiakasvaatimusten mukaan. Siten konfiguroitavien tuotteiden asiakastoimituksiin ei liity uuden suunnittelutyön toteuttamista, vaan suunnittelutyö on tehty tuotekehitystyönä konfiguraatiomallia laadittaessa (Juuti & Lehtonen 2006, s. 267).

Juuti ja Lehtonen (2006) tarkastelevat omassa jatkotutkimuksessaan monimutkaisia asiakastoimituksia, kuten laivatoimituksia, ja tarkentavat konfiguroitavien tuotteiden määrittelyä ja vertailua massatuotantotuotteisiin ja projektituotteisiin. Juuti ja Lehtonen (2006, s. 269) esittävät tutkimuksessaan konfiguroitavan tuotteen lisäksi osittain konfiguroitavan tuotteen ja toteavat, että sen tuoterakenne voidaan jakaa neljäntyyppiseen elementtiin kuvan 4 mukaisesti. Jakoperusteena on se, kuinka paljon tuotteen eri elementeissä esiintyy täysin uutta suunnittelua ja kuinka paljon käytetään jo olemassaolevaa suunnittelutietoa.



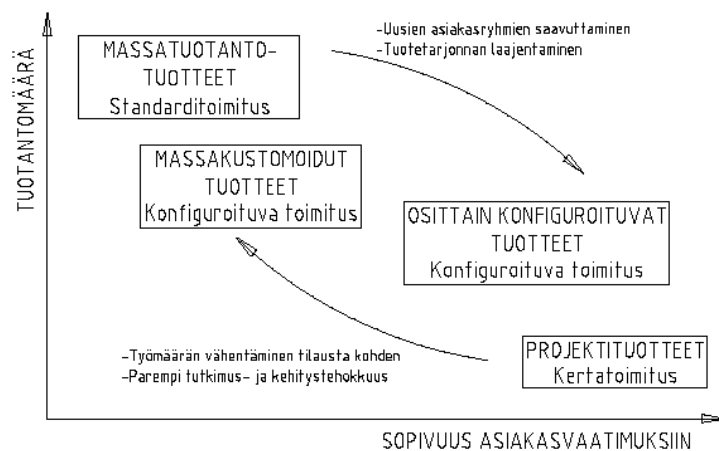
Kuva 4. Osittain konfiguroituvan tuotteen tuoterakenne mukailen lähteestä (Juuti & Lehtonen 2006, s. 269).

Osittain konfiguroituvan tuotteen tuoterakenne ja esitetyt elementtityypit ovat: standardelementit (S), projektikohtaiset elementit (PK), konfiguroitavat elementit (K) ja

osittain konfiguroituvat elementit (OK). Standardelementit ovat valmiiksi suunniteltuja ja uudelleenkäytettäviksi tarkoitettuja, kun taas projektikohtaiset elementit suunnitellaan kyseistä projektitoimitusta varten, eikä niitä käytetä muualla. Konfiguroitua elementti voi sisältää standardi- ja konfiguroituvia elementtejä. Osittain konfiguroitua elementti voi sisältää kaikkia edellä mainittuja sekä osittain konfiguroituvia elementtejä. Konfiguroituvat elementit pohjautuvat suunnittelutiedon uudelleenkäyttöön mutta osittain konfiguroitua elementti vaatii uutta suunnittelutyötä. (Juuti & Lehtonen 2006, s. 268–269) Pulkkinen (2007 s. 55) esittää neljä tapaa, joilla konfiguroituvien tuotteiden variointia toteutetaan:

1. (samanlaisten) elementtien lukumäärän variointi
2. elementtityypin variointi (modulaarisuus, vaihdettavat elementit)
3. elementtien keskinäisten suhteiden variointi
4. elementin ominaisuuksien variointi.

Alaluvun 3.2 alussa konfiguroituvat tuotteet asetettiin tietyin ehdoin massatuotantotuotteiden ja projektituotteiden väliin. Kuvassa 5 on esitetty Juutin ja Lehtosen (2006) mukaan tarkennettu määritelmä.



Kuva 5. Massakustomoidut ja osittain konfiguroituvat tuotteet suhteessa massatuotettuihin tuotteisiin ja projektituotteisiin mukailen lähteestä (Juuti & Lehtonen 2006, s. 275).

Osittain konfiguroituvat tuotteet vastaavat hyvin asiakasvaatimuksiin, mutta koska niihin sisältyy aina suunnittelytyötä, tuotantomäärä jää massatuotteita alhaisemmaksi. Massakustomoidut tuotteet ovat konfiguroitua tuotetoimitus, mutta asiakasvaatimuksiin pyritään vastaamaan olemassolevilla ratkaisuilla, joten sopivuus vaatimuksiin jää osittain konfiguroituvia tuotteita alhaisemmaksi. (Juuti & Lehtonen, 2006 s. 274) Konfiguroituvat tuotteet ovat asiakasvaatimusten täyttöä ja tuotantomäärää ajatellen kompromissi projektituotteiden ja massatuotteiden välillä (Lehtonen 2007, s. 72).

Konfiguroituihin tuotteisiin perustuva toimintamalli, eli systemaattinen tuotevariointi, on yrityksille yksi keino toteuttaa massakustoimointia. Tämän toimintamallin olennainen piirre on toisistaan erotetut toimitus- ja suunnitteluprosessit. (Lehtonen 2007, s. 70) Lehtonen (2007, s. 70–71) esittää, että systemaattinen tuotevariointi on tärkein syy modulaaristen tuoterakenteiden käytölle mutta lisää, ettei modulaarinen tuoterakenne ole kuitenkaan vaatimus systemaattisen tuotevarioinnin toteuttamiselle. Modulaarinen tuotearkkitehtuuri tukee konfigurointia. (Lehtonen 2007, s. 70–71 s. 79) Kuvassa 3 esitettiin modulaarisuus mahdollistavana tekijänä massakustomointiin siirryttäessä. Alaluvussa 2.2 esitettiin jako tuotteen muunteluun tähtäävään M-modulaarisuuteen ja tuotteen elinkaareen liittyvään modulaarisuuteen. Tässä yhteydessä kyse on M-modulaarisuudesta.

Kuvassa 3 esitettiin tekijät, jotka mahdollistavat eri tuotantomallit ja eri tuotantomalleihin liittyvän tietämyskehityksen. Kuvassa 5 puolestaan on esitetty mikä motivaatio yrityksillä voi olla siirryttäessä massatuotteista konfiguroitaviin tuotteisiin ja päin vastoin. Lehtonen (2007, s. 72) listaa muun muassa seuraavia hyötyjä, joita yritys voi systemaattisella tuotevarioinnilla saavuttaa: asiakasvaatimusten täyttäminen, toimitusaikojen lyhentäminen, kulujen hallinta, yhtäläisen laadun takaaminen ja tuotevalikoiman hallinta. Sillä siirrytäänkö konfiguroituvaan toimintamalliin projektituotemallista vai massatuotantomallista, on suuri merkitys mahdollisiin hyötyihin. Esimerkiksi toimitusaikojen lyhentäminen liittyy muutokseen projektituotteista konfiguroituihin tuotteisiin, kun taas parempi asiakasvaatimusten täytyminen toteutuu siirryttäessä massatuotantomallista konfiguroituihin tuotteisiin (Lehtonen 2007, s. 72–76).

3.3 Modulaarinen systeemi konfiguroituvan tuotteen suunnittelun lähtökohtana

Konfiguroituvien tuotteiden avulla pyritään vastaamaan asiakasvaatimuksiin tehokkaasti ja kilpailukykyisesti. Konfiguroituvien tuotteiden tärkein ominaisuus on niiden tehokas muunneltavuus. Olennaista on muuntelun mahdollistavat ja muuntelua helpottavat keinot. Juutin ja Lehtosen (2006) mukainen ja alaluvussa 3.2 esitetty osittain konfiguroituihin tuotteisiin perustuva tuoterakenne mahdollistaa yhtäältä tuotteiden muunneltavuuden (variability) ja toisaalta yhtenevyyden tai yleisyyden (commonality). Yhtenevyys tuotteiden välillä saavutetaan standardoimalla ja uudelleenkäytöllä. Muunneltavuus saavutetaan konfiguroituvilla tai osittain konfiguroituvilla tuoterakenteilla, joiden sisällä muunneltavuuden mahdollistavat konfigurointi ja modulaarisuus. (Juuti 2008, s. 113) Modulaarinen systeemi on systeemi, joka koostuu moduuleista siten, että

systemissä moduulien vaihdettavuus toteutuu ja modulaarisuutta voidaan näin hyödyntää (Lehtonen 2007, s. 88).

Juuti (2008, s. 37) esittää, että modulaarinen systeemi muodostuu arkkitehtuurista, moduuleista ja konfiguraatitiedosta. Pakkasen et al. (2013, s. 93) mukaan edellä mainitut elementit ovat lähtökohta suunnitteluprosessille mutta Pakkanen et al. nostavat näiden lisäksi esiin kaksi muuta tärkeää elementtiä: jakologiikan ja rajapinnat. Jakologiikka ja rajapinnat ovat yhteydessä modulaariseen systeemiin siten, että jakologiikka vaikuttaa arkkitehtuuriin ja rajapinnat moduuleihin (Pakkanen et al. 2013, s. 93). Konfiguraatitieto liittyy tuote- ja suunnittelukonfiguraattoreihin ja sitä ei käydä tässä työssä läpi. Tässä työssä todetaan, että Juutin esittämä kuvaus modulaarisen systeemin pääkomponenteista sisältää hyvän lähtökohdan konfiguroituvien tuotteiden suunnittelussa ja mallinnuksessa huomioitaville elementille. Näistä elementeistä jakologiikkaa ja rajapintoja tarkastellaan seuraavassa. Tuotteen arkkitehtuuria ja modulaarisuutta käsiteltiin tarkemmin alaluvussa 2.2.

Pakkanen et al. (2019, s. 42) tiivistävät edellä mainitut viisi pääelementtiä siten, että jakologiikka pyrkii vastaamaan kysymykseen 'miksi' kun taas moduulit, rajapinnat, arkkitehtuuri ja konfiguraatitieto sisältävät vastauksen kysymyksiin 'mitä' ja 'miten'. Jakologiikka on tieto siitä, miksi moduulit ja arkkitehtuuri ovat tietynlaisia ja mitkä osa-alueet tuotteesta vaativat konfiguroinnin mahdollisuuden (Pakkanen 2015, s. 67). Asiakasvaatimukset ja -tarpeet täytyy pyrkiä ymmärtämään, jotta konfiguroitavuutta vaativia osa-alueita voidaan tunnistaa ja niihin osataan luoda sellaista muunneltavuutta, joilla vaatimukseen pystytään vastaamaan (Lehtonen 2011, Pakkasen 2015, s. 67 mukaan). Jakologiikka ohjaa yrityksen kustomointiperiaatteet ja sitä rajoittaa olemassa oleva ja yrityksen hallitsema teknologia. Kustomointiperiaatteet liittyvät yrityksen liikkeenjohdolliseen puoleen (Juuti 2008, s. 37). Yksi jakologiikkaa ohjaava tekijä on se, millaista muunneltavuutta tuotteelle halutaan: esimerkiksi alaluvussa 2.2 esitetyt elinkaareen liittyvä ja tuotemuunteluun tähtäävä modulaarisuus. Jakologiikkaan liittyy myös tuotteen osien jako osittain konfiguroituvan tuotteen teorian mukaan, joka esitettiin kuvassa 4 (Pakkanen 2015, s. 67).

Pakkanen et al. (2020, s. 2330) tunnistavat tutkimuksessaan kuusi tapaa jakaa tuotteita komponentteihin, joista jako toiminnallisiin osakokonaisuuksiin on yksi tapa. Tuotteen jako komponentteihin toiminnallisista perusteista oli esillä alaluvussa 2.2. Muita tapoja olivat jako isoihin ja pieniin osakokonaisuuksiin (big building blocks BBB, small building blocks SBB), suuri yhteinen elementti (big common element BCE), monitoiminnallinen ydinosa (multifunctional core element MCE) ja runkotyyppinen peruselementti (frame-like base element FBE) (Pakkanen et al. 2020, s. 2330).

