

Valtteri Jaatinen

# KONFIGUROINTI JA 3D-CAD- MALLINNUS EXCELIN JA SOLIDWORKSIN AVULLA

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Toukokuu 2022

# TIIVISTELMÄ

Valtteri Jaatinen: Konfigurointi ja 3D-CAD-mallinnus Excelin ja SolidWorksin avulla  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Konetekniikan tutkinto-ohjelma  
Toukokuu 2022

---

Kustomoitujen tuotteiden kysyntä kasvaa jatkuvasti globaaleilla markkinoilla. Teollisuusyrityksissä hyödynnetään tuotteiden suunnittelussa parametrissa 3D-mallinnusta ja konfigurointia. Parametrisessa mallinnuksessa toteutetaan rajoituksiin ja ominaisuuksiin perustuvaa mallinnusta, jonka avulla geometrian ja topologian välille luodaan yhteys. Konfigurointi tarkoittaa erityistyyppistä suunnittelutoimintaa, jonka ominaisuuden pääpiirteenä on, että suunniteltava artefakti koostaan joukosta ennalta määriteltyjä komponentteja, jotka voidaan liittää toisiinsa vain tietyillä tavoilla. Tässä työssä tutkittiin konfigurointia teorian ja käytännön tasolla. Työn tavoitteena oli selvittää, miten teknisten tuotteiden parametreja voidaan muuttaa konfiguroimalla mallia ja pyrittiin ymmärtämään konfiguraation välttämättömyyttä ja tärkeyttä.

Työ jakaantuu kahteen osaan. Työn teoriaosuudessa perehdyttiin konfigurointiin ja ymmärrettiin sen tärkeys teollisuudessa ja globaalien markkinoiden näkökulmasta. Konfiguroinnin ja konfiguraattorien tärkeys esiintyi erityisesti massakustomoinnissa. Konfiguroinnin huomattiin mahdollistavan parametrien helpon muokkaamisen. Konfiguroinnilla ja konfiguraattoreilla todettiin tuotettavan paljon hyötyä yrityksille. Niiden ansiosta asiakas kokee saavansa enemmän arvoa palvelusta ja tuotteesta. Yritys vähentää kustannuksiaan hyödyntämällä niitä ja ne tekevät massakustomoinnista mahdollista. Konfigurointi helpottaa myös projektikohtaista konfigurointia tekemällä mallista elävän sekä helpottamalla mallin muokkausta ja sen uusiokäyttöä. Konfiguroimisprosessia ei kuitenkaan nähty ongelmattomaksi. Konfiguroimiseen todettiin liittyvän haasteita, jotka rajoittavat konfiguraattorien maksimaalisen hyödyn saavuttamista. Suurimmiksi ongelmiksi konfiguroimisella osoittautuivat asiakkaat ja konfiguroinnin rajoitteet. Konfiguraattoreille tunnistettiin samat ongelmat, sillä konfigurointi on osa konfiguraattoreja, mutta niillä havaittiin olevan myös useita ongelmia näiden lisäksi, kuten resurssirajoitteet sekä tietotekniset ongelmat ja tuotemallinnukseen liittyvät ongelmat.

Työn toinen osa käsittelee teknisen komponentin, liukulaakerin, konfiguroimista ja konfiguraattorin rakentamista tälle komponentille hyödyntäen Exceliä ja SolidWorksiä. Lopputuloksena konfiguraattorilla luotiin neljä erilaista versiota liukulaakerista mukaillen oikeiden liukulaakerien dimensioita. Excel ja Solidworksin Design Table koettiin hyödyllisiksi työkaluiksi teknisen tuotteen parametrien muokkaukseen ja konfigurointiin. Luvussa esitellään kaksi menetelmää, jotka auttavat suunnittelijaa mallin muokkauksessa ja uudelleenkäytössä. Menetelmät todettiin toimiviksi projektikohtaiseen konfigurointiin, mutta ne nähtiin heikkoina massakustomoinnin kannalta. Konfiguraation tulevaisuuden näkymien tutkiminen jää tutkimuksessa vähemmälle huomiolle, kuin mitä alun perin oli suunniteltu, erittäin rajatun kirjallisuuslähdemäärän takia.

Avainsanat: konfigurointi, konfiguraattori, CAD, massakustomointi, tuotekonfigurointi, parametrinen mallintaminen

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. KONFIGUROINTI .....	3
2.1 Konfiguroinnin määritelmä.....	3
2.2 Tuotekonfigurointi.....	4
2.2.1 Massakustomointi .....	5
2.2.2 Projektikohtainen konfigurointi .....	8
2.3 Konfiguroinnin vahvuudet ja haasteet .....	9
2.4 Parametrinen mallinnus.....	10
2.5 Konfigurointiprosessi .....	11
2.6 Konfiguraattorit.....	13
2.7 Konfiguroinnin historia ja tulevaisuuden näkymät .....	14
3. CAD-MALLIN LUONTI JA KONFIGUROINTI .....	17
3.1 Liukulaakerin esittely .....	17
3.2 Liukulaakerin parametrinen mallinnus SolidWorksissä .....	18
3.3 Konfigurointi Excelissä .....	19
3.4 Tulokset ja niiden tarkastelu.....	22
4. YHTEENVETO .....	24
LÄHDELUETTELO .....	26

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

BoM	Bill of Materials, materiaaliluettelo
CAD	Computer Aided Design, tietokoneavusteinen suunnittelu tai Computer Aided Drafting, tietokoneavusteinen luonnostelu
CAE	Computer Aided Engineering, tietokoneavusteinen tekniikka
ETO	Engineer-To-Order, tilauksesta suunniteltu
UI	User Interface, käyttöliittymä

# 1. JOHDANTO

Konfiguroimista vaaditaan teollisuudessa usein. Aina ei voi lähteä tekemään mallia uudesta. Tämän sijaan konfiguraatioilla pystytään mahdollistamaan tai vähintään huomattavasti helpottamaan mallien uusiokäyttöä, kun geometria ja parametrit ovat helpommin muokattavissa. Näin nopea mallin muokkaus on mahdollista. Malleja ja niiden konfiguraatioita on monia eritasoisia, esimerkiksi laivan mallintaminen ja konfiguroiminen on huomattavasti vaikeampaa kuin kengän. Mitä vaikeammasta mallista on kyse, sitä tärkeämpi konfiguraation rooli yleisesti on. Kuitenkin esimerkiksi massakustomointin näkökulmasta konfiguroiminen on hyvin olennaista mallin monimutkaisuudesta riippumatta, sillä teollisuuden näkökulmasta on erityisen tärkeää, että massakustomointia voidaan toteuttaa mahdollisimman vaivattomasti.

Konfiguroiminen perustuu koneinsinööritieteessä 3D-mallin parametrien muokkaukseen eli dimensioiden, rajoitteiden, komponenttien ja mallin ominaisuuksien vaihtamiseen. Konfiguroiminen on Brownin (1998) mukaan yksinkertaistettuna valinnan, yhdistämisen ja arvioinnin summa, jossa valinta kuvaa komponentin valitsemista, yhdistäminen kuvaa komponenttien välisten suhteiden luomista ja arviointi kuvastaa yhteensopivuuden testausta sekä tavoitteiden tyydyttävyyden testausta.

Tietokoneavusteisen suunnittelun (Computer Aided Design, CAD) käyttö on hyvin yleistä insinöörien keskuudessa. CADin avulla insinööri voi toteuttaa esimerkiksi numeerista laskentaa, 2D-piirustusten tekoa, 3D-mallien kehittelyä sekä erilaisia simulointeja. Simuloinnin vuoksi tietokoneavusteista suunnittelua on alettu kutsumaan myös tietokoneavusteiseksi tekniikaksi (Computer Aided Engineering, CAE) (Martin 2021). Simuloinnin avulla voidaan suorittaa esimerkiksi mallien lujuuslaskentaa.

Markkinoiden kasvava tarve tuotteiden kustomoinnille, eli mallien parametrien muuttamiselle asiakkaan tarpeiden mukaisiksi, on tehnyt konfiguroinnista merkittävän elementin markkinataloudessa. Konfiguroinnin merkitys ilmenee myös arkielämässä esimerkiksi tuotekatalogien muodossa.

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, miten teknisten tuotteiden parametreja voidaan muuttaa konfiguroimalla mallia. Tutkimuksessa perehdytään konfiguraation teoriaan ja tarkastellaan sen hyötyjä ja haasteita. Tutkielmaan liittyy myös globalisoituvan teollisuuden ja markkinoiden vaatimuksien tarkastelu konfiguroinnille, sillä se on olennainen syy konfiguraation tärkeydelle. Tämän lisäksi työssä pyritään selvittämään

konfiguraation tulevaisuudennäkymiä. Tavoitteena on myös ymmärtää konfiguraation välttämättömyys ja tärkeys, niin massakustomoinnin kuin projektikohtaisten konfigurointien kehityksen kannalta, sekä ymmärtää, miten Microsoft Excelin taulukkolaskentaohjelma soveltuu Dassault Systemsin SolidWorks-suunnitteluohjelman kanssa konfiguroimiseen. Työn tutkimuskysymykset ovat: mitkä ovat konfiguraation hyödyt ja miksi se on tärkeää? Sekä miten taulukkolaskentaohjelma-Exceliä sovelletaan konfigurointiin?

Työn toinen luku käsittelee konfiguraatiota ja sen alakäsitteitä teoreettisella tasolla. Luvun alussa esitellään konfiguraation ja tuotekonfiguraation määritelmiä, sekä jälkimmäisen alakäsitteitä massakustomointia ja projektikohtaista konfigurointia. Luvussa käsitellään myös konfiguraatioprosessin etenemistä ja konfiguroinnin historiaa ja pyritään tarkastelemaan tulevaisuudennäkymiä.

Kolmannessa luvussa työn sovelluskohteena tutkitaan, miten SolidWorksiä ja Exceliä voidaan hyödyntää liukulaakerin mallin konfiguroimisessa. Luvun lopussa esitetään ja tarkastellaan työn tuloksia. Työ rajataan tutkimaan konfigurointia koneen- ja tuotesuunnittelun näkökulmista eli konfigurointia tutkitaan tuotekonfigurointina.

## 2. KONFIGUROINTI

Konfigurointi on laaja-alainen käsite, jota voidaan käyttää eri tieteenalojen yhteyksissä. Sitä voidaan käyttää esimerkiksi kemianteollisuudessa kuvaamaan atomien järjestäytymistä, tietotekniikassa ilmaisemaan tietokonesysteemin kokoonpanon muodostavat kiinteät laitteistot ja ohjelmistot tai psykologiassa viittaamaan hahmopsykologiaan. (Lexico 2022)

Tuotekonfigurointi voidaan esimerkiksi jakaa massakustomointiin, johon sisältyy esimerkiksi tuotekatalogit ja projektikohtaisiin konfigurointeihin, kuten tilauksesta suunniteltujen tuotteiden konfigurointiin.

### 2.1 Konfiguroinnin määritelmä

Konfigurointi ei sitoudu pelkästään geometrinen dimensioiden muuttamiseen, vaan sitä voidaan hyödyntää myös monissa muissa parametreissa, kuten materiaalien tai komponenttien valinnassa. Älykkäässä (konfiguroidussa) mallissa geometriset dimensiot muuttuvat esimerkiksi ruuvityypin muuttuessa.

Konfigurointia voidaan määritellä kymmenillä eri tavoilla, vaikka rajattaisiin konfigurointi vain koneen- tai tuotesuunnittelun näkökulmaan. Useassa lähteessä käytetään kuitenkin jo 1990-luvun vaihteessa todettua konfiguraation määritelmää. Mittal ja Frayman (1989) määrittivät konfiguroinnin erityistyyppiseksi suunnittelutoiminnoksi, jonka ominaisuuden pääpiirteensä on, että suunniteltava artefakti kootaan joukosta ennalta määritellyjä komponentteja, jotka voidaan liittää toisiinsa vain tietyillä tavoilla. Tämä intuitiivinen määritelmä sopii moniin suunnittelutehtäviin ja on laajasti osallisena ammattielämässä. Tämän seurauksena on luonnollista, että konfiguroinnista on tullut tärkeä tietopohjaisen teknologian sovellusalue. (Mittal & Frayman 1989 s. 1395–1398)

Konfiguroinnin määritelmän ymmärtämisen helpottamiseksi Brown (1998) esittää, että järjestelmän voi rakentaa moduuleista ja komponentit ovat moduuleita. Portit ovat

muuttujia, jotka joko tarvitsevat tai antavat jonkin arvon. Rajoitteet ovat kuvauksia arvojen tyypeistä ja moduulien yhteensopivuuksista toisien kanssa. Konfiguroinnin kuvaus tarkoittaa käyttäjän kuvausta siitä, miten järjestelmän kuuluisi toimia. (Brown 1998)

Konfiguroinnista on Mittalin ja Freymanin (1989) mukaan oleellista huomioida seuraavat asiat:

1. Uusia komponentteja ei voi luoda kesken konfigurointityön.
2. Jokainen komponentti on rajattu ”yhdistymään” johonkin toiseen komponenttiin jollain tietyllä tavalla.
3. Konfiguroinnin lopputulos ei voi määrittellä vain komponentteja konfiguraatiossa, vaan sen, miten ne ovat yhteyksissä toisiinsa.

Tämäkään yleisesti käytetty määritelmä ei ole aivan ongelmaton. Se olettaa, että kaikki konfiguroinnin komponentit ovat fyysisesti yhteydessä toisiinsa (Brown 1998). Esimerkkinä voidaan ajatella palkkia, jonka konfiguraationa ovat palkin materiaali, dimensiot ja väri. Palkin värikomponentilla ei ole fyysistä yhteyttä palkin dimensioiden kanssa. Brown (1998) esittää myös, että portit eivät ole aivan yksiselitteisiä. Porttien ongelmana on se, että ne olettavat, että jotkin vähintään kaksi konfiguraation osaa täytyvät aina olla liitettyinä toisiinsa jonkin kiinteän arvon kautta.

Brown (1998) on antanut ohjeen, miten tämän määrittelyongelman yli voidaan osittain päästä. Portit pitää käsitellä elementteinä, jotka vastaavat kysymykseen ”missä” komponentissa suhde toimii ja millaiseen suhteeseen se voi osallistua jonkin toisen komponentin kanssa. Portin arvon pitää siis antaa olla jopa abstrakti.

Tässä vaiheessa on tullut jo selväksi, että konfiguroiminen terminä on hyvin ylikuormitettu. Se edustaa sekä prosessin artefaktin luomista, joka koostuu komponenttityyppien instansseista, että itse artefaktia eli konfigurointiprosessin tulosta, joka voi olla esimerkiksi materiaaliluettelo (BoM, Bill of Materials) (Hotz et al. 2014, s.11).

## 2.2 Tuotekonfigurointi

Tuotesuunnitteluun osallistuva yritys tietää, että järkevän tuotekonfiguroinnin avulla työ määrää voidaan vähentää ja täten myös insinööriyön kustannuksia. Tuotekehitys vaatii Smithin ja Reinerstenin (1997, s. 82) mukaan optimaalisinta tapaa lyhentää kehityssyklejä, joka on minimoida tuotteen kehittämiseen tarvittava työ tai eliminoida turhat työvaiheet. Moni saattaa pohtia joutuuko yritys tinkimään laadusta tämän seurauksena. Hagglund, Motorolan varatoimitusjohtaja, väittää Smithin ja Reinerstenin kirjassa (1997, s.



7), että näin ei tapahdu, sillä on runsaasti mahdollisuuksia parantaa kehitysprosessia ilman, että joudutaan ottamaan riskejä laadun kanssa.

Tuotekonfigurointi sisältää yhteensopivien komponenttien valitsemista ennalta määritellyistä kokonaisuuksista, jotta asiakkaan tarpeet voidaan täyttää. Konfiguroitavien tuotteiden kehittäminen ja ylläpito edellyttää konfigurointisääntöjen ja -rajoitusten määrittelyä. (Pakkanen et al., 2016, s.210–212) Tuotekonfiguroinnissa tuotantojärjestelmä, tuote ja asiakas ovat sidosteisessa suhteessa toisiinsa ainakin jossain määrin. Tuote kuitenkin sopeutuu aina asiakkaan toiveiden mukaan eikä toisinpäin. (Pulkinen 2007, s.3) Tuotekonfiguraatio voidaan määrittellä ainakin yhden komponentti sarjan löytämisellä, mikä toteuttaa kaikki asiakkaan vaatimukset ja rajoitteet (Aldanondo & Vareilles 2008, s.7).

Räätälöidyn tuotteen konfigurointiprosessi edellyttää laajaa tiedon soveltamista. Siihen liittyy tieto tuotekehityksen eri osa-alueilta. Näitä osa-alueita ovat esimerkiksi asiakkaat, komponentit, prosessit ja tuotannon suunnittelu. Kukin näistä osa-alueista sisältää tietämystä asiakkaiden tarpeista, toiminnallisista ominaisuuksista, tuotekomponenteista, tuotantoprosesseista ja suhteista tuotteiden ja prosessien välillä. Tuotekonfiguraatiolle on myös tyypillistä tieto komponenttien eri vaihtoehtojen hinnoista ja taloudellisista toteutettavuuksista. Tuotekonfiguraatiossa tämä usein esitetään rajoituksina. Nämä rajoitukset vaikuttavat komponenttien valintaan. (Zhang 2014, s.1–5) Kun tuotteen malli ja konfiguraatiosäännöt ovat tehty, tuotekonfiguraatio voidaan tehdä asiakkaan vaatimusten mukaisesti. Kappaleessa 2.2.1 esitellään rajoituksia käytännön näkökulmasta.

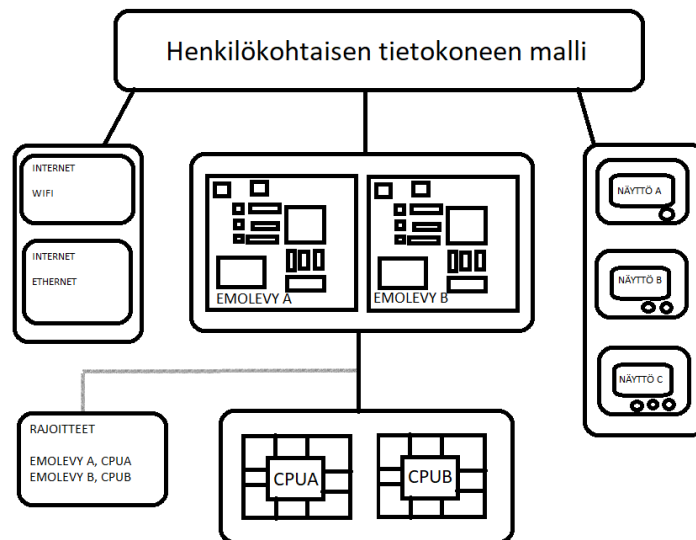
## **2.2.1 Massakustomointi**

Globaali kilpailu asiakkaista kasvaa maailmanlaajuisesti, mihin vaikuttavat asiakkaiden jatkuvasti muuttuvat tarpeet tuotteiden suhteen sekä teknologia ja globalisaatio. Massakustomointi on liikestrategia, joka keskittyy laajaan tuotevariaatio valikoimaan. (Hotz et al. 2014, s. 9–11) Tämä globaali kilpailu johtaa myös yritysten pyrkimykseen jatkuvaan tuotonkehitykseen. Dynaaminen asiakas vaatii nopeaa vastausta yrityksiltä, jonka seurauksena kustomointia ja laajaa tuotevalikoimaa tarjoavat yritykset nauttivat merkittävää kilpailuetua yrityksiin nähden, jotka eivät tätä voi tarjota (Ostrosi and Tié Bi 2009, s.1).

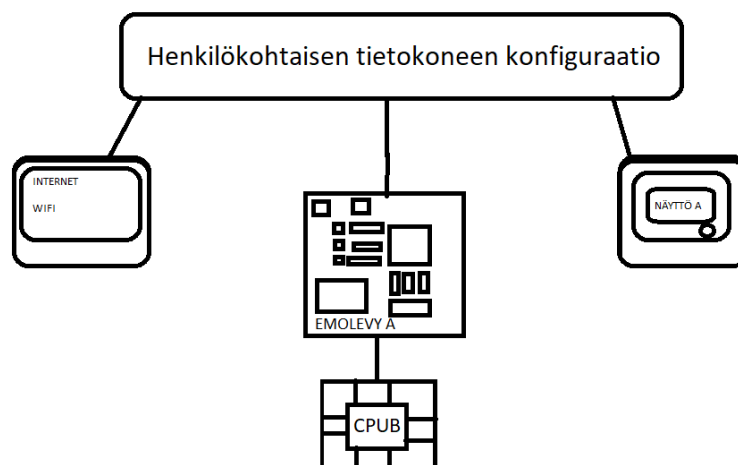
Massakustomoinnin käytännön merkitys ilmenee esimerkiksi tuotekatalogien kautta. Yksi idea massakustomoinnin takana on, että asiakas saa personoidun tuotteen suhteellisen halpaan hintaan (Hotz et al. 2014, s. 213). Kristjansdottir et al. (2018, s.2) esit-

tävät myös, että massakustomointi viittaa yrityksen kykyyn tuottaa kustomoituja tuotteita ja palveluita, jotka täyttävät jokaisen asiakkaan omintakeiset vaatimukset uhraamatta laatua, toimitusaikaa ja katetta. Mäkipää et al. (2012, s. 225) mukaan massakustomoinnin ansiosta yritykset voivat tarjota laajan valikoiman, joka on verrattavissa puhtaasti räätälöityihin tavaroihin ja palveluihin huomattavasti alhaisemmilla kustannuksilla ja/tai lyhyemmillä toimitusajoilla. Tuotteiden, prosessien ja liiketoimien räätälöintiasteen vaihtelu on kuitenkin nähtävissä myös tuotantohyödyketeollisuudessa.

Yksinkertainen esimerkki massakustomoinnista on tietokoneen osto. Asiakas valitsee itse laitteiston osat valikoimasta ja yritys kasaa tietokoneen ja lähettää sen asiakkaalle. Kuvissa 1 ja 2 on esitelty yksinkertaistetulla mallilla tietokoneen konfigurointi, jossa huomioidaan komponentit ja rajoitteet komponenttien välillä.



**Kuva 1.** Yksinkertainen esitys tietokoneen konfiguroinnista, joka huomioi komponenttityypit ja niiden rajoitteet (muokattu lähteestä Hotz et al. 2014, s. 5).