BBB ja SBB esitetään perustuvan Borowskin (1961) Baukatensystemiin. Näissä tavoitteena on jakaa lopputuote kirjaimellisesti moneen pieneen tai muutamaan isompaan komponenttiin. BCE:n todetaan pohjautuvan Sanchezin (1999) määrittelemälle yleiskäyttöinen runko –ajatukselle (universal chassis), jossa rakenteen perusosa pysyy aina samana. Rakenteeseen voidaan lisätä komponentteja, mutta se ei vaikuta perusrakenteeseen ja komponentit ovat sellaisia, että niihin voidaan lisätä edelleen komponentteja perusosaan vaikuttamatta. MCE:n todetaan olevan standardoidulle ja osatoiminnallisuutta sisältävälle arkkitehtuurille perustuva jakotapa. MCE arkkitehtuurissa vakiorakenne toteuttaa lopputuotteen perustoiminnallisuuksia. FBE:ssä ajatuksena on runkomainen peruselementti, johon komponentteja lisätään. Erona edellisiin on se, että yksi FBE-runco ei ole vaihtokelpoinen minkään muun rungon kanssa, eikä sitä voida käyttää kuin vain yhdessä määrättyssä tuotteessa. (Pakkanen et. al. 2020, s. 2330)

Parslov ja Mortensen (2015, s. 183) määrittelevät erityisesti rajapintoihin liittyvässä tutkimuksessaan rajapinnan seuraavasti: ”Rajapinta määrittelee systeemissä kahden toisiinsa liittyvän elementin toiminnallisen tai fysikaalisen suhteen, jonka ylitse voi tapahtua vuorovaikutusta.”. Tutkimuksensa perusteella he toteavat, että kirjallisuudesta löytyy useita erilaisia määritelmiä sille, mikä rajapinta on. Määritelmässä on eroja sen suhteen, onko rajapinta vain osa järjestelmää tai komponenttia, vai tuleeko rajapintaa käsitellä erillisenä suunnitteluobjektina. Rajapintojen määritelmässä yleisesti ottaen toistuu näkemys siitä, että niihin liittyy sekä rakenteellinen, että toiminnallinen puoli. (Parslov & Mortensen 2015, s. 192–193) Esimerkkejä kirjallisuuden perusteella laadituista kuvauksista ovat: toisiinsa geometrisesti liittyvät piirteet (kuten Lego-palikka), rajapintapari, toisiinsa yhdistyvät pinnat tai kahden toiminnallisen pinnan välinen vuorovaikutus (Parslov & Mortensen 2015, s. 192). Alaluvussa 2.4 todettiin, että rajapintojen standardointi on tärkeää tuotteen tehokkaalle konfiguroituvuudelle, sillä sillä on suora yhteys komponenttien vaihdettavuuteen. Rajapintojen käsittelyyn liittyy yrityksen hallitsema teknologia ja se miten tuotteen jakologiikka toteutetaan. Konfiguroituvien tuotteiden komponenttien suunnittelussa rajapinnat on huomioitava itse komponenttien suunnittelussa ja niillä on merkitystä siinä, miten komponentteja tai moduuleja voidaan tuotteessa vaihdella. Tämän perusteella todetaan, että konfiguroituvan tuotteen kohdalla rajapinnat usein vaativat puhdasta suunnittelutyötä.

Parslov ja Mortensen (2015, s. 194) esittävät, että monimutkaisessa systeemissä moduuli tai komponentti itsessään voi koostua monen komponentin yhdistelmästä ja sisältää siten monia rajapintoja. Lisäksi moduulilla tai komponentilla on rajapinnat, joiden avulla se liittyy muihin systeemiin. He jakavat rajapinnat kahteen luokkaan (A ja B) sen

mukaan, kuinka suurta painoarvoa niiden suunnittelu vaatii. A-tyyppin rajapinnat ovat sellaisia, joissa voi esiintyä paljon variaatiota esimerkiksi ylläpidettävyyden tai mahdollisen tuotekehityksen takia. A-tyyppin rajapinnoilla on suuri merkitys koko systeemin toiminnallisuuden kannalta ja niihin liittyy sekä fyysisiä, että toiminnallisia piirteitä. A-tyyppin rajapinnat voivat liittyä osa-alueeseen, jonka suunnittelussa on mukana eri suunnittelualueiden asiantuntijoita, esimerkiksi mekaniikkasuunnittelija ja sähkösuunnittelija. Tällainen rajapinta on määriteltävä yksiselitteisesti. A-tyyppin rajapintojen kohdalla voidaan todeta, että itse rajapinta vaatii merkittävää huomiota tuotetta suunniteltaessa. B-tyyppin rajapinnat puolestaan ovat esimerkiksi rajapintoja joissa siirtyy lämpöä tai sähkövirtaa, tai ne ovat fyysisiä kosketuspintoja kahden komponentin välillä. B-tyyppin rajapintoihin voi myös liittyä toiminnallisuutta mutta, niiden vaatima suunnittelutyö on vähäisempää ja liittyy esimerkiksi kestävyyteen tai käyttövarmuuteen. (Parslov & Mortensen 2015, s. 194)

Seuraavassa luvussa käsitellään parametrin mallinnuksen teoriaa yleisesti, sekä komponentti- ja kokoonpanotasolla. Kokoonpanomallinnuksen kohdalla esitettävä mallinnusstrategia liittyy hyvin läheisesti tuotteen arkkitehtuuriin ja osaltaan myös jakologiikkaan. Komponenttimallinnuksen teoriaosuudessa käsitellään mallinnusstrategioita, jotka edesauttavat selkeiden ja helposti muunneltavien mallirakenteiden luomista. Näiden strategioiden hallitsemisen voidaan katsoa olevan hyödyllistä muun muassa monimutkaisempien rajapintojen mallinnuksessa.

4. PARAMETRINEN SOLIDIMALLI

Tässä työssä käsitellään tietokoneavusteisesti laadittuja (CAD, computer-aided design) parametrisia 3D-solidimalleja. Solidimallin ohella on olemassa esimerkiksi pintamalleja (surface modeling) ja rautalankamalleja (wireframe modeling). Rautalankamallinnus on yksinkertaisin 3D-mallinnuksen muoto. Se perustuu solmukohtille (node), kärkipisteille (vertex) ja näitä yhdistäville särmille (edge), jotka lopulta määräävät geometrian reunaviivat. 3D-mallinnuksen kehityksen myötä syntyi pintamallinnus, jossa määritellään kuinka kappaleen pinnat kulkevat rautalankamallin peruselementtien määrittelemänä. (Stroud & Nagy 2011, s. 66–68; Um, 2016 s. 73–78)

Solidimallinnus pohjautuu yleensä joko rajapintakuvaukseen (boundary representation, B-rep) tai rakenteellisiin solidigeometrioihin (constructive solid geometry, CSG). Kappaleen kuvaus rajapintamallin avulla sisältää kaksi perusosaa: topologian ja geometrian. Topologia määrittelee kappaleen rakenteen ja geometria kappaleen muodon. Kappaleen topologia koostuu tahoista (face), särmistä (edge) ja kärkipisteistä (vertex), jotka edelleen muodostavat pintoja (surface), käyriä (curve) ja pisteitä (point). CSG-systeemeissä kappale mallinnetaan primitiiviobjektien ja Boolean operaattorien (AND, OR, NOT) avulla. Käytettyjä objekteja ovat esimerkiksi kuutio, sylinteri tai kartio. Monimutkaisempia geometrioita saadaan yhdistelemällä primitiiviobjekteja Boolean operaattoreita käyttäen. (Stroud & Nagy 2011, s. 69–78; Um, 2016 s. 79–81)

Parametrisuudella tässä työssä tarkoitetaan mahdollisuutta yksilöidä ja muuttaa kappaleeseen liittyvää mitoitusta ja operaatioita. Esimerkiksi kuutio voidaan mallintaa 2D-rautalankamallina, josta pursotetaan (extrude) kolmanteen ulottuvuuteen. Parametrisessa mallissa mallintaja tai käyttäjä voi muokata rautalankamallin 2D-mitoitusta tai pursotusdimensiota suoraan tai muutos voi tapahtua epäsuorasti malliin luotujen relaatioiden avulla. Relaatiot ovat riippuvuuksia, joita mallintaja on kappaleeseen luonut. Esimerkiksi pursotusdimensio voidaan asettaa riippumaan 2D-rautalankamallin mitoista. (Stroud & Nagy 2011, s. 525) Relaatiot voivat olla myös geometrisia: esimerkiksi kahden särmän yhdensuuntaisuus, kohtisuoruus tai yhtä suuri pituus.

Nykypäivänä suunnittelussa hyödynnetään laajasti mallipohjaista suunnittelua. Parametriset 3D-mallit ovat yleisesti ottaen helppoja ja nopeita muokata, suunnittelutieto on monessa tapauksessa malliin sisäänrakennettuna ja malli voi olla linkitettyinä yrityksen PDM-järjestelmään (product data management) tai CAM-järjestelmään

(computer-aided manufacturing). Parametriset 3D-mallit ovat tehokkaita apuvälineitä myös yrityksen tuotekehityksessä (Camba et al. 2016, s. 18).

4.1 Komponenttien mallinnus

CAD-mallinnukselle on tyypillistä, että mallinnustapoja monimutkaiselle kappaleelle on lähes rajaton määrä. Esimerkiksi reiällisen levykappaleen reiän paikoitus voidaan toteuttaa eri tavoin: reiän paikka voidaan mitoittaa eri särmistä tai se voidaan paikottaa geometrisella relaatiolla jonkun särmän keskipisteen mukaan. Voidaan todeta, että mitä monimutkaisempi kappale tai useampi piirre, sitä enemmän on tapoja luoda malli. Kappaleen mallinnuksessa onkin tärkeää pyrkiä luomaan sellaisia parametreja ja piirteitä, jotka johtavat helposti muunneltavaan ja uudelleenkäytettävään lopputulokseen. (Camba et al. 2016, s. 18) Asia voidaan yksinkertaistaa toteamalla, että oikeannäköistä lopputulosta tärkeämpää on tapa, jolla siihen on päästy. Camba et al. (2016, s. 19–20) toteavat tutkimuksessaan, että kirjallisuudesta löytyy tutkimusta mallien kokoonpanostrategioihin liittyen ja parametrisia malleja on käsitelty melko laajasti esimerkiksi teknologian ja tuotekehityksen pohjalta. Vähintäänkin yhtä tärkeää on kuitenkin keskittyä mallinnuksessa myös yksittäisten komponenttien mallinnustapoihin (Camba et al. 2016, s. 19–20).

Parametristen solidimallien luominen pohjautuu ohjelmistoissa pääosin mallin piirrepuuhun (feature tree, design tree, history tree). Malliin luodaan piirteitä järjestyksessä ja tieto piirteistä tallentuu hierarkiseen piirrepuuhun. Piirrepuun yksi ominaisuus on parent/child -ominaisuus, joka tarkoittaa sitä, että ensin luotu piirre (parent) vaikuttaa johonkin tai joihinkin jälkeensä luotuun piirteeseen (child). (Camba et al. 2016, s. 19) Parent/child -riippuvuus voi olla tilanteesta riippuen olla joko haluttua tai välttävää. Oikein laadittu parent/child -riippuvuus mahdollistaa piirrepuun hierarkiassa sen, että parent-piirteeseen tehty muutos vaikuttaa automaattisesti vain haluttuihin child-piirteisiin niitä muuttaen. (Camba et al. 2016, s. 19)

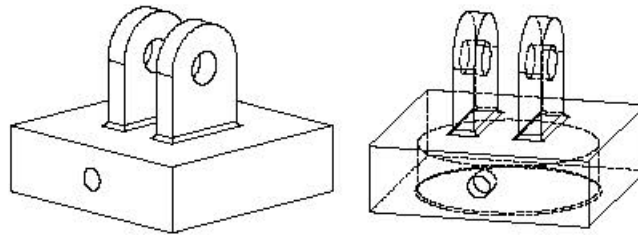
Camba et al. (2016, s. 20–21) esittävät tutkimuksessaan kolme formalisoitua mallinnustapaa, joilla voidaan tehokkaasti toteuttaa mallien helppo muunneltavuus ja uudelleenkäytettävyys. Nämä tavat ovat lineaarinen mallinnus (horizontal modeling), täsmällisten referenssien mukainen mallinnus (explicit references modeling) ja joustava mallinnus (resilient modeling). Lineaarinen mallinnustapa eroaa kahdesta muusta tavasta siten, että siinä pyritään malliin, jossa ei ole parent/child ryyppisiä relaatioita. Piirteet rakennetaan niille vartavasten luotujen perustasojen avulla jolloin parent/child relaatioita ei synny piirteiden välille. Tämä johtaa sinänsä helppoon muokattavuuteen mutta käytännössä eliminoi mahdollisuuden rakentaa älykkyyttä malliin. (Camba et al.

2016, s. 20) Kyseinen mallinnustapa voisi olla hyödyllinen konfiguroituvien tuotteiden standardi- tai projektikohtaisissa elementeissä. Esimerkiksi standardielementin kohdalla voitaisiin ajatella, että jotain ominaisuutta tai piirrettä revisioitaessa ei haluta, että muutoksia syntyy muualle malliin esimerkiksi rajapintojen takia. Mahdolliset periytyvät muutokset voivat jäädä huomaamatta tai niiden korjaaminen voi aiheuttaa ylimääräistä työtä. Projektikohtaisen elementin kohdalla voi olla hyödyllistä ajatella asiakasvaatimuksia, jotka voivat muuttua toimitusprosessin aikana. Komponentissa olevien piirteiden mallinnus siten, etteivät ne ole riippuvaisia toisista, mahdollistaa luonnollisesti niiden muuttamisen yksittäin ja nopeasti.

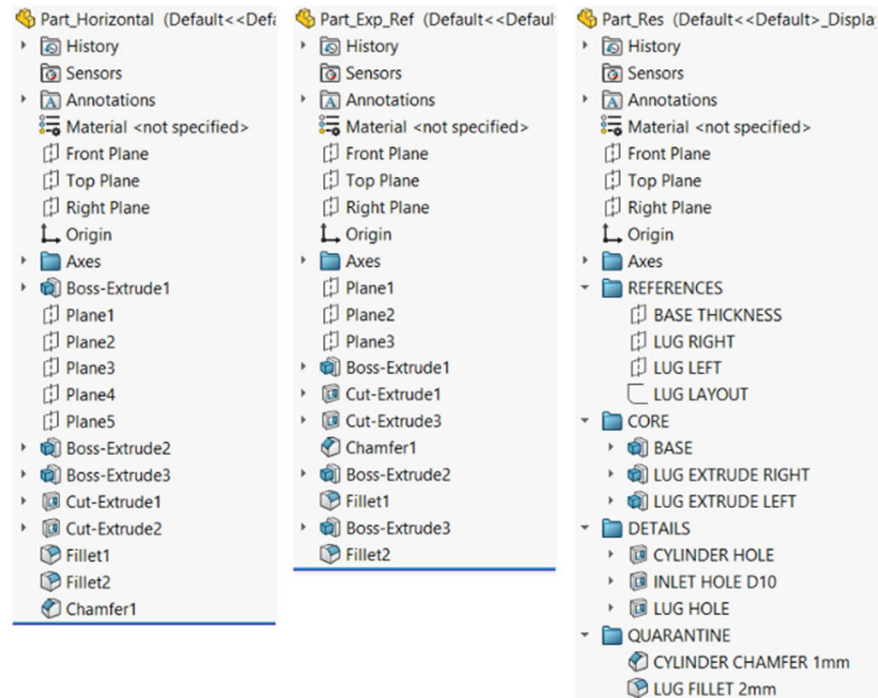
Täsmällisten referenssien mukainen mallinnustapa on kehitetty monimutkaisille tuotteille. Mallinnustavassa pyritään minimoimaan olemassa olevaan geometriaan riippuvaiset piirteet ja ryhmittämään tällaiset parent/child riippuvuudet mallissa paikallisesti. Kullekin riippuvuusryhmälle luodaan oma kappaleen geometriasta riippumaton referenssipiirre, esimerkiksi taso, johon parent-piirre on laadittu. Toisiinsa liittyvät piirteet ja piirryhmät, jotka liittyvät samaan toiminnallisuuteen, pyritään ryhmittelemään piirrepuuhun myös visuaalisesti (lähelle toisiaan, mallinnushistoria), mikä edesauttaa mallin rakenteen ymmärtämistä ja mallissa mahdollisesti esiintyvien generointivirheiden ja niiden syiden etsintää. (Camba et al. 2016, s. 20)

Joustavan mallinnustavan pohjana on piirteiden luokittelu kuuteen ryhmään. Luokittelu perustuu sekä piirteiden tarkoitukseen, että niiden tärkeyteen ja vaikutukseen muihin piirteisiin. Ryhmät yksi (reference) ja kaksi (construction) sisältävät apureferenssejä siten, että ensimmäisen ryhmän referenssit ovat käytössä kaikille kaikille piirteille ja ne voivat olla päätasoja tai yleisiä layout-sketsejä. Toisen ryhmän referenssejä luodaan, mikäli jotkin monimutkaiset piirteet tarvitsevat niitä. Kolmas ryhmä (core) sisältää kappaleen pääpiirteet ja niille on tyypillistä se, että ne ovat ainetta lisääviä piirteitä. Neljäs ryhmä (detail) päinvastoin sisältää ainetta poistavia piirteitä ja niitä voidaan linkittää ryhmien 1-3 piirteisiin mutta ei toisiin neljännen ryhmän piirteisiin. Viidennen ryhmän (modify) piirteet ovat mahdollisia viimeisiä geometrisiä elementtejä, kuten kopioryhmät tai peilaukset, ja kuudennen ryhmän (quarantine) piirteet, kuten viisteet ja pyöritykset ovat kappaletta viimeisteleviä. (Camba et al. 2016, s. 21)

Kuvissa 6 ja 7 on esitetty yksinkertainen esimerkkikappale ja kappaleeseen liittyvät piirrepuut läpikäydyillä mallinnustavoilla toteutettuna. Joustavan mallinnustavan kohdalla tulee huomata, että kaikkia esitettyjä piirryhmiä ei yksinkertaisessa kappaleessa tarvita.



Kuva 6. Komponenttimallinnuksen esimerkkikappale.



Kuva 7. Piirrepuut eri mallinnusstrategioiden mukaan vasemmalta oikealle: lineaarinen, täsmällisten referenssien mukainen ja joustava mallinnusstrategia.

Camba et al. (2016, s. 29) toteavat, että täsmällisten referenssien mukaiselle ja joustavalle mallinnustavalle perustuvat mallit ovat intuitiivisia, muokattavuudeltaan selkeitä ja nopeakäyttöisiä, ja siten myös uudelleenkäytettävyys toteutuu näiden mallinnustapojen myötä tehokkaasti. Konfiguroituvien tuotteiden kohdalla on tärkeää luoda malli siten, että muunneltavat parametrit ovat selkeästi ja mahdollisimman yksinkertaisesti määriteltäviä. Tämä voisi puoltaa myös lineaarisen mallinnustavan käyttöä, mutta toisaalta oikein käytetyt parent/child relaatiot ovat erittäin tehokkaita ja usein tuotteissa halutaan tietynlaisia seurauksia: esimerkiksi kappaleen pituuden muutos kasvattaa myös paksuutta. Lisäksi suunnittelun automatisoinnin kannalta lineaarinen malli on työläs toteuttaa. Koska jokainen piirre on erillinen, eikä mallissa itsessään ole älykkyyttä, täytyy jokainen piirre linkittää suunnitteluautomaattiin.

4.2 Kokoonpanojen mallinnus

Kokoonpanoprosessin suunnittelu (assembly process planning APP) on merkittävä osa tuotesuunnittelua, sillä kokoonpantavuudella on suuri vaikutus tuotteen valmistuskuluihin. APP:hen kuuluu kokoonpanojärjestyksen suunnittelun ohella myös kokoonpanossa tarvittavien kiinnikkeiden ja työkalujen määrittely. Yhdistetty tuotesuunnittelu ja kokoonpanosuunnittelu (design for assembly DFA) onkin merkittävä osa yritysten toimintaa. (Wang et al. 2009, s. 132 s. 138) Edellä esitetty ei niinkään ole mallinnusteknistä asiaa, mutta näitä asioita voidaan huomioida 3D-mallin kokoonpanoa laadittaessa. Hyvin laaditun parametrisen mallin avulla edellä mainittuja asioita voidaan tutkia ja suunnitella ja esimerkiksi kokoonpanojärjestystä varten voidaan luoda mallin avulla räjäytyspiirustuksia. Demoly ja Roth (2017, s. 105) esittävät myös, että DFA ja tuotteen kokoonpano- ja asennusvaiheesta saatu tieto auttaa suunnittelijaa ymmärtämään miten komponenttitasolla tehdyt päätökset saattavat näkyä elinkaaren myöhemmissä vaiheissa.

Tuotteiden kokoonpanoon liittyvää tutkimusta on olemassa erittäin laajasti sekä edellä esitetystä toiminnallisesta näkökulmasta, että geometrisesta näkökulmasta (Camba et al. 2016, s. 19; Demoly & Roth 2017, s. 105) Tässä työssä rajoitutaan tarkastelemaan asiaa geometrisesta ja mallinnusteknisestä näkökulmasta. Yksinkertaisimmillaan kokoonpano voidaan laatia hieman lineaarista komponenttimallinustapaa mukaillen: komponentteja tuodaan kokoonpanoon ja ne paikoitetaan ja orientoidaan luomatta relaatioita muihin komponentteihin. Toisaalta komponentteja voidaan asettaa toisiinsa pinnoista yhtyviksi tai niiden paikka voidaan asettaa toisistaan jollakin parametrilla riippuvaiseksi. Tällainen kokoonpanon rakennustapa toimii mainiosti mutta se ei ole kovin joustava eikä kokoonpanoon kyetä luomaan juurikaan älykkyyttä. Lisäksi yhden komponentin geometrian muutos voi tuottaa ongelmia jos komponentteja on paikoitettu toistensa geometriasta riippuvaiseksi. Kirjallisuudesta löytyy erilaisia formalisoituja menetelmiä kokoonpanomallinnukseen, joista esitellään luurankoelementtipohjainen (skeleton, myös luurankokomponentti) kokoonpanomallinnustapa.

Chen et al. (2012, s. 1034) kuvaavat tuotteiden perinteistä suunnitteluprosessia top-down prosessina ja esittävät tutkimuksessaan kokoonpanon suunnitteluprosessin nimeltään top-down assembly design (TPAD). Tämän prosessin olennaisena osana on luurankoelementti (skeleton, layout skeleton), joka määritellään tuotteen konseptisuunnittelun jälkeen. Aluksi luurankoelementtiin sisällytetään alustavaa muoto- ja arkkitehtuuritietoa. Tämän tiedon pohjalta siirrytään määrittämään alikokoonpanoja ja niiden komponentteja ja niin edelleen samalla luurankoelementtiä päivittäen. (Chen et al. 2012 s. 1034–1035) Mallin suunnittelu alkaa ylätasolta ja jatkuu alempia tasoja

kohden, mistä johtuu nimitys top-down design. Prosessi on rekursiivinen ja suunnittelija joutuu palaamaan alatasolta ylätasolle sillä ylätason täydellinen määrittely heti alkuun voi olla mahdotonta suunnitteluprosessin valmiusasteesta riippuen. Yksi olennainen osa luurankoelementin käytössä on piirteiden periytyvyys ja relaatiot. Kun luurankoelementtiin määritellään lisää detaljitason tietoa, alikokoonpanoja ja komponentteja voidaan linkittää luurankoelementtiin. Periytyvyys voi olla myös vältettävä asia mutta suunnittelija määrittelee mitä tietoa se luurankoelementtiin sisällyttää ja mitä tietoa komponenttien ja luurankoelementin välille linkitetään.