**Kuva 2.** Esimerkki konfigurointi tuloksesta kuvan (1) komponenttien ja rajoitteiden mukaisesti (muokattu lähteestä Hotz et al. 2014, s. 5).

Tällaista konfigurointityyppiä, jossa asiakas valikoi itse osat kutsutaan interaktiiviseksi konfiguroinniksi. Interaktiiviset konfiguraattorit tarvitsevat jonkin selitysjärjestelmän ker- tomaan asiakkaalle ongelmatilanteessa, että miksei hänen valitsemansa yllärajoitettu konfiguraatio toimi. (Junker 2006 s.837–840) Boucher et al. (2012) tunnistavat myös interaktiivisten konfiguraattorien merkittävän merkityksen markkinoilla. He uskovat, että asiakkaiden täytyy pystyä rakentamaan valmiita ja oikeanmukaisia tuotteita, jotka sopi- vat heidän vaatimuksiinsa konfiguraattorien avulla. Täten reliabiliteetti on kriittinen vaa- timus konfiguraattoreille. Boucher et al. (2012, s.1) tunnistavat myös ongelman koke- mustensa pohjalta, että interaktiiviset konfiguraattorit rakennetaan usein tapauskohtai- sesti, mikä nostaa esiin oikeellisuus- ja ylläpito-ongelmia.

Interaktiivisessa konfiguroinnissa voidaan myös nähdä ongelmana englanninkielinen termi ”mass confusion”, jolla tarkoitetaan sitä, kun konfiguroinnin määrittelyn monimut- kaisuus hukuttaa asiakkaan vaihtoehtoihin. Tämä johtaa asiakkaiden epävarmuuksiin heidän tarpeistaan ja heille voi olla vaikeata päättää mitä he haluavat. Asiakkaat saat- tavat myös tuntea epävarmuutta siitä, että onko heille annettu kaikki mahdolliset vaihto- ehdot ja ymmärtävätkö he valintojen merkitystä. (Heiskala et al. 2007, s. 10–11) Tästä voidaan vetää johtopäätös, että interaktiivinen konfigurointi ei ole aina paras vaihto- ehto. Asiakkaalle on lähtökohtaisesti helpompaa hakea hyllyltä haluamansa tuote, vaikka se ei olisikaan aivan täydellinen.

Asiakstarpeiden kartoittaminen on massakustomoinnin keskeisimpiä osa-alueita. Sen avulla selvitetään, mitä asiakas tarvitsee ja haluaa. On ensiarvoisen tärkeää varmistaa, että tämä prosessi tehdään mahdollisimman tarkasti, sillä vain näin voidaan päätyä sel- laisiin tuotekonfigurointeihin, jotka täyttävät asiakkaiden odotukset. (Zhang 2014, s. 6387) Tutkimuksessaan Trentin et al. (2012 s. 851–852) toteavat, että massakusto- moinnissa tuotteen laatu on avoin ongelma, sillä sen tutkimisesta on toteutettu hyvin vähän tutkimuksia. Heidän mukaansa lisää tutkimusta kuitenkin tarvitaan, että voidaan selvittää massakustomoinnin laadunvarmistusta ja reliabiliteettiä.

Tuotekonfigurointi massakustomoinnin näkökulmasta on erittäin toimiva vaihtoehto pa- rantaa tuotekehittelyä. Massakustomoinnin haasteena kuitenkin ilmentyy se, jos loppu- tuloksena sana ”massa” oikeastaan jää pois. Tällaisessa tapauksessa, jossa tarkoituk- sena on ollut myydä paljon jotain massakustomoitua tuotetta, asiakasvaatimusten to-

teutumisen puuttuminen voi johtaa lopputulokseen, jossa yksittäisten myytyjen tuotteiden hinta on alhainen ja se ei vastaa monia eri tulonsiirtoja, joita yritys on joutunut tekemään, kuten materiaalien hinta ja toimituskulut. (Pulkkinen 2007, s.14)

## 2.2.2 Projektikohtainen konfigurointi

Projektikohtaisessa konfiguroinnissa keskitytään asiakkaan yksilöllisiin vaatimuksiin perustuvan tuotteen parametrien määrittelyyn. Nämä konfiguraatiot ovat yleisesti ottaen vaikeampia ja perustuvat yksilölliselle asiakkaalle räätälöityyn lopputulokseen. Projektikohtaisen konfiguroimisen tärkeys ilmenee yritykselle viimeistään silloin kun lähes valmiin suunnitteluprojektin päämitat ovat virheellisiä ja niiden muuttaminen vaikuttaa laaja-alaisesti projektin eri parametreihin.

Projektikohtaisen konfiguroinnin terminä voi ymmärtää paremmin Heiskala et al. (2007 s. 1) lanseeraaman termin ”täysi kustomointi” tai ”täysi räätälöinti” avulla. Ideana täydessä räätälöinnissä on yksilöllisten, mittatilaustyönä valmistettujen tuotteiden manuaalinen suunnittelu, johon voidaan liittää konfigurointi.

Kolmas tapa ymmärtää projektikohtaista konfigurointia on yhdistämällä se tilauksesta suunniteltujen (Engineer To Order, ETO) tuotteiden konfigurointiin. ETO-konseptin konfiguroinnissa jotkin tuotteen osat ovat ennaltasuunniteltuja komponentteja, jotka voidaan nopeasti konfiguroida tai tuoda malliin, kun taas jotkin komponentit täytyy suunnitella erityisesti asiakkaan vaatimuksia varten. Ennaltamäärittelemättömät objektit tai osat tuoterakenteessa ovat myös usein parametrisia ja muuteltavissa olevia komponentteja. Näitä objekteja voidaan käsitellä ennaltasuunniteltuina komponentteina, mikäli parametrien arvot ovat määriteltynä konfiguraatioprosessin automatisoidussa vaiheessa. Insinööritaitoa vaaditaan silti aina muutettavissa olevien komponenttien suunnitteluun. Konfiguraattorit voivat auttaa tuomaan tietoa muutettaviin komponentteihin liittyen esimerkiksi asiakasvaatimuksiin, komponenttien toimintoihin, parametriseen tietoon ja komponenttipohjan selvittämiseksi. (Mesihovic & Malmqvist 2000 s. 6–8) Mäkipää et al. (2012, s.1) tunnistavat asiakkaiden taipumuksen hyväksyä kalliimpia hintoja ja pidempiä toimitusaikoja heille yksilöidyissä tuotteissa ja ratkaisuisa. Massakustomointi kuitenkin pyrkii tarjoamaan samaa pienemällä hinnalla, joka näkyy suurena haasteena ETO ideologiaan pohjautuvilla yrityksillä, sillä heidän täytyy pyrkiä tuottamaan korkeaa laatua ja korkeaa asiakasarvon tuottamista samalla kun kustannuksia karsitaan ja toimitusaikaa lyhennetään.

Massakustomoinnin ja projektikohtaisen konfiguroinnin erona voidaan todeta, että massakustomoinnissa tuote ja tuotantojärjestelmä ovat vakiot, mutta markkinat ovat

epästabiilit ja niitä voidaan vain ennustaa. Projektikohtaisessa konfiguroinnissa toimitus, asiakas, tuote ja tuotantoprosessi ovat määriteltyjä. Kummassakin tapauksessa tuotesuunnittelu pohjautuu epätietoisuuteen, joko asiakkaasta tai toimituksesta. (Pulkinen 2007, s. 48) Voidaan myös todeta, että projektikohtaiseen konfigurointiin eroten, massakustomoitu tuote ei ole lähelläkään yhtä personoitu. Tätä väitettä tukee Trentin et al. (2012, s.856) tutkimuksen toteamus, että useat tutkimukset ovat empiirisesti selvittänyt, että massakustomoinnin laajat tuotevariaatiot heikentävät laatua.

## 2.3 Konfiguroinnin vahvuudet ja haasteet

Konfiguroinnin tärkeyden ymmärtämiseksi on mietittävä tuotteita valmistavan yrityksen menoevät. Pakkanen (2016, s. 1) mukaan projektiliiketoiminnassa, jossa valmistetaan tuotteita pienissä sarjoissa, insinööritaidon hinta on suhteellisen korkea verrattuna tuotteen valmistukseen. Pakkanen (2016, s. 1–2) ehdottaa tämän haasteen ylipääsemiseksi modularisointia, tuotealustoja, tuoteperheitä ja tuotekonfigurointia.

Konfiguroinnin haasteet liittyvät monesti asiakkaisiin. Junkerin (2006, s.837–838) mukaan oikeanlainen konfiguroiminen ei ole haasteeton projekti. Ensinnäkin asiakkaan vaatimuksia vastaavia konfigurointeja voi olla valtava määrä. Vaihtoehtojen määrä voi olla suuri, vaikka valittavana olisi vain yksi komponentti. Junker (2006, s.837–838) kertoo, että asiakas voi haluta mieltymyksiensä perusteella tietynlaisen komponentin ja tämä voi vaikuttaa rajoitteidensa mukaan muihin komponentteihin, mikä tekee konfiguroinnista haastavaa. Tämä vaatii monia kriteerejä huomioivaa päätöksentekoa. Esimerkkinä tästä voisi ajatella asiakkaan, joka haluaa kuvassa 1 esitetyn tietokoneen kokoonpanona, missä emolevyn ja prosessorin komponentit ovat ristiriitaiset. Tällöin kyseessä on kombinatorinen ongelma (Junker 2006, s. 838).

Yksi konfiguroinnin suurista haasteista liittyy rajoitteisiin, jotka tekevät konfiguroimisesta käytännön tasolla liian vaikeata. Kun konfiguroitavan kohteen parametrien ja rajoitteiden lukumäärä nousee liian korkeaksi, on yritykselle parempi vaihtoehto käyttää mallipohjia konfiguroinnin sijasta. Esimerkkinä tämmöisestä voidaan ajatella junan ovea, jonka konfiguroinnin halutaan kattavan useampi oven avausmekanismi, junan käyttöalue, jolloin oven kohdistuvat voimat ja fyysiset ilmiöt voivat olla erilaiset, oven muoto, oven materiaali ja oven sekä ikkunoiden dimensiot. Konfiguroinnin haasteiden takia yritys, joka toteuttaa vain muutamaa standardoitua tuotetta, ei välttämättä tarvitse

laaja-alaista konfigurointia vaan on mahdollista hyödyntää mallipohjia, joihin uudet ratkaisut liitetään.

Vaikka konfigurointi ei ole aivan haasteeton, kuten on esitetty, niin konfiguroinnin hyödyt ovat niin suuret, että konfigurointia toteutetaan. Hvam et al (2013, s. 5) tutkivat konfigurointi järjestelmien hyötyjä neljälle eri yritykselle. He käyttivät tutkimuksessaan parametreina toimitusaikaa, toimituksen ajoissa olemista, resurssien kulutusta, tuotteiden ja palvelujen optimointia, eritelmien laatua, sekä muita havaintoja kuvastamaan konfiguraatio järjestelmien hyötyjä. Eritelmien laadun käsitteellisen epäselvyyden takia määrittellään käsite. Se kuvastaa ymmärtävyyttä eli sitä, kuinka hyvin asiakas ymmärtää tarjouksessa elementit ja kuinka hyvin insinööri ymmärtää suunnittelupiirroksia joihin tuote perustuu. Tuloksena Hvam et al (2013, s. 9) totesivat toimitusaikojen vähentyneen 94–99 %, toimitusten ajoissa olemisen nousi 95–100 %, heikoimmassa tapauksessa toimitukset olivat ajallaan vain 50 % kerroista, eritelmien tekemiseen käytettyjä resursseja vähennettiin 95 %. Lopputuloksen tutkimuksessa todettiin konfiguraatio järjestelmien lisäävän myyntiä, vähentävän toimitusaikojen, parantavan toimitusten ajallaan olemista, hintojen vähenemistä esimerkiksi insinööritaidon vaatimuksessa. Konfiguraattorien hyötyjä käsitellään lisää kappaleessa 2.6.