Tällaisen luurankoelementin määrittely liittyy olennaisesti alaluvussa 2.2 käsiteltyyn tuotearkkitehtuuriin. Luurankoelementtiin käytännössä mallinnetaan tuotteen arkkitehtuuri sekä komponentti-, että kokoonpanotasolla. Parametrisen mallin ja konfiguroituvan tuotteen kohdalla tämä tarkoittaa sitä, että luurankoon sisällytetään tietoa, jota tarvitaan komponenttien paikoittamiseen ja tietoa, jonka perusteella konfiguroituvien elementtien parametreja voidaan muunnella. Luurankoelementtiin perustuva kokoonpano on erittäin helposti muokattavissa ja automatisoitavissa, sillä suuri osa muuntelusta tapahtuu mallissa yhden komponentin kautta. Tämä luurankokomponentti (tässä myös luurankoelementti) voidaan ottaa rautalankamallina visuaalisesti esiin kokoonpanon taustalle, mikä helpottaa havaitsemaan mihin tuotteen osa-alueeseen luurankokomponentin mikäkin piirre liittyy. Lisäksi tuotteeseen liittyvä tieto voidaan tehokkaasti sisällyttää yhteen abstraktiin komponenttiin, mikä voi toisaalta olla myös epätoivottua. Haittapuolena luurankokomponentin käytössä on esimerkiksi se, että monimutkaisella tuotteella komponenttiin joudutaan sisällyttämään paljon tietoa. Tällaisessa tapuksessa tietyn piirteiden periytyvyyden jäljittäminen voi olla hankalaa. Lisäksi tietyn luurankoelementin kautta määritellyt komponentit eivät toimi erillään tuhoamatta niiden relaatioita luurankoelementtiin. Monimutkaisen tuotteen parametrien mittava muutos saattaa johtaa epävalidiin, esimerkiksi itseään leikkaavaan geometriaan, jolloin komponentin generointi tai päivittyminen (rebuild) saattaa epäonnistua täysin ja ongelman jäljitys hankaloituu.

Chu et al. (2016, s. 725) tarkastelevat tutkimuksessaan monimutkaisten tuotteiden top-down design (TDD) prosessia, modulaaristen tuotteiden suunnittelua (modular product design MPD) ja luurankoelementtejä. Chu et al. (2016, s. 748) toteavat, että siinä missä TDD ja MPD ovat tärkeitä suunnittelustrategioita monimutkaisille tuotteille, niiden yhdenaikainen käyttö on hankalaa. Tämä johtuu siitä, että modulaarisilla tuotteilla moduulien välillä ei ole riippuvuutta, kun taas luurankoelementteihin perustuvassa mallinnuksessa pyritään ohjaamaan mahdollisimman montaa komponenttia ja parametria samalla elementillä. Ratkaisuna ongelmaan Chu et al. (2016) esittävät

monitasoiset luurankoelementit, joista jokaisella on oma tarkoitus kokoonpanossa. Nämä luurankoelementtityypit ovat paikoituselementti, rajapintaelementti ja komponenttigeometrian sisältävä elementti (Chu et al. 2016, s. 748). Menetelmän etuja ovat esimerkiksi luurankoelementtien vakiointi, piirteiden periytyvyyden yksinkertaistuminen ja periytymisulottuvuuden väheneminen, kokoonpanon kasaaminen luurankoelementtien avulla ja tuotetiedon jakautuminen useammalle elementille. Monitasoisille luurankoelementeille perustuva malli edesauttaa myös komponenttien vaihdettavuutta, mikä on esimerkiksi konfiguroituvien tuotteiden kohdalla tärkeä ominaisuus. (Chu et al. 2016, s. 747)

Kuten komponenttien kohdalla, myös kokoonpanojen kohdalla mallin rakenne on ohjelmistoissa yleensä piirrepuu-, eli historiaperustainen. Kokoonpanoja voidaan (ja selkeyden vuoksi kannattaakin) rakentaa siten, kuin ne esimerkiksi valmistetaan tai asennetaan. Tämä tarkoittaa kokoonpanomallin piirrepuun järjestelyä esimerkiksi kokoonpanojärjestyksen mukaisesti ja komponenttien sijoittelua eri alikokoonpanoihin. Piirustukset perivät piirrepuun järjestyksen ja osaluettelo voidaan asettaa seuraamaan järjestystä.

4.3 Suunnittelun automatisointi

Parametristen 3D-mallien käyttöä suunnittelutyössä voidaan tehostaa suunnittelua automatisoimalla. Suunnittelun automatisointiin liittyvät käsitteet *knowledge-based engineering* (KBE) ja KBE:hen liittyvät tietokoneohjelmistot eli KBE-järjestelmät. La Rocca (2012, s. 161) määrittelee KBE-järjestelmän systeemiksi, joka kykenee tallentamaan ja uudelleenkäyttämään tuotesuunnittelu- ja prosessisuunnittelutietoa. Tavoitteena KBE-järjestelmän käytöllä on La Roccan (2012, s. 161) mukaan tuotekehitykseen kuluvan ajan ja kustannusten vähentäminen, mikä tapahtuu toistuvien ja ei-luovien tehtävien automatisoinnilla, sekä monialaisena suunnittelun optimointina tuotekehityksen eri vaiheissa.

Alaluvussa 3.1 esiteltiin konfigurointitehtävä. Martion (2015, s. 13) mukaan konfiguraattori on tietotekninen järjestelmä, joka suorittaa konfigurointitehtävän. Schäffer et al. (2021, s. 219–220) käsittelevät tutkimuksessaan tietokantapohjaisia suunnittelukonfiguraattoreita (knowledge-based engineering configurator, KBEC) ja toteavat, että konfiguraattorit ovat usein niin sanottuja tuotekonfiguraattoreita. Tuotekonfiguraattori sovittaa asiakasvaatimukset ja olemassa olevat tuotevariantit siten, että alaluvun 3.1 mukainen konfigurointitehtävä toteutuu. Tuotekonfiguraattori ei siis ole täsmälleen suunnittelukonfiguraattori, sillä varsinaista suunnittelutyötä ei tapahdu. Schäffer et al. (2021, s. 220) esittävät, että suunnittelukonfiguraattori eroaa

tuotekonfiguraattorista siten, että siinä missä tuotekonfiguraattorilla valitaan sopiva tuotevariantti olemassa olevan suunnittelutiedon pohjalta, suunnittelukonfiguraattorilla luodaan uusi tuotevariantti.

Tämän työn osana luodaan Excel-pohjainen työkalu, jonka avulla parametrissa 3D CAD-mallia voidaan muunnella ja automatisoida toistuvia ja ei-luovia tehtäviä, joten kyseessä on yksinkertainen KBE-järjestelmä. Tällaiset järjestelmät ovat yksinkertaisinakin tehokkaita, sillä Excel-laskentataulukkoon voidaan tallentaa tuotetietoa ja luoda älykkyyttä esimerkiksi komponenttivalintaan tai -mitoitukseen taulukkolaskentaohjelmien omien mahdollisuuksien rajoissa. Mikäli tiedetään, että jokin komponentti vaatii esimerkiksi tapauskohtaista mitoitusta, voidaan Excel-laskentaan luoda mitoituslaskenta ja linkittää se malliin. Tämä kuitenkin edellyttää, että tuotteen mallinnusvaiheessa tiedetään mitä parametreja KBE-järjestelmällä tullaan muokkaamaan ja vaaditut parametrit voidaan sisällyttää malliin.

Olenainen hyöty, joka 3D CAD-malliin liitettyllä KBE-järjestelmällä voidaan myös saavuttaa, on piirustustuotannon tehostaminen, sillä parametriseen malliin linkitetty valmistus- tai kokoonpanopiirustus muokkautuu automaattisesti mallin geometrian mukaiseksi. KBE-järjestelmä sekä tehostaa toistuvien tehtävien tai komponenttivalintaan perustuvien suunnittelutehtävien tekoa, mutta myös vähentää virheitä näissä prosessin osa-alueissa, sillä järjestelmä voidaan koodata siten, että järjestelmän käyttöliittymässä ei voida tehdä virheellisiä valintoja.

Alaluvussa 3.2 esiteltiin neljä tapaa varioida konfiguroituvaa tuotetta. Esitetyt variointitavat CAD-mallin kohdalla voitaisiin esittää seuraavasti: komponenttien lukumäärän variointi, komponentin vaihtaminen/lisääminen/poistaminen, komponenttien välisten suhteiden variointi ja komponentin parametrien variointi. Parametrisen CAD-mallin ja KBE-järjestelmän avulla voidaan toteuttaa kaikkia esitettyjä variointitapoja. KBE-järjestelmän luomista ja sen avulla suoritettavia mahdollisia operaatioita käsitellään tarkemmin luvussa 5. Tässä kohtaa todetaan yleisesti, että monimutkaisempien KBE-järjestelmien, KBC-järjestelmien ja tuotekonfiguraattoreiden kehitykselle ja ylläpidolle löytyy kirjallisuudesta useita formalisoituja menetelmiä, joita ei tässä työssä tarkemmin esitellä (Demoly & Roth 2017, s. 105; Schäffer et al. 2021, s. 219–220).

4.4 Parametrinen malli ja tuotekehitys

Ulrich ja Eppinger (2012, s. 12) määrittelevät tuotekehitysprosessin kuvauksena toimista, joiden avulla yritys luo, suunnittelee ja kaupallistaa tuotteen. Yleisluontoisia kuvauksia tuotekehitysprosessin kulusta ja toimien sisällöstä on kirjallisuudessa useita,

joista Pahlin ja Beitzin (1996) prosessia sivutaan myöhemmin tässä aluvuussa. Ulrich ja Eppinger (2012, s. 14) esittävät kuusivaiheisen kehitysprosessin, jonka vaiheet ovat: suunnittelu (planning), konseptin kehitys (concept development), systeemitason suunnittelu (system-level design), detaljisuunnittelu (detail design), testaus ja hienosäätö (testing and refinement) ja tuotannon ylösajo (production ramp-up). Jokaiseen vaiheeseen liittyy osatoimintoja markkinoinnin, suunnittelun ja tuotannon osalta. (Ulrich & Eppinger 2012, s. 14)

Yin & Ma (2012, s. 542) käsittelevät tutkimuksessaan parametrinen piirteiden kartoitusta ja käyttöä mallinnuksessa osana tuotekehitysprosessia. Case-studynä tutkimuksessa tarkastellaan kaksiportaista vaihdelaatikkoa. Bottom-up lähestymistapa vaihdelaatikon suunnittelussa lähtisi hammaspyörien ja akselien mitoitukselta kohti vaihdelaatikon rungon suunnittelua siten, että aiempi suunnittelu toimii rajoitteena seuraaville suunnitteluaskelille. Lähestymistavan ongelmana on se, että muutettaessa jotain vaihdelaatikon toiminnallista parametria, on suunnittelussaprosessissa palattava alkuun ja prosessi on hidas ja työläs. (Yin & Ma 2012, s. 542)

Ehdotuksena ongelman ratkaisuun Yin & Ma (2012, s. 542–547) esittävät parametrinen piirteiden kartoitusprosessin ja piirteiden jaon neljään luokkaan top-down lähtökohdasta. Parametrinen piirteiden kartoituksessa tavoitteena on tunnistaa tuotteen toiminnan tai asiakasvaatimusten kannalta merkittäviä piirteitä, jotka vaikuttavat tuotteen suunnitteluun (Yin & Ma 2012, s. 544). Vaihdelaatikon tapauksessa nämä voivat olla esimerkiksi case-studyssä esitetyt käytettävään akseliin liitettävän kuljetushihnan hihnapyörän halkaisija, hihnan kuljetusnopeus ja kuljetushihnan vetovoima. Näistä mitoittavista suunnitteluparametreista johdetaan kaksiportaisen vaihdelaatikon mitoitus tehtävänä muita suunnitteluparametreja.

Parametrien kartoituksessa laaditaan kaavio, josta käy ilmi ylätasoon mitoittavat piirteet ja mihin alatasoon piirteisiin, esimerkiksi käytettävän ja käyttävän akselin pyörimisnopeuksiin, ne vaikuttavat. Edelleen alatasoon piirteille voidaan laatia omia parametrikartoituksia ja niiden vaikutusketjuja. Esimerkkinä Yin & Ma (2012, s. 546) esittävät käyttävän akselin kaavion, jossa alatasoon piirteinä ovat muun muassa akseliväli ja kyseisen akselin hammaspyörän halkaisija, joka edelleen vaikuttaa rungon geometriaan kyseisellä kohtaa. Tätä lähestymistapaa voidaan käyttää tehokkaasti hyväksi KBE-järjestelmän luomisessa. KBE-järjestelmään voidaan luoda ylätasoon parametrikartoituksen mukaan hammasvaihteen laskentaa, joka määrittelee alatasoon parametreja ja piirteitä. Alatasoon parametrikartoituksessa esitetyt piirteet (muun muassa akseliväli, hammaspyörän koko) ovat selkeästi mallinnuksessa käytettäviä parametreja, jotka voidaan KBE-järjestelmän avulla sitoa 3D CAD-malliin.