## 2.4 Parametrinen mallintaminen

3D-mallinnusta käytetään paljon, koska sillä on helppo esitellä malleja visualisoinnin avulla ja siitä voi tehdä 2D-työpiirrustuksia hyvinkin helposti. Mallinnusprosessi voi kuitenkin viedä hyvinkin kauan aikaa. Monet kirjoittajat ovat todenneet, että kyky soveltaa edellisiä malleja ja prosesseja uusiin tilanteisiin on olennainen tekijä nykyaikaisessa suunnittelutyössä ja tuotekehityksessä. (Camba et al. 2016, s. 1)

Parametrin mallinnuksen ymmärtämiseksi on hyvä määritellä mitä sana parametri tarkoittaa. Parametri tarkoittaa funktiolle tai ohjelmalle vietyä tietoa, jota ohjelma käyttää tuottaakseen halutun tuloksen käyttäjälle. Parametrisessa mallissa geometriaa kontrolloidaan pääsääntöisesti ei-geometrisilla ominaisuuksilla, joita kutsutaan parametreiksi. Oikein käytettynä parametrinen CAD mallintaminen mahdollistaa suunnittelun semantiikan lisäämiseen malliin, mikä tarkoittaa olemassa olevien mallien nopeaa muuttamista yksinkertaisesti muokkaamalla joidenkin parametrien arvoja (Camba et al. 2016, s. 1)

Parametrinen mallintaminen tarkoittaa rajoituksiin tai ominaisuuksiin perustuvaa mallinnusta, jossa ideana on mallintaminen näiden avulla. Geometrian ja topologian välille luodaan yhteys parametrien ja rajoitteiden avulla. (Ongkodjojo & Gunawan 2006, s. 26)

Parametreja muuttamalla mallin geometria muuttuu myös. Kuten aikaisemmin on jo käsitelty, komponenttityypit ja rajoitukset muodostavat yhdessä konfiguraatiomallin. Konfiguraatiomallit ovat tärkeitä, sillä mahdollisia konfiguraatiovariaatioita komponenttityyppien ja rajoitusten välillä on valtava määrä.

CAD-mallin parametrien laatu vaikuttaa merkittävästi 3D-mallin joustavuuteen ja muokautuvuuteen eli yksinkertaisesti siihen miten helppoa mallin geometriaa on muokata. Parametrisessa mallintamisessa kaikki mallin piirteet yhdistetään hierarkkisesti, jolloin luodaan verkkorakenne (network structure), jossa jokainen solmu (node) edustaa piirrettä ja jokainen yhteys edustaa kahden piirteen välistä riippuvuutta. Tämän tyylinen rakenne tunnetaan nimellä suunnittelupuun (design tree). Suunnittelupuun mukautuva luonne antaa käyttäjälle mahdollisuuden mallintaa nopeasti monimutkaisia geometrioita suhteellisen helposti ja lisätä samalla mallien joustavuutta sekä uudelleenkäytettävyyttä. Oikein määritetyt ominaisuuksien riippuvuudet johtavat siihen, että vanhemmalle solmulle tehdyt muutokset leviävät automaattisesti sen lapsisolmuihin (child node) ja CAD-malli reagoi tähän muutoksilla, jotka ovat ennustettavissa. (Camba et al. 2016, s. 1)

## 2.5 Konfigurointiprosessi

CAD-mallinnuksessa hyödynnetään parametrista mallinnusta, jonka tarkoituksena on tukea tuotevariantteja, joilla on tietty samanlainen pohjageometria. Hyödyntämällä konfigurointia mallin parametrien muutettavuutta saadaan eri tuotevariantteja. (Ongkodjojo & Gunawan 2006, s.25) Konfigurointiprosessi perustuu siis parametriseen CAD-mallinnukseen, jota käsitellään myöhemmissä kappaleissa.

Konfigurointisäännöt ilmaisevat rajoitteita seuraavien välillä: komponenttien ja komponenttien osien välillä. Komponenttien ja osien määrän ollessa suuri parametreihin liittyvien sääntöjen ja rajoitusten määrä kasvaa jopa hyvinkin suureksi, jolloin on erittäin tärkeää, miten säännöt organisoidaan. (Zeng & Jin 2007, s. 766–767) Konfigurointiprosessin alkuvaiheissa on siis olennaista huomioida päämitat, eli muita parametreja ohjaavat mitat.

Zengin ja Yinin (2007, s. 769) mukaan konfigurointiprosessi voidaan yksinkertaistaa seuraavasti: ensin asiakas kertoo vaatimuksensa, minkä jälkeen tuotteen muuttujan arvoaggregaatti, joka tarkoittaa useiden pienempien summien yhteenlaskettua kokonaisarvoa, jota käsitellään yksittäisenä summana, on vahvistettava vaatimusten ja tuotteen

muuttujien aggregaattien välisellä kartoituksella. Seuraavaksi tuotteen muuttujien aggregaatiit asetetaan tunnetuksi edellytykseksi ja konfigurointisääntöjen mukaisesti kaikki atomikomponentit asetetaan komponenttikohtaisesti osarevisioon sen mukaisesti, missä järjestyksessä ne esiintyvät tuotemallipuussa.

Ostrosin ja Tié Bin (2009, s. 14) esittävät toisenlaisen tavan nähdä konfiguraatioprosessi. Heidän mielestään konfiguraatioprosessi tulisi ymmärtää suunnitteluprosessin luonteen takia prosessina, jossa epävarmuutta vähennetään jokaisen suunnitteluvaihtoehdon osalta. Suunnittelun aikana suunnittelija on tekemisissä joidenkin erilaisten epävarmuuden muotojen kanssa. Näitä ovat epätarkkuus, satunnaisuus, sumeus, moniselitteisyys ja epätäydellisyys. Epätarkkuus johtuu suunnittelutietojen epätäsmällisyydestä ja tarkkuuden puutteesta. Satunnaisuus havaitaan muuttujien todennäköisinä arvoina tietyllä alueella. Sumeus nähdään johtuvan kyvyttömyydestä määritellä muuttujan semantiikka tai määritelmä voi olla epäselvä. Moniselitteisyyden voi ymmärtää määritelmättömyyden epätäydellisyydestä ja sanan useista eri tulkinnoista saman kielen sisällä. Lopuksi epätäydellisyys johtuu tiedon puutteesta. Tämä tapa nähdä suunnitteluprosessi kuvataan evoluutioprosessina, joka on täysin kehittynyt, kunnes jokainen suunnitteluparametri voidaan kuvata täydellisesti.

Nykyaikaisessa suunnittelussa suunnittelu ei ole vain yksinkertaista luonnostelua. Se sisältää muitakin toimintoja, kuten analysointia, dokumentointia ja valmistustietojen tuottamista. Suunnittelu on siis monivaiheinen prosessi, jossa kussakin vaiheessa tehtyjen töiden validointi tapahtuu iteroiden. Asianmukainen suunnitteluprosessi säästää aikaa, kun sitä mietitään huolellisesti jo alkuvaiheessa. Oikean mallin käyttö ja validointi varhaisessa vaiheessa säästää huomattavasti aikaa. (Um 2016, s.6) Ennen mallin tekoa on siis oleellista suunnitella mitä ja missä järjestyksessä malliin luodaan uusia ominaisuuksia. Umin (2016, s. 6–7) mukaan mallintaminen olisi syytä tehdä kolmessa vaiheessa. Ensiksi määritellään ongelma selkeästi ja kattavasti, sillä aika, resurssit ja taidot ovat rajoitteelliset jokaisella suunnittelijalla. Tämän jälkeen ideoidaan ongelman selkeiden määrittelyiden ja suunnittelun objektin hyvän ymmärryksen pohjalta, miten suunnittelua lähdetään viemään eteenpäin. On syytä huomioida mahdollisimman monta eri lähestymistapaa, jotta optimi tapa voidaan valita. Optimaalisen lähestymistavan valittua suunnittelijan täytyy vielä validoida suunnittelu. Tutkimalla useita vaihtoehtoja yhdistettynä ideointivaiheessa ehdotettujen ratkaisujen toteuttamiseen voidaan käyttää geometrisia malleja tai kinemaattisia malleja. Tämän jälkeen osien suunnittelu voidaan aloittaa.

Konfiguraatio on konfigurointiprosessin lopputulos. Konfiguraatio voidaan määritellä esimerkiksi Mittal ja Fraymanin (1989, s. 1396) mukaisella tavalla, missä konfiguraatio



on yksi tai useampi konfigurointi, jotka toteuttavat kaikki vaatimukset ja täten konfiguraatio on kokoelma komponentteja ja kuvauksia komponenttien yhteyksistä kokoelmassa.

Konfigurointiprosesseja on monia erilaisia. Kappaleessa esiteltiin konfigurointiprosesseja abstraktilla tasolla. Yhtä konfigurointiprosessia, jossa päädytään neljään erilliseen konfiguraatioon, käsitellään käytännöllisestä näkökulmasta työn sovellusosiossa.

## 2.6 Konfiguraattorit

Ensimmäiset varsinaiset konfiguraattori-sovellukset kehiteltiin 1980-luvulla tukemaan tuotteiden konfigurointiprosessia. Konfiguraattoreita alettiin suunnittelemaan, sillä huomattiin, että tilausten hankinnan aikana yrityksen ja asiakkaan välillä vaihdettava tiedon määrä kasvoi jatkuvasti. Tämä jatkuva kasvu johti siihen, että yritysten oli hankalampi kertoa mitä he pystyivät tarjoamaan ja miten nämä tarjoukset vastasivat asiakkaiden tarpeita. Todettiin, että tuotteiden moninaisuuden ja räätälöinnin lisääntyessä tuotekehitysprosessille, jossa jokaisen asiakkaan erityistarpeet muunnetaan oikeiksi tuotetiedoiksi, jotka tukevat tilausten hankintaa, on ominaista korkeammat tiedonkäsittelyvaatimukset. Nykypäivänä konfiguraattori-sovellukset ovat jokaisessa toiminnanohjaussovelluksessa standardi. (Trentin et al. 2012, s. 851)

Kuten on jo aiemmin tullut esille, nykyisessä liikemaailmassa asiakkaat haluavat jatkuvasti enemmän ja enemmän kustomoituja tuotteita mahdollisimman lyhyillä toimitusaajoilla, riittävällä laadulla ja mahdollisimman halvalla hinnalla. Tärkeä tekijä näiden tavoitteiden saavuttamiseen ovat konfiguraattorit. Ne ovat tietojärjestelmiä, jotka tukevat tuotekokoonpanon määrittelyä sekä konfiguraatitiedon luomista ja hallintaa. (Kristjansdottir et al. 2018, s.2) Sekä suuret että pienet yritykset pyrkivät avustamaan asiakkaita kustomoimaan omia tuotteitaan. Näitä tietojärjestelmiä voidaan kutsua myös kustomointi työkaluiksi, jotka konfiguroivat yrityksen tuotteita, joita tarjotaan asiakkaiden käytettäväksi. (Boucher et al. 2012, s.1) Mäkipää et al. (2012, s. 224) toteavat, että konfiguraattorien avulla asiakas on kutsuttu mukaan osallistumaan tuotteen arvontuotto prosessiin. Asiakkaiden onnistunut osallistuminen määrittelyprosessissa voi luoda ”flow” ilmiön, joka lisää asiakkaan tyytyväisyyttä prosessiin ja siten myös lopputulokseen.

Kristjansdottir et al. (2018, s. 1) mukaan yritykset, jotka tarjoavat kustomoituja tuotteita hyödyntävät enemmän ja enemmän konfiguraattoreita tukemaan myyntiä ja suunnittelua. Tämän väitetään parantavan toimitusaikoja ja laatua, vähentävän kustannuksia ja lisäämään asiakastyytyväisyyttä sekä heidän havaitsemiansa hyötyjä. Trentin et al.

(2012, s. 850) toteavat myös konfiguraattorien jatkuvan yleistymisen vuosi vuodelta yritysten käytössä. He painottavat, että oleellinen osa menestyksestä massakustomointia on tuotekonfiguraattorien oikeaoppinen käyttö yritysten keskuudessa. Tutkimuksessaan Trentin et al. (2012, s. 850) tutkivat 176 tuotantolaitosta kuudessa eri maassa, jotka hyödyntävät tuotekonfiguraattoreita ja toteavat samankaltaisia hyötyjä kuin Kristjansdottir et al. (2018). Trentin et al. (2012, s. 856) tunnistivat muitakin hyötyjä, kuten tuotekonfiguraatiovirheiden vähenemisen, suunnittelijoiden ja prosessi-insinöörien parantuneen keskittymisen yrityksen tuotteiden ja prosessien asteittaisiin ja innovatiivisiin parannuksiin sekä parannettujen tuote- ja prosessiratkaisujen nopeampi käyttöönotto. Tuotekonfiguraattorien tärkeyden ymmärtämiseksi massakustomoinnin näkökulmasta pitää ymmärtää, että ilman tuotekonfiguraattoreita jokaiselle yksilöasiakkaalle toteutettu ratkaisu pitäisi erikseen mallintaa. Jos mallintaminen veisi viisitoista minuuttia asiakasta kohden, niin miljoonalle asiakkaalle toteutetut konfiguraatiot veisivät 15 000 000 minuuttia, kun tuotekonfiguraattorin avulla tähän käytetty aika on se mikä tuotekonfiguraattorin tekemiseen kuluu.

Edellisten väitteiden ja tutkimusten pohjalta voidaan todeta, että konfiguraattorit ovat yrityksille erittäin hyödyllisiä työkaluja. Ne eivät kuitenkaan ole täysin ongelmattomia. Kristjansdottir et al. (2018, s. 12–13) esittävät kuusi pääkategoriaa konfiguraattorien haasteille: tietotekniikka, tuotemallinnus, organisatoriset, resurssirajoitteet, tuotteeseen liittyvät ja tiedonhankinta. Nämä pääkategoriat voidaan taas jakaa useisiin alakategorioidiin. Tutkimuksessaan he päätyivät lopputulokseen, että jokaisella tutkittavana olevalla yrityksellä esiintyi vähintään yksi ja enintään kolme näistä ongelmista. Yleisimpänä ongelmana yritykset kokivat konfiguraattorien organisatoriset ongelmat ja vähiten ongelmallisimpina koettiin resurssirajoitteet ja tuotteisiin liittyvät ongelmat. Tarkemmin konfiguraattorien haasteista voi lukea Kristjansdottir et al. (2018) tutkimuksesta.

## 2.7 Konfiguroinnin historia ja tulevaisuuden näkymät

Ennen tietokoneita konfigurointi oli lähes mahdotonta. Ainoa konfigurointiin liitettävä asia oli komponenttivalinnat komponenttikirjastoista. Tietokoneet liitettiin ensimmäistä kertaa tuotekehitykseen 1950-luvulla (Martin 2021). Silloiset ohjelmat pyrkivät korvaamaan piirrustustyön. 2D-piirrustusten luomista kutsutaan englanninkielisellä sanalla ”Drafting” (suomeksi piirustus) ja tästä ohjelmat, jotka tekivät mekaaniset ja arkkitehtuuriset 2D-piirrustukset, saivat nimityksen CAD (Computer Aided Drafting, tietokoneavusteinen luonnostelu) (Martin, 2021). 3D-mallinnusta on käytetty laaja-alaisesti

korvaamaan ja täydentämään perinteisiä 2D-piirrustuksia (Ongkodjojo & Gunawan 2006, s. 25).

Konfiguroinnin historia heijastaa monia erilaisia kehityskulkuja, jotka ovat lopulta johtaneet teolliseen konfigurointitekniikkaan. Näin ollen konfigurointia voidaan pitää yhtenä tekoälytekniikan menestyksekkäimmistä sovellusalueista. (Hotz et al. 2014, s. 43) Tätä väitettä tukee vahvasti konfiguroinnin yleisyys teollisuuden parissa, jota on käsitelty aiemmissa kappaleissa.

Konfiguroinnin historia ja milloin sen hyödyntäminen on alkanut ei ole yksiselitteistä vastausta, sillä konfiguroinnin määritelmä ei ole yksiselitteinen. 70-luvulla eli kauan ennen kuin CAD ohjelmat yleistyivät laajempaan käyttöön, tuotekehitysinsinöörit kehittivät ”kotitekoisia” työkaluja hallitakseen jatkuvasti vaikeutuvia tuotekonfiguraatioiden monimutkaistumisia (CMstat 2022). Laajempi käyttö oli rajallista, sillä CAD ohjelmat vaativat tietokoneilta hyvin paljon ja ne olivat erittäin kalliita ennen kuin SolidWorks julkaistiin vuonna 1995, joka maksoi vain murto-osan aikaisempiin CAD ohjelmiin verrattuna (Dadalu 2021). Kustomoitu Fortran koodi kuitenkin kehitettiin, jonka avulla IT-alan asiantuntijat ylläpitivät tietokantoja, joita hyödynnettiin konfiguroimiseen (CMstat 2022). Suuri askel konfiguraation historiassa tapahtui myös samaan aikaan 70-luvulla, kun Digital Equipment Corporation kehitti ohjelman nimeltä R1 (myöhemmin kutsuttu nimellä XCON), jolla konfiguroitiin VAX-tietokonejärjestelmiä asiakkaiden vaatimusten mukaisesti. Tämä pioneerityö oli merkittävänä osallisena konfiguraation kehityksen edistymiselle. (Zhang 2014, s.1)

80-luvulta eteenpäin BOM management, Lotus 1-2-3, dBase, Microsoft Access ja Microsoft Excel ohjelmia alettiin hyödynnettiin tuotekonfiguraatiossa. Tuotetiedonhallinta (Product Data Management, PDM) ohjelmistoja ilmestyi 80-luvulla ja 90-luvun alussa merkittävä määrä kaupallisesti. Näitä ohjelmia hyödynnettiin konfiguroimisessa. Niitä kyettiin hyödyntämään erityisesti tuotesuunnitteluosastolla tuotekonfiguraatiossa, sillä ratkaisujen tarjoajat lisäsivät nopeaa vauhtia ominaisuuksia, jotka ylittivät CAD-tiedostojen perushallintaan tarvittavat ominaisuudet. Näitä ovat esimerkiksi BOM:in hallinta, asiakirjahallinta ja työnkulun automatisointi. (CMstat 2022)

Massakustomointi dominoi markkinoita niin paljon, että massakustomoinnin paradigma on tunnistettu. Paradigma perustuu ideaan, että toteutetaan asiakkaalle yksilöityä, jopa hyvinkin varioituneita tuotteita lähes massatuotannon hinnalla. Tämä tarkoittaa sitä, että kilpailullisessa asiakaskeskeisessä liike maailmassa siirtymä asiakaskohtaiseen tuotteiden yksilöintiin tulee saavuttaa massatuotannon ehdoin. (Hotz et al. 2014, s. 3)

Tämä johti siihen, että teknologista edistystä vaadittiin yritys- ja tuotantotoimintaan. Konfigurointi näyttölee olennaista roolia tässä teknologisessä edistymisessä.

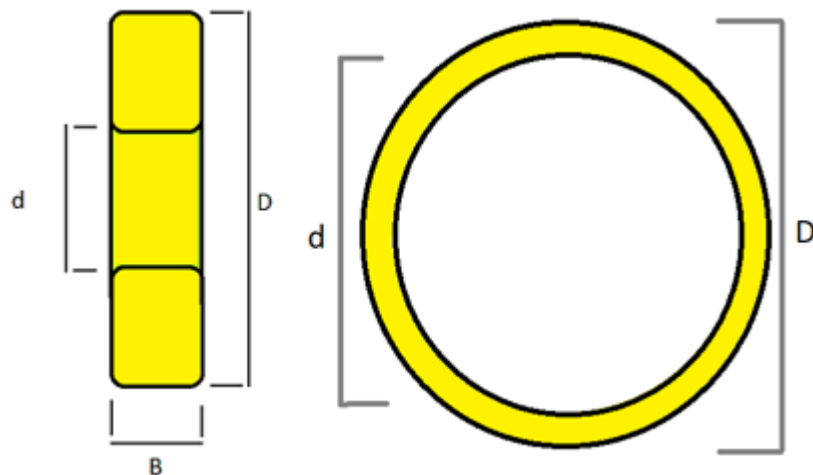
Koneälyä ja laskennallista tietotekniikkaa hyödynnetään insinöörien keskuudessa jatkuvasti enemmän. Suunnittelun automatisointi ja valmistuksen työnkulku paranevat näitä hyödynnettäessä. Niiden hyödyntäminen myös laskee yrityksen kustannuksia esimerkiksi suunnittelutyön tarpeen vähentyessä. (Cheong et al. 2019, s. 2339) Tietokoneavusteisen suunnittelun tulevaisuudessa odotetaan koneälyn liittämistä vahvemmin mallinnusohjelmiin, joka tulee mahdollistamaan joidenkin suunnittelutyön osa-alueiden automatisointia ja lisää laaduntarkastusta ennustamalla suunnitteluvirheet (Thomasnet 2019). Myös koneälyn avulla voidaan mahdollisesti tehdä uniikkeja malleja ilman ihmisen työpanosta (Thomasnet 2019). Nämä asiat liittyvät olennaisesti konfigurointiin, mikäli esimerkiksi konfigurointia (suunnittelutyön osa-alueita) automatisoidaan ja suunnitteluvirheitä ennustamalla voidaan jättää pois useita konfiguraatio vaihtoehtoja, mikä esiteltiin aiemmassa kappaleessa haasteeksi konfiguroimisessa. Viimeisen kahdenkymmenen vuoden teknologiakehityksen perusteella, ei voida sanoa, etteikö myös konfigurointi voisi kehittyä niin paljon, että esimerkiksi kokonaisia rahtialuksia voitaisiin luoda konfiguraattorin avulla.