Eri kartoitustasojen tunnistamisessa ja mallin havainnollistamisessa apuna on esitetty piirteiden jako neljään luokkaan, jotka ovat ylemmältä tasolta alemmalle lueteltuna: konseptitason piirteet (conceptual feature), kokoonpanotason piirteet (assembly feature), komponenttien peruspiirteet (component basic feature) ja komponenttien detaljipiirteet (component detail feature) (Yin & Ma 2012, s. 547). Konseptitason piirteet ovat tuotteen toiminnan kannalta tai asiakasvaatimusten mukaisia tärkeitä ja usein mitoittavia piirteitä, jotka määrittelevät myöhempää suunnittelutyötä. Kokoonpanotason piirteisiin kuuluvat konseptitasolta johtuvat kokoonpanon kannalta merkittävät piirteet, kuten vaihdelaatikkoesimerkissä esitetty akseliväli. Näillä piirteillä on suuri merkitys tuotteen päägeometriaan ja -mittoihin, sekä alemman tason komponenttien piirteisiin. Komponenttien peruspiirteisiin liittyvät parametrit määrittelevät komponenttien geometriaa ja mittoja. Nämä piirteet ja niihin liittyvät parametrit ovat määräytyvät jollain tapaa kokoonpanotason piirteistä. Tällaisia ovat esimerkiksi vaihdelaatikon tapauksessa runkokomponentin geometria sekä esimerkiksi akselivälin mukaan määräytyvät laakeripesät. Tämän tason piirteitä voidaan muunnella esimerkiksi KBE-järjestelmään linkitettyllä luurankoelementillä. Viimeiseen tasoon kuuluvat komponenttien detaljipiirteet. Tällaisia piirteitä ovat esimerkiksi valmistuksen kannalta tarpeelliset kiinnityspiirteet, kokoonpanoon liittyvät kiinnityspiirteet, kuten kohdistustapit tai pultinreiät sekä esimerkiksi valukappaleiden pyöritykset. (Yin & Ma 2012, s. 547) Kokoonpanopiirteet ja komponenttien peruspiirteet ovat käytännössä piirteitä, joita parametrisessa mallissa päädytään automatisoimaan tai mallintamaan helposti muunneltaviksi.

Edellä esitetty menetelmä liittyy selkeästi kokoonpanojen mallinnustapaan mutta se on joustavuutensa takia hyödyllinen myös tuotekehityksessä. Kun kokoonpano rakennetaan top-down lähestymistavan mukaan ja tuotteeseen liittyviä parametreja luokitellaan ja kartoitetaan, saadaan hyvä käsitys siitä mihin mikäkin parametri tuotteessa vaikuttaa. Lisäksi tuotteen muuntelu on helppoa ja muutokset periytyvät alemman tason komponentteihin hyvin rakennetussa mallissa. Tämän menetelmän mukainen tuotekehitysprosessi ja tuotteen rakenteen iterointi voi johtaa myös siihen, että tuotteesta tunnistetaan konfiguroituvan tuotteen tuoterakenteen mukaisia elementtejä. Edelleen voidaan suorittaa komponenttien standardointia tai todeta mitkä komponentit ovat konfiguroituvia, osittain konfiguroituvia tai projektikohtaisia.

Pahlin ja Beitzin (1996) esittämä nelivaiheinen tuotekehitysprosessi sisältää seuraavat vaiheet: suunnittelutehtävän asettelu ja selvennys, konseptitason suunnittelu, sovellusmuodon suunnittelu ja detaljisuunnittelu (Pahl & Beitz 1996, Pakkanen 2015, s. 99 mukaan). Edellä esitettyyn tutkimukseen liittyvässä parametristen piirteiden luokittelussa voidaan nähdä yhtenevyyttä Pahlin ja Beitzin tuotekehitysprosessin

kanssa: ensin selvitetään tuotteen piirteet konseptitasolla, sitten kokoonpano- ja komponenttitasolla ja lopuksi detaljitasolla. Rigger et al. (2018) käsittelevät tutkimuksessaan suunnitteluprosessiin liittyvien tehtävien kategorisointia suunnittelun automatisointimahdollisuuksien kannalta. Rigger et al. (2018, s. 148–149) jakavat prosessin kuuteentoista eri tehtävään, jotka esitetään myös suhteessa Pahlin ja Beitzin mukaisiin konseptitason, sovellusmuodon ja detaljitason vaiheisiin.

Rigger et al. (2018) tarkastelevat tutkimuksessaan kuinka KBE:hen ja CDS:ään (Computational design synthesis) liittyvää tutkimusta voidaan yhdistää tuotekehitysprosessissa ja tuotesuunnittelun automatisoinnissa. Geometriseen esitystapaan, parametriseen mallinnukseen ja kehittyneisiin CAD-järjestelmiin pohjautuvien KBE-järjestelmien käyttö teollisuudessa on usein vahvasti yhteydessä tuotteen valmistusnäkökulmaan ja suunnitteluprosessin loppuvaiheisiin. KBE-järjestelmät soveltuvat tuotteen sovellusmuodon kehitys- ja detaljisuunnitteluvaiheisiin, kun taas CDS-järjestelmiä hyödynnetään pääosin tuotesuunnittelun alku- ja konseptivaiheen tehtävissä. (Rigger et al. 2018, s. 150–151)

Rigger et al. (2018, s. 148–149) esittävät, että CAx (CAD, CAE, CAM etc.) on hyödyllinen sovellusmuodon kehityksen alkuvaiheissa, jolloin suunnittelutehtävä siirtyy konseptitason ei-tilamuotoisesta ja toiminnallisuuteen keskittyvästä suunnittelusta fyysisen tuotteen suunnitteluun. Esimerkiksi parametrinen 3D CAD-malli otetaan käyttöön ja tuotearkkitehtuuri muokataan konseptivaiheen suunnittelutiedon mukaiseksi komponenttitasolta lähtien. 3D-mallia voidaan hyödyntää myös erilaisissa analyyseissä ja tarkasteluissa, esimerkiksi lujuus- tai virtaustarkasteluissa. Mallia yleensä kevennetään näitä tarkasteluja varten, sillä monimutkaisilla tuotteilla tarkastelut ovat vaativia ja laskennat vievät aikaa ja ovat sitä myöden kalliita. Mallin kevennys tarkoittaa käytännössä geometrian yksinkertaistusta ja laskentaan vaikuttamattomien piirteiden taa komponenttien tilapäistä poistoa. Yleisiä tarkasteluja jossa malleja käytetään, ovat esimerkiksi lujuustarkastelut FEM-menetelmällä (Finite element method) tai CFD-analyysit (Computational fluid dynamics), jotka liittyvät nesteiden tai kaasujen virtauksiin. Suunnittelutehtävän loppuvaiheessa ja sen jälkeen CAD-mallia voidaan käyttää piirustustuotantoon, joista tyypillisesti laadittavia ovat valmistus- ja kokoonpanopiirustukset, standardointiin tai tuotealustojen jatkosuunnitteluun. (Rigger et al. 2018, s. 148–149)

Pakkanen (2015, s. 114) esittää, että Ojan (2010) mukaan suurin osa yrityksissä tehdystä tuotekehitystyöstä kohdistuu olemassaoleviin tuotteisiin, eikä niinkään täysin uusien tuotteiden kehittämiseen. Täysin uuden tuotteen kehittäminen on yritykselle kallista ja kehitysprosessin onnistuminen ja tuotteen saavuttama kysyntä on epävarmaa.

Lisäksi asiakkaat esittävät vaatimuksensa tuotteille usein olemassaolevien tuotteiden kautta. (Oja 2010, Pakkanen 2015, s. 114 mukaan) Parametrinen CAD-malli on tällaisiin tilanteisiin erinomainen työkalu. Kuten alaluvussa 4.1 todettiin, komponenttien ja kokoonpanojen mallinnuksessa on tärkeää luoda malleja siten, että niitä voidaan muunnella ja uudelleenkäyttää tehokkaasti, esimerkiksi juuri tuotekehitystyön vuoksi, oli kyseessä sitten uuden tai olemassa olevan tuotteen kehitys. La Rocca (2012, s. 161) esittää, että KBE-järjestelmien ja automatisoinnin tuella tuotekehitystä ja optimointia voidaan tehdä suunnitteluprosessin läpi monialaisesti.

5. PARAMETRISEN MALLIN LUONTI

Tässä luvussa kuvataan esimerkin avulla konfiguroituvan tuotteen parametrissa 3D-mallinnusta. Malli yhdistetään yksinkertaiseen Excel-pohjaiseen KBE-järjestelmään, jolla perusmallia voidaan muunnella. 3D-mallinnus toteutetaan Dassault Systemes'in Solidworks CAD-ohjelmalla ja KBE-järjestelmän luomisessa käytetään CadWorks Oy:n AutomateWorks ohjelmaa.

Alaluvussa 3.2 esiteltiin konfiguroituvan tuotteen tuoterakenne Juutin ja Lehtosen (2006) mukaan. Mallinnuksen peruslähtökohtaan tämä jako ei luo eroa: mallinnuksessa kannattaa aina pyrkiä selkeisiin ja hyvin parametrisoituihin rakenteisiin, jotka edesauttavat mallin uudelleenkäyttöä ja helppoa muokattavuutta alalukujen 4.1 ja 4.2 mukaan. Konfiguroituvan tuotteen tuoterakenteeseen kuuluvat kuvan 4 mukaiset elementit: standardi-, projektikohtainen, konfiguroituva ja osittain konfiguroituva elementti.

Standardiosa on tuotteessa tai tuotteiden välillä uudelleenkäytettävä komponentti (Juuti & Lehtonen 2006, s. 269). Standardiosiin voidaan kuitenkin joutua tekemään revisioita ja tällöin on tärkeää, että muutoksenteke on helppoa, eikä se johda muutoksiin, joita ei haluta tai huomata. Yrityksissä on usein olemassa erillisiä komponenttikirjastoja, joista standardikomponentteja tai komponenttiaihiota otetaan projektikohtaiseen käyttöön. Esimerkiksi mallikirjaston standardikomponentin rajapintaan vaikuttavat muutokset saattavat luoda ongelmia, sillä standardikomponenttiin tehty muutos periytyy kaikkiin malleihin, joissa standardikomponenttia on käytetty. Tällöin täytyy varmistua siitä, että komponenttiin tehdyt muutokset ovat sellaisia, että ne voidaan hyväksyä. Rajapintojen huomiointi mallinnuksessa koskee luonnollisesti kaikkia komponenttityyppejä eikä pelkästään standardikomponentteja. Rajapintoja määriteltessä komponenttiin voidaan luoda erillisiä apugeometrioita tai komponentti voidaan mallintaa omaan avaruuteensa siten, että kappaleen päätasot liittyvät rajapintoihin. Tällä tavoin rajapintojen käsittely selkeytyy.

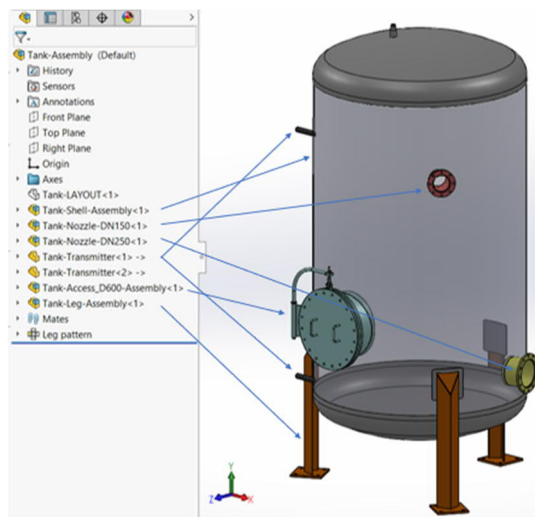
Projektikohtaiset tuotteet suunnitellaan yhteen tiettyyn tarpeeseen. Projektikohtaiset tuotteet saattavat usein olla mallinnuksen näkökulmasta vaikeimmin uudelleenkäytettäviksi mallinnettavia, eikä niitä määritelmän mukaan uudelleenkäytettävyyden näkökulmasta suunnitella. (Juuti & Lehtonen 2006, s. 269) On kuitenkin mahdollista, että komponentti todetaan myöhemmin käyttökelpoiseksi muissakin kohteissa, ja kuten alaluvussa 4.4 todettiin, tapahtuu suuri osa

tuotekehityksestä olemassa olevien tuotteiden pohjalta. Tästäkin syystä mallinnuksessa kannattaa pyrkiä uudelleenkäytettävyyteen, vaikka lähtökohta ei sitä vaatisi. Hankalaksi mallinnuksen uudelleenkäytettävyyden näkökulmasta tekee se, että suunnittelussa saattaa olla kiire tai mallinnusta aloitettaessa tuotteen määrittely ei ole vielä täydellinen. Tällöin mallista saattaa helposti syntyä pirstaleinen kokonaisuus.