### 3. CAD-MALLIN LUONTI JA KONFIGUROINTI

Tässä luvussa työn sovelluskohteena tutkitaan liukulaakerin konfigurointia. Luvun alussa esitellään liukulaakerin toimintaa ja sen hyötyjä teoreettisella tasolla, jonka jälkeen kappaleessa 3.2 esitellään parametrisen mallintamisen taustaa. Tämän jälkeen kappaleessa 3.2.1 esitellään liukulaakerin mallinnusprosessi SolidWorks ohjelmalla. Luvun lopussa esitellään, miten Microsoft Excel taulukkolaskentaohjelma toimii konfiguraattorina kuulalaakerin mallille, sekä tarkastellaan saatuja tuloksia.

#### 3.1 Liukulaakerin esittely

Laakerit yleisesti mahdollistavat esimerkiksi koneiden käytön erittäin korkeilla nopeuksilla ja kantamaan hyvin suuria kuormia vähäisellä työllä. Tämä tapahtuu rajoittamalla suhteellinen liike halutuksi liikkeeksi ja vähentämällä liikkuvien osien välistä kitkaa. Liukulaakereita käytetään yleisesti matalan nopeuden sovelluskohteissa. Ne tarvitsevat voitelua kulumisen ja kitkan vähentämiseksi. Kitkakertoimet liukulaakereille ovat luokkaa 0,05–0,1. Liukulaakereilla on joskus intergroidut laipat, jotka tukevat myös aksiaali-kuormia. Laakerit valmistetaan useimmiten eri metalliseoksista kuten pronssista, kuparista tai alumiinista. Niitä valmistetaan myös polymeereistä ja keraameista. (Sarna 2014) Liukulaakerin päämitat ovat esitetty yksinkertaisella mallilla kuvassa 3.



**Kuva 3.** Liukulaakerin päämitat ovat keskireiän halkaisija  $d$ , ulkohalkaisija  $D$  ja leveys  $B$ .

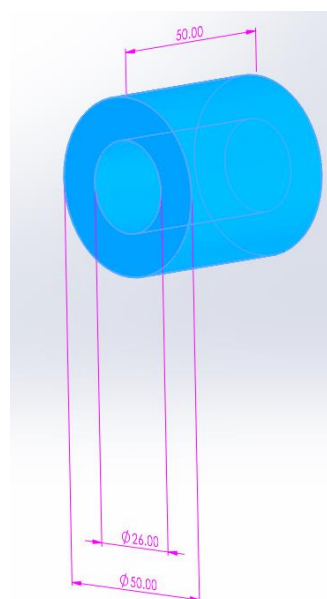
### 3.2 Liukulaakerin parametrinen mallinnus SolidWorksissä

Liukulaakerin mallia on jonkin verran yksinkertaistettu todellisesta rakenteesta. Välyksen mitoitus on myös hyvin tapauskohtaista. Esimerkiksi alhaisilla nopeuksilla toimivat moottorit voivat usein toimia suuremman välyksen avulla, kun taas korkeilla nopeuksilla välyks ei välttämättä saa olla liian suuri ja leveät liukulaakerit tarvitsevat suurempaa välystä, että öljyn saa ulos (Yung 2016). Yungin esittämän totuuden vuoksi mallissa on annettu vaihtoehto valita välyksen koko itse, mutta mikäli välyksen haluaa eikä tiedä sen kokoa, käytetään välyksen mitoittamiseen yleistä nyrkkisääntöä ”tuhannesosa plus yksi per sisähalkaisija tuumina”. Tämä automaattisesti mitoitettun välyksen koko on esitetty kaavassa 1.

$$\frac{1}{1000} + \frac{d}{25.4}, \quad 1$$

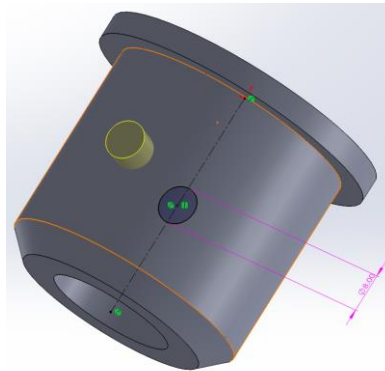
missä d on keskireiänhalkaisija.

Älykkäästi mallinnettaessa malliin lisätään yksi ominaisuus kerrallaan, siinä järjestyksessä missä parametrien riippuvuudet toisiinsa tulee. Ei siis mallinnetta ensiksi laippaa ja sen jälkeen pohjageometriaa. Mallintaminen toteutetaan järkevästi mallintamalla pohjageometria aluksi. Pohjageometriaan kuuluu laakerin keskireiänhalkaisija, ulkohalkaisija ja leveys. Mallinnettaessa kaikki tärkeät laakerin parametrit nimetään oikeiden nimiensä mukaisesti, jolloin mallin konfiguroiminen on loogista. Kuvassa 4 on esitetty liukulaakerin pohjageometria, jonka parametrit ovat nimetty mallissa loogisesti: leveys, keskireiänhalkaisija ja ulkohalkaisija.



**Kuva 4.** Liukulaakerin pohjageometria.

Malliin lisätään tämän jälkeen halutut ominaisuudet yksi kerrallaan. Suunnittelussa olisi syytä huomioida mallin tulevat variaatiot, mikä tarkoittaa mallintamista rajoitusten ja ehtojen mukaisesti. Esimerkiksi öljyreian pitää mallin leveyden mukaisesti liikkua, jolloin annetaan öljyreialle ehto, että sen pitää sijaita leveyden puolella välissä, eikä anneta vakioetäisyyttä öljyreialle laakerin mallin toisesta päästä. Luodaan akseli, joka on kiinni laakerin toisessa päässä ja jonka pituus muuttuu laakerin leveyden muuttuessa. Öljyreian keskipiste on Midpoint-rajoitteen mukaan asetettu keskelle laakerin akselia, jolloin laakerin leveyttä muutettaessa, öljyreikä liikkuu laakerin leveyden keskipisteen mukaisesti. Kuvassa 5 on esitetty, miltä tämä käytännössä näyttää mallissa.



**Kuva 5.** Öljyreian sijoittaminen parametriseen malliin.

Kaikkien haluttujen ominaisuuksien, rajoitteiden ja ehtojen lisäämisen jälkeen malli on konfigurointia vaille valmis.

### 3.3 Konfigurointi Excelissä

Excelin avulla konfiguroiminen alkaa luomalla Excel-taulukko, jossa on kaikki halutut mallinnetun kappaleen ominaisuuksien nimet ja mitat, joita käyttäjä konfiguroi. Kuten liukulaakerin esittelykappaleessa esiteltiin, liukulaakerin tärkeimmät konfiguroitavat parametrit ovat laakerin keskireiänhalkaisija, ulkohalkaisija ja leveys. Tämän lisäksi käyttäjä voi määrittellä haluaako hän laakeriin viisteen, öljyreian, öljyuran ja automaattisen vai omamitoitetun välyksen. Öljyreian mitoittaminen on aina tapauskohtaista, joten käyttäjän täytyy itse määrittellä öljyreian halkaisija. Konfiguraattori toimii yksinkertaisilla komennoilla. Käyttäjää antaa yksinkertaisesti arvon nolla, mikäli hän halua jonkun ominaisuuden esiintyvän laakerissa ja arvon yksi, mikäli hän ei halua kyseistä ominaisuutta. Konfiguraattorin käyttöliittymä on syytä tehdä mahdollisimman yksinkertaiseksi, mutta riittävän kattavaksi. Käyttöliittymään voidaan periaatteessa viedä mitä vain tietoa, mutta sen selkeyden takaamiseksi vähempi määrä tietoa on useimmiten parempi. Kon-

figuraattorin vihreät laatikot, joihin käyttäjä antaa haluamansa arvot, ovat määritelty hyväksymään vain numeerisia arvoja. Konfiguraattorin käyttöliittymä (UI, user interface) on esitetty kuvassa 6.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1										
2		Kaikki mitat ovat millimetrejä								
3										
4		Leveys				50				
5		Ulkohalkaisija				50				
6		Keskireiänhalkaisija				25				
7		Viisteellinen (0) vai viisteetön (1)				0				
8		Öljyreikälinen (0) vai reiätön (1)				0	Öljyreiän halkaisija		6	
9		Öljyurallinen (0) vai uraton (1)				0				
10		Automaattinen välys (0) vai oma välys (1)				0 oma välys			2	
11										
12		EHDOT:								
13		Öljyreiän halkaisijan tulee olla pienempi kuin leveyden.								
14		Öljyuran ja öljyreiän yhdistäminen vaatii, että leveys on n. 5mm suurempi kuin öljyreiän.								
15		Öljyreiän halkaisijan tulee olla suurempi kuin keskireiänhalkaisija.								
16										

**Kuva 6.** Liukulaakerin konfiguraattorin käyttöliittymä Excelissä.

Excel konfiguraattori toimii Solidworksin Design Tablen kanssa tuomalla arvoja konfiguraattorista Design Tableen. Kun Design Table on luotu, täytyy suunnittelijan tehdä muutoksia siihen. Sillä Design Table on Excel-tiedosto, se toimii Excelin komentojen mukaisesti. Siinä voidaan hyödyntää yksinkertaisia *if*-lauseita, mutta tämän lisäksi myös hyvinkin komplekseja ratkaisuja niin kauan kuin ne ovat Excelin rajoitteiden mukaisia.

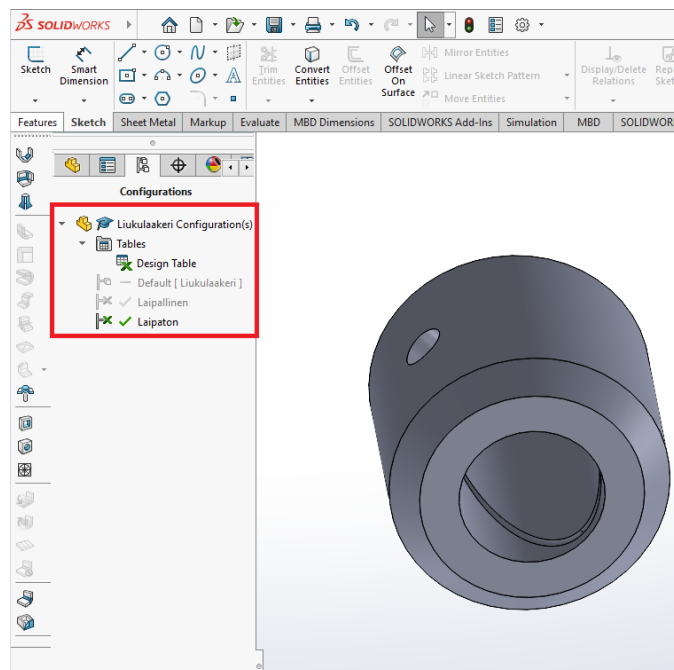
Design Table käsketään lukemaan käyttäjän konfiguraattoriin antamat arvot ja niiden avulla lasketaan kaikki rajoitteet, ehdot ja ominaisuudet. Joka kerta kun käyttäjän syöttää haluamansa arvot Exceliin, täytyy annetut arvot päivittää Solidworksin Design Table ominaisuuden Excel taulukkoon. Käyttäjän ei tarvitse Design Tablelle tehdä mitään, sillä suunnittelija on tehnyt tarvittavat laskutoimitukset, jotka päivittävät parametrit automaattisesti, kun Design Table avataan. Kuvassa 7 on esitelty valmis Design Table.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R		
1	Design Table for: Part1																			
2		Sisähalkaisija@Sketch1		Ulkohalkaisija@Sketch1	D1:@Boss-Extrude1	Laipan_levyys@Sketch2	Laipan_levy@Boss-Extrude2	Viisteen_levyys@Chamfer1	viisteen_levyys_2@Chamfer2	\$\$STATE@Chamfer2	\$\$STATE@Boss-Extrude2	\$\$STATE@Chamfer1	valys_ulompinnitta@sketch4	valys_sisempinnitta@sketch4	\$\$STATE@valys	\$\$STATE@oliyrella	\$\$STATE@oliyryra	\$\$STATE@oliyvura	oliyvuran_halkaisija@sketch6	
3	Laipaton	##	430	165	43		16.5	17	17	1	S		1	1.4	1	1	0	0	0	20
4	Laipallinen	##	430	165	43		16.5	17	17	S	U		1	1.4	1	1	0	0	0	20
5																				
6																				
7																				
8																				
9																				
10																				
11																				
12		suhde		1.379035981																
13																				
14		Käyttäjän antama oma välys			8															
15		oma välys (1) vai automaattinen (0)			0															
16		Keskireiän halkaisija			300															
17		Automaattinen välyksen koko			11.81202362															

**Kuva 7. Design Table Solidworksissä.**

Jotkut konfiguroitavat ominaisuudet, kuten tässä liukulaakeri esimerkissä laipan voi tehdä käyttäjän määrittelemäksi Solidworksin konfigurointivalikosta. Nämä ominaisuudet kuvastavat erilaisia konfiguraatio vaihtoehtoja, joita käyttäjä voi valita. Kuvassa 10 on esitelty, miten käyttäjä valitsee laipan parametrin. Tämä konfigurointi valinta saadaan Solidworksin konfigurointi välilehdelle Design Tablen avulla yksinkertaisesti kirjoittamalla uudelle riville A-sarakkeessa vapaavalintainen nimi konfiguroinnille ja määrittelemällä riiville uudet arvot jokaiseen sarakkeeseen, jossa on jokin parametri. Solidworks muodostaa tämän jälkeen automaattisesti uuden konfiguraation konfiguraatio valikkoon.



**Kuva 8. Laipan määrittäminen.**

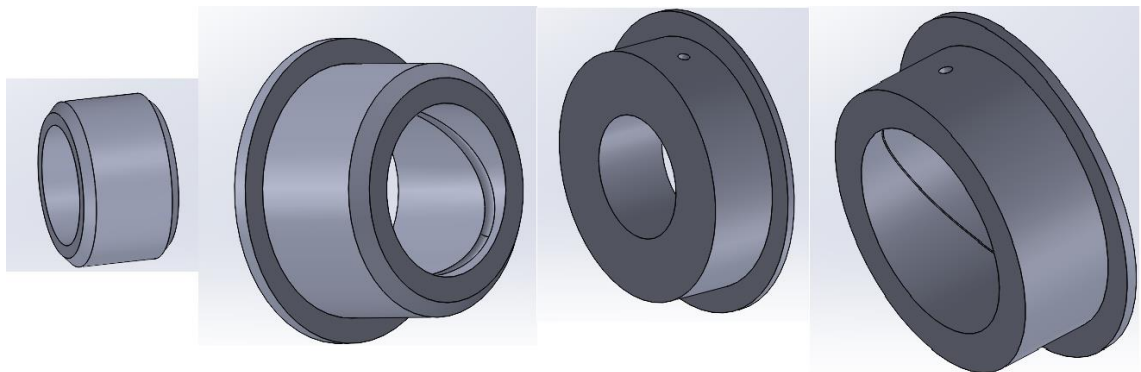
### 3.4 Tulokset ja niiden tarkastelu

Tarkastellaan konfiguraattorin toimintaa neljän mallituotteen kanssa. Mallituotteiden parametrit eroavat toisistaan ja näiden esimerkkeinä toimivien laakereiden parametrit näkyvät taulukossa 1 ja valmiit kustomoidut laakerien mallit näkyvät kuvassa 9. Konfiguraatiot ovat muodostettu hyödyntämällä aikaisemmin esiteltyä liukulaakerin Excel-konfiguraattoria ja Solidworksin konfigurointivalikkoa, joista jälkimmäisen avulla on määritetty laipan parametri. Näin muutettiin teknisen tuotteen parametreja konfiguroimalla sen mallia.

**Taulukko 1.** Neljän konfiguroitavan tuotteen parametrit.

	Leveys (mm)	Ulkohalkaisija (mm)	Keskireiänhalkaisija (mm)	Välys	Välkyksen koko (mm)	Laippa	Öljyura	Öljyreikä	Öljyreiän halkaisija (mm)	Viiste
Tuote 1	6	10	7	Automaattinen	0.276590551	Ei	Ei	Ei	-	Kyllä
Tuote 2	22	38	25	Määritetty	1	Kyllä	Kyllä	Ei	-	Kyllä
Tuote 3	105	340	160	Määritetty	8	Kyllä	Ei	Kyllä	16	Ei
Tuote 4	165	430	300	Automaattinen	11.81202362	Kyllä	Kyllä	Kyllä	20	Ei

Taulukkoon 1 on merkitty neljä erilaista liukulaakeri konfiguraatiota. Parametrien arvot on pyritty määrittelemään todellisten liukulaakerien dimensioiden ja parametrien mukaisesti. Määritetyt parametrit huomioivat myös mallin ja konfiguraattorin rajoitukset ja ehdot.



**Kuva 9.** Konfiguroidut tuotteet järjestyksessä.

Solidworksin Design Table ominaisuuden ja Excelin yhdistäminen konfigurointiin on helppo ja käyttäjäystävällinen tapa konfiguroida tuotteita. Tätä konfigurointi tyyliä voidaan hyvin soveltaa asiakaskeskeisessä myynnissä, jossa asiakas lähettää muokatun Excel-tiedoston yritykselle ja kertoo lisäominaisuudet. Konfiguraattorina tämä menetelmä on kuitenkin huono massakustomoinnin näkökannalta, jossa asiakkaalle halutaan tehdä konfiguraattori, joka antaa välittömän palautteen, eli 3D- ja/tai 2D-mallin, kun asiakas on syöttänyt arvot. Voidaan siis todeta, että tämä konfigurointimenetelmä

tukee osittain globalisoituvan teollisuuden ja markkinoiden vaatimuksia. Menetelmä sopii projektikohtaiseen konfigurointiin, mutta se ei sovellu massakustomointiin.

Laipan määrittämisen voisi tehdä niin, että Design Table lukee Excel-tiedostosta arvon, joka määrittää, että muodostetaanko laippa vai ei. Työssä kuitenkin näytettiin, että tällaisen konfigurointi tavan, jossa hyödynnetään Solidworksin konfigurointivalikkoa, yhdistäminen Excel konfigurointiin on mahdollinen. Tämä konfiguraatiovalikon hyödyntäminen Excel konfiguroinnin sijaan on jopa parempi vaihtoehto, kun halutaan esimerkiksi niin kutsuttu master tiedosto esimerkiksi ruuveista. Näissä master tiedostoissa konfiguraatiovalikossa on useimmiten kaikki eri standardiruuvityypit lueteltuna ja sen käyttäminen on hyvin käytännöllistä ja helppoa. Suunnittelijan ei tarvitse tietää muuta kuin ruuvien nimi. Tämänkin master tiedoston konfigurointivalikko Solidworksissä tehdään mahdolliseksi Design Tablen avulla.

Konfiguraattorit kappaleessa käsiteltiin konfiguraattorien ongelmia. Kristjansdottir et al. (2018, s. 12–13) määrittämiä mahdollisia ongelmia tietotekniikka, tuotemallinnus, organisatoriset, resurssirajoitteet, tuotteeseen liittyvät ja tiedonhankinta voidaan myös havaita olevan työssä esitetyssä konfiguraattorissa. Mikäli käyttäjän tietotekniset taidot ovat erittäin heikot voidaan päätyä ongelmatilanteisiin konfiguraattorin käytön kanssa. Mikäli konfiguraattoriin viedyt arvot eivät ole ohjeistuksen mukaisia, ei konfiguraattori toimi. Tämän takia aiemmassa kappaleessa esiteltiin, että konfiguraattorin olisi syytä olla mahdollisimman yksinkertainen ja selkeä. Tuotemallinnus ja sen liittäminen konfiguraattoriin voi myös olla ongelmallista, jos konfiguraatiota tekevä insinööri ei ole pätevä. Toisaalta voidaan myös havaita, että tuotemallinnus ongelmat voivat ilmetä myöhemmin. Luvussa esitelty konfiguroimismetodi voi olla ongelmallinen, jos mallia ja sen konfigurointeja joudutaan muokkaamaan perin pohjin ilman, että tämän työn tehnyt insinööri olisi edelleen yrityksen käytettävissä muokkaamassa sitä. Tämän ongelman voisi tosin ehkäistä, mikäli suunnittelija käyttää hyvää konfigurointi etikettiä ja toteuttaa konfiguraattorin ja Design Tablen niin selkeäksi, että periaatteessa kuka tahansa insinööri voisi muokata niitä.

Työssä esitelty konfigurointimenetelmä toteuttaa tuotekonfigurointi luvussa käsitellyjä vaatimuksia. Konfiguraattorin avulla pystytään sisällyttämään yhteensopivien komponenttien valitsemisen ennalta määritellyistä kokonaisuuksista. Konfigurointimenetelmä tukee myös mallin ja sen konfiguroinnin kehittämistä ja ylläpitoa, sillä siihen voidaan ja määritelläänkin konfigurointisääntöjä ja -rajoituksia.

## 4. YHTEENVETO

Tutkimuksen päätavoitteina oli selvittää, miten teknisten tuotteiden parametreja voidaan muuttaa konfiguroimalla mallia ja ymmärtää konfiguraation hyödyt, välttämättömyys ja tärkeys massakustomoinnin ja projektikohtaisen konfiguroinnin kehityksen kannalta. Konfiguroinnin haasteita ja ongelmia tutkittiin myös sekä konfiguraation tulevaisuutta. Näiden lisäksi pyrittiin selvittämään Microsoft Excelin soveltuvuus Solidworksin kanssa ja tarkastella globalisoituvan teollisuuden ja markkinoiden vaatimusta konfiguroinnille. Työssä onnistuttiin selvittämään konfiguroinnin välttämättömyys ja tärkeys. Työn kolmas luku tuo esille konfiguroinnin hyötyjä ja siinä osoitetaan teknisen tuotteen parametrien muokkaus konfiguroimalla hyödyntäen Exceliä ja Solidworksiä. Se tuo esille sen, kuinka suhteellisen vähäisellä vaivalla voidaan tehdä mallin parametreista eläviä, mikä helpottaa huomattavasti mallin uusiokäyttöä ja sen muokkaamista. Siinä tutkittiin myös kahta erilaista konfigurointimenetelmää hyödyntämällä Solidworksiä ja Exceliä, joilla onnistuttiin luomaan konfiguraattori ja neljä erilaista konfiguraatiota tekniselle tuotteelle. Kolmannessa luvussa todettiin myös oikeaoppisen mallintamismenetelmän hyödyntämisen tärkeys konfiguroimisessa. Eri komponenttien väliset ehdot ja rajoitukset konfiguroinnissa täytyy tunnistaa ennen mallintamisen aloittamista. Hyvällä mallinnustekniikalla toteutettu malli ennalta ehkäisee mahdollisia ongelmia konfiguraatioissa. Parametrien ja ominaisuuksien yleinen huono sijoittaminen ja huono mallinnusstrategia vaikeuttavat merkittävästi konfigurointiprosessia.