KBE-järjestelmä on hyvä työkalu erityisesti konfiguroituville ja osittain konfiguroituville tuotteille sillä toistuvat toiminnot, kuten komponenttivalinnat voidaan suorittaa nopeasti ja virheettömästi (edellyttäen että KBE-järjestelmän säännöt ovat virheettömät). Konfiguroituvissa tuotteissa muunneltavuus voidaan toteuttaa standardikomponenttien käytöllä, komponenttivaihdolla tai parametrisuudella siten, että uutta suunnittelutyötä ei tehdä. Uudelleenkäyttö mahdollistaa yhtenevyyden tuotteiden välillä. Osittain konfiguroituvien tuotteiden kohdalla tuotteessa joudutaan tekemään projektikohtaista suunnittelua esimerkiksi projektikohtaisen elementin takia (Juuti & Lehtonen, 2006, s. 269). Kuten todettua, muunneltavuutta mallinnuksen näkökulmasta voidaan tehostaa KBE-järjestelmillä ja esimerkiksi luurankopohjaisten elementtien avulla. Mikäli luurankoelementtiin syntyy suuri määrä parametreja, tulee miettiä onko selkeyden kannalta järkevämpi jakaa mallia useampaan eri luurankoon esimerkiksi siten, että mallissa on yksi luurankoelementti toiminnallista tai geometriska kokonaisuutta kohden.

5.1 Säiliön parametrinen malli

Tässä työssä esimerkkituotteena on kuvitteellinen säiliö, johon viitataan jatkossa sanalla säiliö. Mallinnettu säiliö on esitetty kuvassa 8.

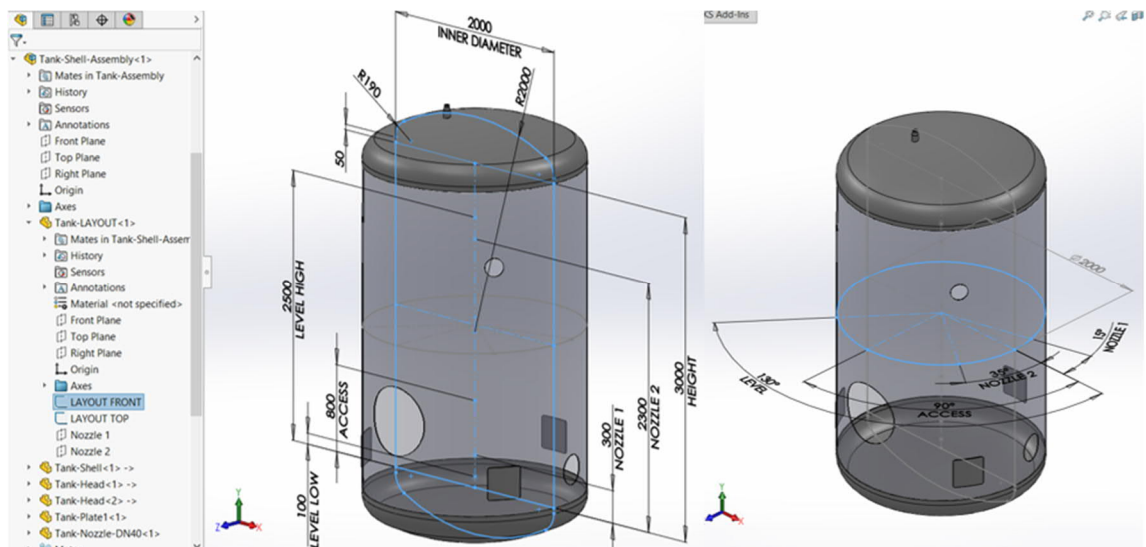


Kuva 8. Säiliö ja sen pääkomponentit.

Säiliö koostuu vaipasta ja sen päädyistä, liityntäyhteistä, kulkuluukusta ja tukijaloista. Mallin rakentamisessa komponentti- ja kokoonpanojako on tehty näihin

osakokonaisuuksiin ja tämä ilmentää käytettyä jakologiikkaa. Alaluvussa 3.3 esitetyistä jakotavoista lähimmät vastaavat todetaan olevan BBB (Big building blocks), FBE (Frame-like base element) tai FE (Function-based elements). Säiliön jakologiikka perustuu oletuksille siitä, mitkä elementit vaativat muuntelutarvetta asiakasvaatimusten mukaan, mitkä ovat uudelleenkäytettäviä tai standardielementtejä ja minkälaisissa kokonaisuuksissa säiliö valmistetaan. Vaippaosaa päätyineen voidaan pitää FBE-tyyppisenä yksilöllisenä peruselementtinä, johon muita komponentteja on lisätty tarpeen mukaan. Toisaalta kukin elementistä on olemassa jotain toiminnallisuutta varten (FE) ja edelleen kukin osa on selvästi erillinen elementtinsä (BBB). Komponentit, joista säiliö koostuu, sisältävät osittain konfiguroituvan tuoterakenteen elementtejä. Esimerkiksi kulkuluukku on yrityksen sisällä standardoitu komponentti, jonka paikkaa voidaan asiakastarpeiden mukaan muuttaa. Yhteet ovat konfiguroituvia tuotteita, joissa kokoa ja pituutta muutetaan asiakastarpeiden mukaan ja liityntälaippa on kansainvälisten standardien mukainen.

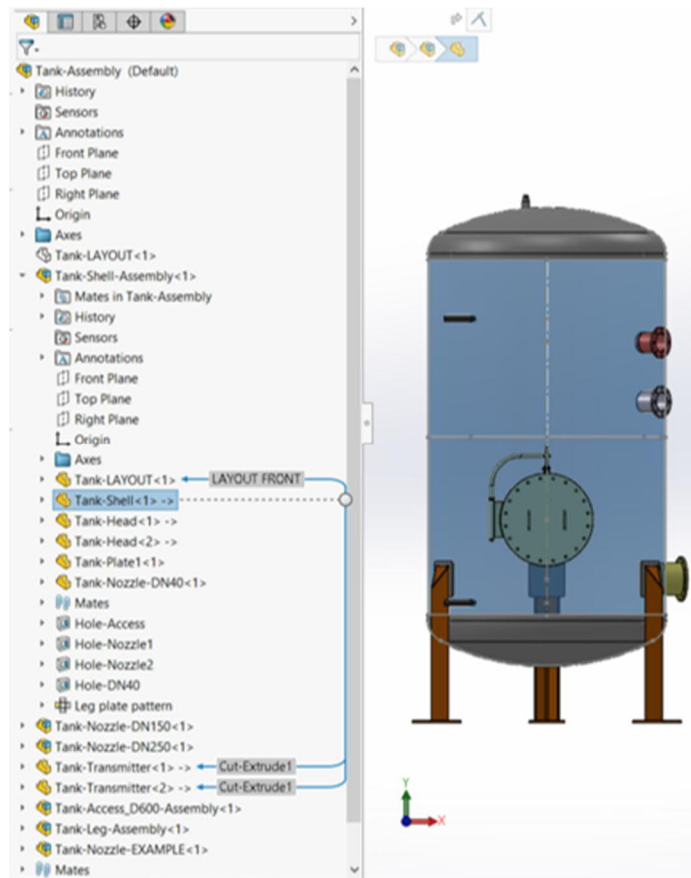
Säiliön sisäiset rajapinnat ja säiliön arkkitehtuuri sisältyvät pääosin erilliseen luurankokomponenttiin (Tank-LAYOUT). Komponentti sisältää säiliön päämitat ja komponenttien sijoittelun kahdessa päätasoon laaditussa luurankosketsissä (LAYOUT FRONT, LAYOUT TOP). Halutut mitat linkitetään KBE-järjestelmään, johon luodaan logiikka, jolla perusmallia muunnellaan. Kuvassa 9 on esitetty luurankokomponentin sisältämä säiliön päämitoitus kahdessa päätasossa.



Kuva 9. Säiliön layout-komponentin kaksi päämittatasoa, vasemmalla LAYOUT FRONT, oikealla LAYOUT TOP.

Luurankokomponentti sisältyy kuvan 10 mukaisesti säiliön pääkokoonpanon lisäksi kaikkiin alikokoonpanoihin, joiden mittatietoja halutaan KBE-järjestelmällä muunnella. Tämä johtuu siitä, että alikokoonpanon komponenttien mitat periytyvät

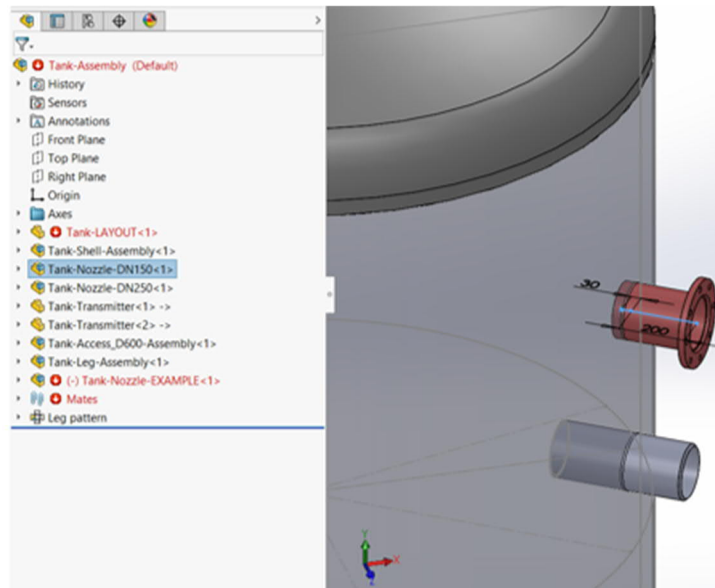
luurankoelementistä (parent/child -relaatio) ja pääkokoontanosta erilleen otettu alikokoontanpano joka ei sisällä luurankoelementtiä, ei ole täysin määritelty. Tämä voi aiheuttaa ongelmia mallin päivittämisessä (rebuild).



Kuva 10. Pääkokoontanon piirrepuu ja luurankoelementin käyttö kokoonpanoissa.

Kuvassa 10 on näytetty vaippaosan (Tank-Shell) periytyvyys luurankoelementtiin Solidworks:n omalla relaatioiden visualisointityökalulla. Mikäli alikokoontanpano (Tank-Shell-Assembly) ei sisältäisi luurankoelementtiä ja se otettaisiin erilleen pääkokoontanpanosta esimerkiksi valmistuspiirustuksen tekoa varten, ei voitaisi olla varmoja piirustuksen ajantasaisuudesta. Tank-Shell alikokoontanpanon ja piirustuksen avaaminen mallinnusohjelmalla ei avaisi luurankoelementtiä ja luurankoelementistä periyvät relaatiot eivät kykenisi päivittymään.

Kuvassa 11 on esimerkki muuntelun kannalta heikosta komponenttipaikoituksesta ja piirteiden mallinnuksesta. Komponenttien ja alikokoontanpanojen mallinnuksessa tulee pyrkiä siihen, että mahdolliset geometriamuutokset tapahtuvat hallitusti ja että ne eivät aiheuta päivitysongelmia malliin.



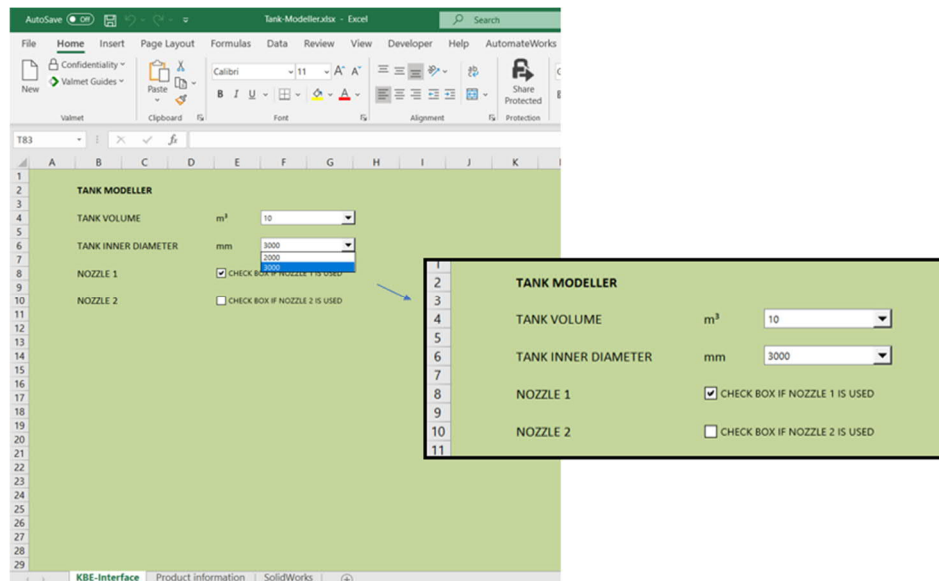
Kuva 11. Esimerkki mallinnus- ja paikoitusstrategioista.

Esimerkin vuoksi kuvitellaan tilanne, jossa yksi määriteltävä rajapinta on yhteen liityntäpinnan etäisyys säiliön vaippapinnasta ja liityntän tyyppinä on joko laippa- tai hitsiliitos. Kuvassa 11 on ylemmän yhteen mallinnus toteutettu siten, että komponentti paikottuu apugeometriasta (esimerkiksi piste tai taso) säiliön vaippapintaan, josta yhteen mittaa sisä- ja ulkosuuntaan nähden määritellään omalla parametrilla (30 mm ja 200 mm). Alemman yhteen kohdalla paikoitus on tehty mittarelaatiolla yhteen ulkopäädystä vaippapintaan. Tällöin yhteen mittaa muutettaessa tapahtuu muutos epäedulliseen suuntaan (tässä tapauksessa säiliön sisälle). Lisäksi yhteen päähän mallinnettu hitsausviestepiirre tuhoaa geometrian, josta yhteen paikoitus on tehty, ja malliin syntyy päivitysongelma. Komponenttien paikoituksessa tulisi siis suosia apugeometrioita ja komponentteja mallinnettaessa tulisi pohtia miten komponenttia käytetään kokoonpanoissa ja onko sillä vaikutusta mallinnustekniikkaan.

Luurankoelementin avulla säiliömallissa paikottuu eri komponenttien lisäksi myös niihin liittyviä piirteitä, kuten vaipassa olevia yhdereikiä. Säiliörakenteen sisäiset rajapinnat ovat käytännössä alaluvussa 3.3 esitettyä B-tyyppiä. Esimerkiksi yhteiden ja tukijalkojen kiinnitys vaippaan on huomioitava mutta ne eivät käytännössä vaadi suurta suunnittelutyötä. Vaativampana A-tyypin rajapintana voitaisiin pitää pinnankorkeuden mittaukseen käytettäviä yhteitä. Säiliön mekaaninen suunnittelija ei välttämättä vastaa instrumentoinnista tai instrumentointi saatetaan hankkia yrityksen ulkopuolelta. Tällöin on varmistuttava siitä, että mittausinstrumentit sopivat säiliön yhteisiin ja selvitettävä, millaisia vaatimuksia instrumenteilla on esimerkiksi kiinnityksen tai käyttöolosuhteiden suhteen.

5.2 Säiliön suunnittelun automatisointi

Tässä työssä KBE-järjestelmän laatimisessa käytetään AutomateWorks ohjelmaa. AutomateWorks luo linkin SolidWorks-mallin ja erityisen KBE-järjestelmäksi muokatun Excel-tiedoston välille. Excel-tiedostoon sisällytetään käyttöliittymä-, tuotetieto- ja komentosisivu, joiden mukaan muuntelu tapahtuu. Kuvissa 12, 13 ja 14 on esitettyä KBE-järjestelmän käyttöliittymäsivu, tuotetietosisivu sekä komentosisivu ja Automateworks:n linkitystyökalu, jolla SolidWorks-mallin parametreja linkitetään Exceliin.



Kuva 12. Säiliön KBE-järjestelmän käyttöliittymäsivu.

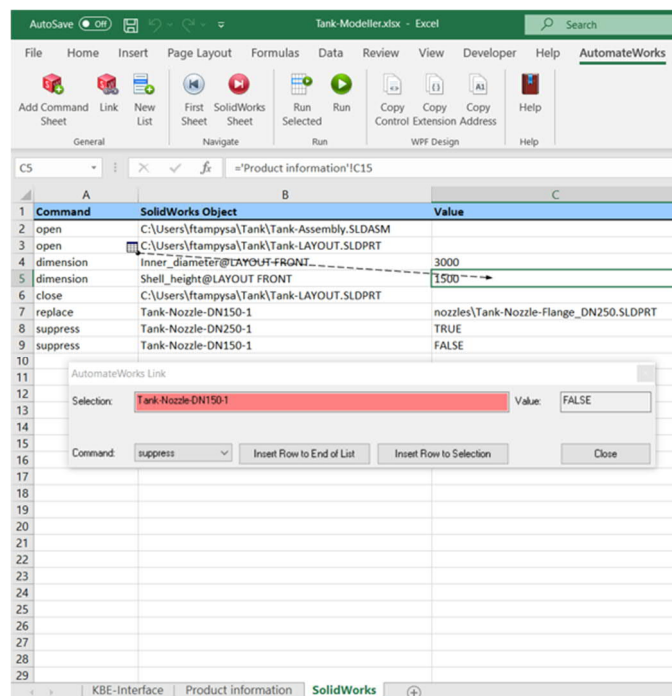
Käyttöliittymäsivulla käyttäjä valitsee muun muassa säiliön tilavuuden ja sisähalkaisijan.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1											
2											
3											
4			VOLUME	10	m ³						
5			Alternatives	10	1	SHOWN IN SELECTION IF THIS OPTION SELECTED					
6				15	2	SHOWN IN SELECTION IF THIS OPTION SELECTED					
7				20	3	SHOWN IN SELECTION IF THIS OPTION SELECTED					
8			Selection	1		SELECTED OPTION BY USER AT CONFIGURATOR TAB					
9			INNER DIAMETER	3000	mm						
10			Alternatives	2000	1	SHOWN IN SELECTION IF THIS OPTION SELECTED					
11				3000	2	SHOWN IN SELECTION IF THIS OPTION SELECTED					
12			Selection	2		SELECTED OPTION BY USER AT CONFIGURATOR TAB					
13											
14			HEIGHT	1500	mm						
15						DETERMINED BY TABLE BELOW					
16											
17											
18			PREDEFINED HEIGHT								
19			OPTIONS				2000	3000			
20				10		3000	1500				
21			VOLUME	15		4500	2000				
22				20		6500	2200				
23											
24			NOZZLE 1	TRUE		INPUT FROM USER					
25			NOZZLE 2	FALSE		INPUT FROM USER					
26											
27											
28											
29											

Kuva 13. Säiliön KBE-järjestelmän tuotetietosisivu ja säiliön korkeuden päättely käyttäjän valintojen mukaan.

KBE-järjestelmän tuotetietosivu sisältää vähintään tuotetiedon, jota tarvitaan mallin suunnittelussa automatisoidussa muuntelussa. Tuotetietosivulle voidaan kuitenkin tarpeen mukaan sisällyttää mitä vain tietoa, mutta on tapauskohtaista kannattaako niin tehdä esimerkiksi järjestelmän selkeyden tai tuotetekniikan väärinkäytösten kannalta. Tässä työssä KBE-järjestelmä laaditaan Excel-tiedoston pohjalle ja siihen voidaan luoda tarvittavaa logiikkaa ohjelman omien rajojen mukaan yksinkertaisesta *if, then* -ehtolauseesta aina mitä monimutkaisimpiin päättelytyyppeihin. Tuotetietosivua kannattaa selkeyttää selitteillä, jotta muutkin kuin järjestelmän laatija ymmärtävät miten järjestelmä toimii ja järjestelmän ylläpito ja kehitys helpottuu. Alaluvussa 4.4 esiteltiin kaksiportaisen vaihdelaatikon case-studyä. Tässä kohtaa todetaan, että Excel-pohjaiseen KBE-järjestelmään voitaisiin laatia kyseisentyypin mitoituslaskenta ja sen mukainen perusmallin ohjaus.

Säiliöesimerkissä yritys valmistaa kolmea eri säiliökokoja (10, 15 ja 20 m³) ja valmistusteknisistä syistä sisähalkaisijoita on valittavana kahta kokoa (2000 ja 3000 mm). Nämä mahdollisuudet ovat taulukoituna tuotetietosivulla ja linkitettyinä käyttöliittymäsivun alavetovalikoihin. Käyttäjän valinta palauttaa tuotetietosivulle valinnan indeksit, joiden avulla tuotetietosivulla oleva logiikka valitsee ennalta määrätystä korkeusvaihtoehdoista mitan, joilla annetut reunaehdot toteutuvat.



Kuva 14. Säiliön KBE-järjestelmän komentosivu ja linkitystyökalu.

Komentovälilehdelle luodaan vaaditut komentorivit esimerkiksi mittojen muokkaukselle, komponenttivaihdolle, komponenttien määrän muutoksille, konfiguraatiovaihdolle,

piirteiden aktivoinnille tai materiaalin määrittelykselle. Komentovälilehdelle voidaan luoda lisää logiikkaa tai sinne voidaan linkittää suoraan esimerkiksi mittatietoa tuotetietovälilehdeltä.

Martion (2015, s. 29) mukaan tuotekonfiguraattorin käyttöliittymässä voidaan käyttäjä ottaa huomioon parametrien syöttövaiheessa. Sama pätee selvästi myös KBE-järjestelmiin. Pelkistetyimmässä tapauksessa parametrit valitaan järjestelmään esimerkiksi alavetovalikosta, kuten tässä työssä. Kehittyneemmässä käyttöliittymässä järjestelmä on interaktiivinen ja virheellisen parametrijärjestelmän valinta palauttaa virheilmoituksen. Edelleen kehittyneemmässä versiossa järjestelmä mukautuu valintojen mukaan siten, että tietty valinta poistaa seuraavan parametrivalinnan kohdalta mahdottomat valinnat näkyvistä. (Martio 2015, s. 29)

3D-mallinnuksen ja automatisoinnin olennainen suunnittelutyötä tehostava ominaisuus on piirustusten ja osaluetteloiden generointi mallin pohjalta. Piirustusohjelmat linkittyvät suoraan 3D-malliin ja mallia muutettaessa myös piirustukseen suoraan mallista periytyvä geometria päivittyy. Yrityksellä voi olla käytössään komponenttikirjastoja piirustuksineen ja esimerkiksi säiliön tapauksessa suunnittelutehtävän lopputuloksena saataisiin valmistus ja kokoonpanopiirustukset sekä vakiokirjastokomponenteista, että konfiguroiduista projektikohtaisista komponenteista.

KBE-järjestelmät voivat olla myös hyvin pitkälle vietyjä järjestelmiä, jotka suorittavat laskentaa, kuten vaihdelaatikkoesimerkki ja tässä työssä läpikäyty asia osoittaa. Alaluvussa 4.3 esitettiin La Roccan (2012, s. 161) määritelmä KBE-järjestelmästä, jonka mukaan järjestelmä mahdollistaa tuotekehitykseen kuluvan ajan vähenemisen. Suunnittelun tueksi voidaan laatia järjestelmä, joka suorittaa mitoituslaskennan ja muokkaa perusmallin laskennan mukaiseksi. Mallia voidaan edelleen käyttää esimerkiksi FEM-laskentaan. KBE-järjestelmää voidaan käyttää myös portaattomiin parametrimuutoksiin suoraan komentovälilehdelle esimerkiksi tuotekehitystyötä tehdessä. Monimutkaisilla tuotteilla voi olla hyödyllistä tutkia 3D-mallin avulla millaisiin tuloksiin mielivaltaisilla parametrimuutoksilla päästään.