Tutkimuksessa todetaan, että konfigurointi on keskeinen teknologia, jolla toteutetaan massakustomointia ja projektikohtaista konfigurointia. Parametrinen mallintaminen on olennainen osa konfigurointia ja konfigurointi perustuu parametrien muokkaamiseen. Älykkäällä parametrisella 3D CAD-mallinnuksella ja sen konfiguroinnilla voidaan saada mittavia hyötyjä. Tutkimus osoittaa, että globaalien markkinoiden vaatimusten kasvassa, oikein hyödynnettynä konfiguroiminen tuottaa asiakasarvoa ja se lisää myyntiä, vähentää toimitusaikoja, parantaa toimituksien ajallaan olemista ja vähentää hintoja. Konfigurointi liittyy olennaisesti konfiguraattoreihin ja niistä saatavat hyödyt ovat myös mittavia. Tutkimuksessa saatiin selville, että konfiguraattorit, itse konfiguroinnin hyötyjen lisäksi, tuovat lisäarvoa yrityksille. Tuotekonfiguraatiovirheiden väheneminen, suunnittelijoiden ja prosessi-insinöörien parantuneen keskittymisen yrityksen tuotteiden ja prosessien asteittaisiin ja innovatiivisiin parannuksiin sekä parannettujen tuote- ja prosessiratkaisujen nopeampi käyttöönotto havaittiin parantuneen konfiguraattorien avulla.

Tämän seurauksena konfiguroiminen ja konfiguraattorit ovat jopa vaatimus massakustomoinnin, projektikohtaisen konfiguroinnin ja globaalien markkinoiden kannalta. Tärkeitä massakustomoinnin kannalta ovat erityisesti konfiguraattorien mahdollistamat tuotekatalogit. Konfiguraattorit mahdollistavat asiakkaiden paremman osallistumisen konfigurointiprosessiin ja menestyksekkään massakustomoinnin tärkeä elementti on onnistunut ja oikeaoppinen tuotekonfiguraattorien käyttö.

Tutkimuksessa selvitettiin, että tulevaisuudessa konfiguroinnin merkitys tulee todennäköisesti jatkamaan kasvuaan. Tämä perustuu jatkuvaan koneällyn kehitykseen ja suunnittelun automatisointiin. Myös totuus insinööriyön kalliista kustannuksista ja konfiguroinnin lukuisista hyödyistä puoltaa konfiguroinnin merkityksen kasvamista. Tutkimuksessa löydettiin useita haasteita ja ongelmia konfiguroinnille. Ne olivat asiakkaat, konfiguroinnin rajoitteet, tietotekniikka, tuotemallinnus, organisatoriset ongelmat, resurssirajoitteet, tuotteeseen liittyvät ongelmat ja tiedonhankinta. Vaikka konfiguroiminen ei ole täysin haasteeton asia, tulevaisuudessa näistä ongelmista tullaan todennäköisesti pääsemään yli, jolloin konfigurointi tulee todennäköisesti yleistymään standardiksi yrityksille. Tätä väitettä puoltavat konfiguroinnin hyödyt, jotka ovat liian suuria, että edes sen harkitsemisen voisi jättää pois. Tällä hetkellä konfigurointi ei kuitenkaan ole vielä niin kehittynyttä, että insinööritaidon tarvetta voitaisiin sen avulla ryhtyä radikaalisti vähentämään. Jatkotutkimusaiheena voitaisiin selvittää lisää konfiguroinnin tulevaisuudesta, miten erilaisia koneällyn ja suunnittelun automatisointiin liittyviä menetelmiä voitaisiin hyödyntää konfigurointiprosessissa. Työn hyötynä voidaan nähdä selvitys konfiguroinnin ja konfiguraattorien hyödyistä sekä Excelin hyödyntäminen SolidWorksissa kahden erilaisen konfigurointimenetelmän yhdistämisellä. Konfiguraation tulevaisuuden näkymien tutkiminen jää tutkimuksessa vähemmälle huomiolle, kuin mitä alun perin oli suunniteltu, erittäin rajatun kirjallisuuslähdemäärän takia.

## LÄHDELUETTELO

Aldanondo, M. & Vareilles, E. (2008). Configuration for Mass Customization: How to Extend Product Configuration Towards Requirements and Process Configuration. *Journal of intelligent manufacturing* 19.5: 521–535. Web.

Babu, V S. & Abubacker K M. (2018). Development of Involute Profiled Spur Gear Model with Excel Spreadsheet, Solidworks and CAD Technique. *International Journal of Mechanical Engineering*: 5–11. Web.

Boucher, Q., Abbasi, E. K., Hubaux, A., Perrouin, G., Acher, M. & Heymans, P. (2012). Towards more reliable configurators: A re-engineering perspective. *2012 Third International Workshop on Product Line Approaches in Software Engineering (PLEASE)*. IEEE.

Brown, D.C. (1998) Defining configuring. In *Artificial Intelligence in Engineering Design, Analysis and Manufacturing, Special Issue on Configuration Design*, Vol. 12, No. 4, Cambridge University Press, USA. pp. 301–305 Saatavissa (viitattu 13.3.2022): <http://web.cs.wpi.edu/~dcb/Config/EdamConfig.html>

Camba, J. D., Contero, M., & Company, P. (2016). Parametric CAD Modeling: An Analysis of Strategies for Design Reusability.” *Computer aided design* 74: 18–31.

Cmstat, A Brief History of Configuration Management Software. (2022). Saatavissa (viitattu 12.3.2022): <https://cmstat.com/cmsights-news-posts/a-brief-history-of-configuration-management-software>

Dadalau, A. (2021). Meshparts: easy - precise - simulate. Meshparts, saatavissa (viitattu 12.3.2022): <https://www.meshparts.de/en/blog/A-short-history-of-CAD-and-FEA-development>

Dugan, U. (2016). *Solid Modeling and Applications Rapid Prototyping, CAD and CAE Theory*. 1st ed. Cham: Springer International Publishing

H. Cheong, M. Ebrahimi, A. Butscher & F. Iorio. (2019). Configuration Design of Mechanical Assemblies using an Estimation of Distribution Algorithm and Constraint Programming,” *2019 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, pp. 2339-2346, doi: 10.1109/CEC.2019.8789944.

Heiskala, M., Tiihonen, J., Paloheimo, K. & Soininen, T. (2007). Mass Customization with Configurable Products and Configurators: A Review of Benefits and Challenges. Pp. 1–32 in *Mass Customization for Personalized Communication Environments: Integrating Human Factors*.

Hotz, L., Felfernig, A., Günter, A. & Tiihonen, J. (2014). Chapter 2 - A Short History of Configuration Technologies. Knowledge-Based Configuration. Elsevier Inc. 9–19. Web.

Hvam, L., Haug, A., Mortensen, N. H. & Thuesen, C. (2013) Observed benefits from product configuration systems." *International Journal of Industrial Engineering (Online)* 20.5-6 pp. 329–338.

Junker, U. (2006). Configuration. *Foundations of Artificial Intelligence*, 2(C), 837–873. [https://doi.org/10.1016/S1574-6526\(06\)80028-3](https://doi.org/10.1016/S1574-6526(06)80028-3)

Karagulle, H. (2018) Design Automation of Metal Scrap Balers by Integration of SolidWorks with Excel and VisualBASIC Language. *International journal of engineering research & technology (Ahmedabad)* 7.8

Kristjansdottir, K., Shafiee, S., Hvam, L., Bonev, M. & Myrodiya, A. (2018) Return on Investment from the Use of Product Configuration Systems – A Case Study. *Computers in industry* 100 pp. 57–69.

Kristjansdottir, K., Shafiee, S., Hvam, L., Forza, C. & Mortensen, N. H. (2018) The Main Challenges for Manufacturing Companies in Implementing and Utilizing Configurators. *Computers in industry* 100, pp. 196–211.

Lexico.com. (2022). Configuration, saatavissa (viitattu 19.2.2022): <https://www.lexico.com/definition/configuration>

Martin, D. (2021). What is CAE?, PTC, saatavissa (viitattu 12.3.2022): <https://www.ptc.com/en/blogs/cad/what-is-cae>

Mesihovic, S. & Malmqvist, J. (2000). Product data management (PDM) system support for the engineering configuration process." *14th European Conference on Artificial Intelligence ECAI 2000 Configuration Workshop August*.

Mittal, S. & Frayman, F. (1989). Towards a generic model of configuration tasks. *International Joint Conference on Artificial Intelligence, IJCAI-89, Vol. 2, pp. 1395–1401*.

- Mäkipää, M., Paunu, P. & Ingalsuo, T. (2012). Utilization of design configurators in order engineering." *International Journal of Industrial Engineering and Management* 3.4 pp. 223.
- Ongkodjojo, S. & Gunawan, H. (2006). 3D parametric modeling for product variants with Study case on flatbed conveyor." *Petra Christian University, Yogyakarta*.
- Ostrosi, E. & Salima, T. B. (2009). Generalised Design for Optimal Product Configuration." *International journal of advanced manufacturing technology* 49.1–4 pp. 13–25.
- Pakkanen, J., Juuti, T. & Lehtonen, T. (2016). Brownfield Process: A Method for Modular Product Family Development Aiming for Product Configuration.
- Pulkkinen, A. (2007). Product Configuration in Projecting Company: The Meeting of Configurable Product Families and Sales-Delivery Process. Tampere University of Technology, Tampere.
- Trivedi, R. D., Shah, D. B., Patel, K. M. (2013). 3D Parametric Modeling for Product Variants Using Case Study on Inner Ring of Spherical Roller Bearing. Nirma University, Ahmedabad
- Sinz, C., Haag, A., Narodytska, N., Walsh, T., Gelle, E. & Sabin, M. et al. (2007). Configuration." *IEEE intelligent systems* 22.1 pp. 78–90.
- Sarna, S. Bearing Basics and Types of Bearings, IspatGuru, (2014). Saatavissa (viitattu 14.3.2022): <https://www.ispatguru.com/bearing-basics-and-types-of-bearings/>
- Slavomir, B. & Rauch, E. (2018). Modeling and Application of Configuration Complexity Scale: Concept for Customized Production." *International journal of advanced manufacturing technology* 100.1-4 pp. 485–501.
- Smith, P. G., & Reinertsen, D. G. (1997). Developing products in half the time. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Thomasnet, The History - and Future - of CAD/CAM Technology. (2019). Saatavissa (viitattu 12.3.2022): <https://www.thomasnet.com/insights/the-history-and-future-of-cad-cam-technology/>
- Trentin, A., Perin, E. & Forza, C. (2012). Product Configurator Impact on Product Quality. *International Journal of Production Economics*, pp.850–59. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.10.023>.



Yung, C. (2016). Sleeve bearing clearance depends on many factors, Plant Engineering, saatavissa (viitattu 25.3.2022): <https://www.plantengineering.com/articles/sleeve-bearing-clearance-depends-on-many-factors/>

Zeng, F. S. & Jin, Y. (2007). Study on Product Configuration Based on Product Model.” International journal of advanced manufacturing technology 33.7 pp. 766–771.

Zhang, L. L. (2014). Product configuration: a review of the state-of-the-art and future research, International Journal of Production Research, 52:21, pp. 6381-6398, DOI: [10.1080/00207543.2014.942012](https://doi.org/10.1080/00207543.2014.942012)