6. PÄÄTELMÄT

Parametrinen CAD-mallinnus on nykyjärjestelmillä suhteellisen helppoa ja yritykset käyttävät laajasti erilaisia CAD-mallinnusohjelmia. Jotta mallinnus ja mallien käyttö olisi mahdollisimman tehokasta, on mallien luomisessa syytä panostaa hyväksi havaittuihin strategioihin, joita tässä työssä esiteltiin. CAD-mallien uudelleenkäytettävyys ja muunneltavuus ovat erittäin tärkeitä ominaisuuksia suunnittelun ja tuotekehityksen tehokkuuden kannalta ja ne voidaan saavuttaa esitetyillä strategioilla.

Konfiguroituihin tuotteisiin liittyvien tuoterakenne-elementtien kohdalla muunneltavuus ja uudelleenkäyttö ovat työssä käsiteltynä eri näkökulmasta. Muunneltavuus ja uudelleenkäyttö liittyvät konfiguroituvan tuotteen tuoterakenteeseen ja tuoterperheen eri varianttien luomiseen. Eri varianttien luominen tapahtuu esimerkiksi yksittäisten komponenttien muuntelulla ennaltamääritellyin ehdoin tai jonkin komponentin uudelleenkäytöllä tuoterperheen jokaisessa tuotevariantissa. Uudelleenkäyttö liittyy myös suunnittelutiedon uudelleenkäyttöön projektien välillä. Mallinnuksen näkökulmasta konfiguroituvan tuotteen muuntelu voidaan toteuttaa esimerkiksi varioimalla kappaleen dimensioita ennaltamäärätyissä rajoissa. Konfiguroituvien tuotteiden suunnittelua, käyttöä ja suunnittelun automatisointia voidaan edesauttaa yksinkertaisilla KBE-järjestelmillä. KBE-järjestelmien avulla voidaan luoda automatiikkaa, jolla tuotteesta luotua perusmallia varioidaan. Variointitapoja konfiguroituvalla tuotteella ovat esimerkiksi komponenttien lukumäärän muuntelu, komponenttityyppien muuntelu tai komponentin ominaisuuksien muuntelu. KBE-järjestelmät toimivat myös hyvin tuotekehityksen tukena.

Tässä työssä käytiin läpi muutamia komponenttien ja kokoonpanojen mallinnukseen liittyviä strategioita. Komponenttimallinnuksen kohdalla todettiin, että parametrisuuden toimivuuden ja sekä mallin selkeyden, että muunneltavuuden kannalta on perusteltua suorittaa mallinnusta tiettyjen periaatteiden mukaisesti. Kaksi käsiteltyä ja suositeltua tapaa ovat täsmällisten referenssien mukainen mallinnus (explicit references modeling) ja joustava mallinnus (resilient modeling). Myös lineaarista (horizontal modeling) mallinnustapaa esiteltiin. Kokoonpanomallinnuksen kohdalla käsiteltiin lähinnä luurankokomponenttipohjaista mallinnustapaa. Läpikäydyn lähdemateriaalin perusteella se on kuitenkin yleisesti ja jo pitkään käytetty mallinnusstrategia ja työn perusteella se voidaan todeta monipuoliseksi, tehokkaaksi ja selkeäksi kokoonpanojen mallinnustavaksi. Luurankokomponenttipohjainen mallinnus toimii myös työssä esitetyn mukaan erinomaisesti suunnittelun automatisointiin käytettävien KBE-järjestelmien

perusmallin pohjana. Komponenttien ja kokoonpanojen mallinnukselle on olemassa monia muitakin lähestymistapoja, joita tässä työssä ei käyty läpi.

Hyväksi havaittujen mallinnusstrategioiden käyttö on suotavaa oli kyseessä sitten vakioitava kirjastomalli tai yksittäisen projektikohtaisen tuotteen mallinnus. Mikäli mallinnusstrategioista poiketaan esimerkiksi kiireessä tai epähuomiossa ja tilanne kertautuu eri käyttäjien muokatessa mallia, saattaa jossain kohtaa esiintyä tilanne, missä suunnittelija ei enää viitsi panostaa mallinnuksen laatuun koska lähtökohta on jo niin heikko. Tällöin uudelleenkäytettävyys vähitellen häviää malleista ja jossain vaiheessa tuotteen mallinnus on aloitettava täysin alusta. Esitetyt mallinnusstrategiat luovat malleihin myös selkeyttä ja ymmärrettävyyttä. Strategiat tukevat mallien käyttöä esimerkiksi tuotekehityksessä ja mallien mahdollinen muokkaus esimerkiksi revisioiden yhteydessä on helpompaa. Konfiguroituvien tuotteiden kohdalla käsiteltiin myös modulaariseen systeemiin liittyviä elementtejä. Näistä rajapintoja, arkkitehtuuria ja jakologiikkaa käytiin läpi mallinnuksen yhteydessä. Erityisesti rajapinnat ja arkkitehtuuri havaittiin kohdiksi, joissa mallinnustavoilla on muunneltavuuden kannalta merkitystä. Komponenttivaihdot ja komponenttien geometrioiden muutokset onnistuvat hyvin, jos rajapintoihin ja arkkitehtuuriin on kiinnitetty mallinnuksessa huomiota.

Luvussa 3 esiteltiin yhtenä uudehkona tuotantomallina ainetta lisäävä valmistus ja massapersonointi, jotka ovat lisääntyneet 3D-tulostusmahdollisuuksien myötä. 3D-tulostukseen liittyy erittäin läheisesti CAD-mallinnus. 3D-tulostamalla valmistetaan muun muassa sellaisia tuotteita, joissa on monimutkaisia pintoja ja sisäisiä rakenteita. Tällaisten tuotteiden mallinnuksessa tarvitaan edistyneitä mallinnustaitoja erityisesti pintamallinnuksen osalta, joten kyseisellä alueella voisi olla lisää tutkimusmahdollisuuksia. CAD-malleja käytetään myös CAM-ympäristössä (Computer-aided manufacturing). Yksi tutkimuskohde voisi olla komponenttien mallinnusstrategioiden ja piirteiden käytön, sekä CAM-ympäristön väliset riippuvuudet ja vaikutukset. Työssä esiteltiin lyhyesti modulaarisen systeemin teoriaa muun teorian tueksi. Modulaarisen systeemin ja modulaarisuuden käsittely mallinnuksessa esimerkiksi esitettyjen monitasoisten luurankoelementtien avulla voisi myös olla jatkotutkimuksen aiheena. Työn ohessa luotu säiliön KBE-järjestelmä edustaa ominaisuuksiltaan hyvin yksinkertaista, lähinnä komponenttivaihtoon ja vähäiseen mallin muokkaukseen kykenevää suunnittelun automatisointijärjestelmää. Monimutkaisemman, esimerkiksi mitoituslaskentaa, sisältävän KBE-järjestelmän luominen voisi tarjota käytännöllisempiä esimerkkejä mallinnusstrategioiden hyödyistä ja käytöstä ja saattaisi siten olla hyvä tutkimuskohde.

LÄHTEET

Andreasen, M.M., Hansen, C.T. & Mortensen, N.H. (1996). The Structuring of Products and Product Programmes, Proceedings of the 2nd WDK Workshop on Product Structuring, June 3-4, 1996, Delft University of Technology, Delft.

Camba, J.D., Contero, M. & Company, P. (2016). Parametric CAD modeling: An analysis of strategies for design reusability, *Computer-aided design*, Vol.74, pp. 18–31.

Chen, X., Gao, S., Yang, Y. & Zhang, S. (2012), Multi-level assembly model for top-down design of mechanical products, *Computer-aided design*, Vol.44(10) pp. 1033–1048.

Chu, D., Chu, X., Li, Y. & Lyu, G. (2016). A multi-skeleton modelling approach based on top-down design and modular product design for development of complex product layouts, *Journal of engineering design*, Vol.27(10), pp. 725–750.

Demoly, F. & Roth, S. (2017) Knowledge-based parametric CAD models of configurable biomechanical structures using geometric skeletons, *Computers in industry*, Vol.92-93, pp. 104–117.

Fogliatto, F.S. & da Silveira, G.J.C. (2011). Mass customization: Engineering and managing global operations, Springer, London.

Fujimoto, T. (2007). Architecture-based comparative advantage – A design view of manufacturing, evolutionary and institutional economics review, Vol.4(1), pp. 55–112.

Juuti, T. (2008). Design Management of products with variability and commonality: contribution to the Design Science by elaborating the fit needed between product structure, Design process, Design goals and design organization for improved R&D efficiency, Tampere University of Technology, Tampere.

Juuti, T. & Lehtonen, T. (2006). Using multiple modular structures in delivering complex products, in Proceedings of NordDesign 2006 Conference, pp. 266–276.

Kotimaisten kielten keskus, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 9.3.2021): <https://www.kielitoimistonsanakirja.fi/#/standardoida>

La Rocca, G. (2012). Knowledge based engineering: Between AI and CAD. Review of a language based technology to support engineering design. *Advanced engineering informatics*, Vol.26, pp. 159–179.

Lehtonen, T. (2007). Designing modular product architecture in the new product development, Tampere University of Technology, Tampere.

Martio, A. (2015). Tuotekonfigurointi ja tuotetiedon hallinta, 1. painos, Amartekno, Espoo.

Pakkanen, J. (2015) Brownfield process: a method for the rationalisation of existing product variety towards a modular product family, Tampere University of Technology, Tampere.

- Pakkanen, J., Lehtinen, J., Juuti, T. & Lehtonen, T. (2013) The module system and its requirements for PDM/PLM systems, Proceedings of the PDM2013 conference, Lappeenranta university of technology, Lappeenranta.
- Pakkanen, J., Juuti, T. & Lehtonen, T. (2019). Identifying and addressing challenges in the engineering design of modular systems – case studies in the manufacturing industry, *Journal of engineering*, Vol.30(1), pp. 32–61.
- Pakkanen, J., Lehtonen, T. & Juuti, T. (2020). Partitioning types in product modularisation, Proceedings of the design society: Design conference, Vol.1 pp. 2325–2334.
- Parslov, J.K. & Mortensen, N.H. (2015). Interface definitions in literature: A reality check, *Concurrent engineering: research and applications*, Vol.23(3), pp. 183–193.
- Pulkkinen, A. (2007). Product configuration in projecting company: the meeting of configurable product families and sales-delivery process, Tampere University of Technology, Tampere.
- Rigger, E., Shea, K. & Stankovic, T. (2018). Task categorization for identification of design automation opportunities, *Journal of engineering design*, Vol.29(3), pp. 131–159.
- Riitahuhta, A. & Pulkkinen, A. (2001). Design for configuration: A debate based on the 5th WDK workshop on Product Structuring, Springer, Berlin.
- Stroud, I & Nagy, H. (2011). Solid modelling and CAD systems, How to survive a CAD system, 1st edition pp. 689, Springer, London.
- Schäffer, E., Shafiee, S., Mayr, A. & Franke, J. (2021). A strategic approach to improve the development of use-oriented knowledge-based engineering configurators (KBEC). *Procedia CIRP*, Vol.96, pp. 219–224.
- Ulrich, K.T. & Eppinger, S.D. (2012). Product design and development, 5th edition, McGraw-Hill Irwin, New York, NY.
- Um, D. (2016) Solid modeling and applications, Rapid prototyping, CAD and CAE theory, 1st edition pp. 298, Cham Springer international publishing.
- Wang, L., Keshavarzmanesh, S., Feng, H-Y. & Buchal, R.O. (2009). Assembly process planning and its future in collaborative manufacturing: a review, *International journal of advanced manufacturing technology*, Vol.41(1), pp. 132–144.
- Yao, X. & Lin, Y. (2016). Emerging manufacturing paradigm shifts for the incoming industrial revolution, *International journal of advanced manufacturing technology*, Vol.85(5), pp. 1665–1676.
- Yin, C.G. & Ma, Y.S. (2012). Parametric feature constraint modeling and mapping in product development. *Advanced engineering informatic*, Vol.26(3), pp. 539–552.