

Mikko Hokajärvi

MALLIPOHJAINEN MÄÄRITTELY TEOLLISUUDESSA

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Mikko Vanhatalo
Huhtikuu 2022

TIIVISTELMÄ

Mikko Hokajärvi: Mallipohjainen määrittely teollisuudessa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikka
Huhtikuu 2022

Mallipohjainen määrittely (MBD, Model based definition) tarkoittaa sitä, että kaikki tuotemäärittelytieto liitetään suoraan tuotteen 3D-malliin. Tällöin tuotteesta ei tehdä erillisiä piirustuksia, jolloin saavutetaan merkittäviä hyötyjä yrityksen eri osissa.

Tässä kandidaatintyössä selvitetään minkälaisia mahdollisuuksia MBD antaa yrityksen toiminnan tehostamiseen yrityksen eri osissa. Lisäksi esitetään miten yrityksen siirtyminen mallipohjaisen määrittelyn käyttöön tulisi toteuttaa.

Tehdyn kirjallisuuskatsauksen perusteella MBD:n käyttö tarjoaa merkittäviä mahdollisuuksia kehittää yrityksen toimintaa, mutta MBD:n käyttö ei silti vielä ole ongelmaton. Tämän takia MBD:n käyttö yrityksissä on vielä varsin vähäistä sillä yritykset odottavat, että MBD kehittyä ja sen käyttöön liittyviin ongelma-kohtiin saadaan ratkaisuja.

MBD:n kehitysasteen takia optimaalinen tapa hyödyntää MBD:tä tällä hetkellä on korvata sillä piirustusten käyttö yrityksen toiminnassa ilman että pyritään saavuttamaan täydellisesti kaikkia tässä työssä esitettyjä mahdollisuuksia. Tällöin saavutetaan suurin osa MBD:n hyödyistä, mutta investoinnit pysyvät kohtuullisina, kun kaikkia yrityksen laitteita ei tarvitse kerralla korvata uusilla.

Avainsanat: Mallipohjainen määrittely, MBD, tuotemäärittely, MBE

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. MALLIPOHJAINEN MÄÄRITTELY	2
2.1 Tekniikka	2
2.1.1 Peruseriaate	2
2.1.2 MBD standardissa SFS-ISO 16792	3
2.2 Tuotemäärittelyn tavat	5
2.3 Mallipohjainen yritys	6
3. KÄYTTÖ TEOLLISUUDESSA	9
3.1 Tuotesuunnittelu	9
3.2 Tuotanto	10
3.2.1 Koneistus	10
3.2.2 Valu	10
3.2.3 Ohutlevy	11
3.2.4 Kokoonpano	11
3.3 Laadunvalvonta	12
4. TIEDONSIIRTO	13
4.1 Tiedonsiirron merkitys	13
4.2 MBD-tiedonsiirron edut tavanomaiseen tiedonsiirtoon verrattuna	13
4.3 MBD-tiedonsiirron ongelmakohdat	14
5. MBD:N YRITYSKÄYTTÖ	16
5.1 Tausta	16
5.2 Valmistautuminen MBD:n käyttöönottoon	16
5.3 Siirtyminen mallipohjaiseen toimintaan	17
6. JOHTOPÄÄTÖKSET	20
LÄHTEET	21

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AR	engl. Augmented reality, lisätty todellisuus
CAD	engl. Computer-aided design, tietokoneavusteinen suunnittelu
CAM	engl. Computer-aided manufacturing, tietokoneavusteinen valmistus
CAX	engl. Computer-aided technologies, tietokoneavusteiset teknologiat
CNC	engl. Computer numerical control, tietokoneella numeerisesti ohjattu
MBD	engl. Model based definition, mallipohjainen määrittely
MBE	engl. Model based enterprise, mallipohjainen yritysmalli
OMI	engl. On Machine Inspection, CNC-koneeseen kytketty automaattinen laadunvalvontajärjestelmä
PLM	engl. Product life cycle management, tuotteen elinkaaren hallinta
PMI	engl. Product and manufacturing information, tuote- ja valmistustieto

1. JOHDANTO

Teollisuudessa tehokkuus on aina ollut ja tulee aina olemaan tärkeää koska aina halutaan saada laadukkaampia tuotteita nopeammin ja halvemmalla. Teollisuuden tuotannon ja tuotesuunnittelun tehokkuutta parantamaan on digitalisaation edetessä kehitetty paljon erilaisia ratkaisuja. Digitalisaation ja CAD-ohjelmien kehityksen seurauksena tuotedokumentoinnissa on siirrytty aiemmin käytetyistä paperille piirretyistä piirustuksista tämänhetkiseen toimintatapaan eli 3D-mallien ja niistä tehtyjen piirustusten käyttöön. (Quintana et al. 2010) Seuraavaa askelta tuotedokumentoinnissa ollaan kuitenkin jo ottamassa, sillä siirtyminen mallipohjaiseen määrittelyyn on jo käynnissä.

Mallipohjaisessa määrittelyssä 3D-malli on ainoa tuotedokumentti ja se sisältää kaiken tarvittavan tiedon. Mallipohjainen määrittely mahdollistaa digitalisaation ja automatisaation edistämisen kaikissa tuotteen elinkaaren vaiheissa minkä seurauksena tehokkuudessa voidaan päästä ennennäkemättömille tasoille. (Alemanni et al. 2010; Quintana et al. 2010)

Tässä kandityössä selvitetään kirjallisuuskatsauksen avulla mallipohjaisen määrittelyn kehityksen tilannetta ja sen käytön tarjoamia mahdollisuuksia teollisuuden toiminnan tehokkuuden parantamiseen. Tavoitteena tässä työssä on vastata seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

Miten yrityksen pitäisi valmistautua MBD:n käyttöönottoon?

Minkälainen prosessi MBD:n käyttöönotto on?

Luvussa 2 kerrotaan, miten mallipohjainen määrittely toimii ja millä tavalla sitä voidaan käyttää yrityksen toiminnassa. Luvussa 3 perehdytään mallipohjaisen määrittelyn käyttöön tuotteen elinkaaren eri vaiheissa. Luvussa 4 perehdytään mallipohjaisen määrittelyn käytön vaikutuksiin tiedonsiirtoon. Luvussa 5 esitetään, miten yrityksen siirtyminen mallipohjaisen määrittelyn käyttöön tapahtuu.

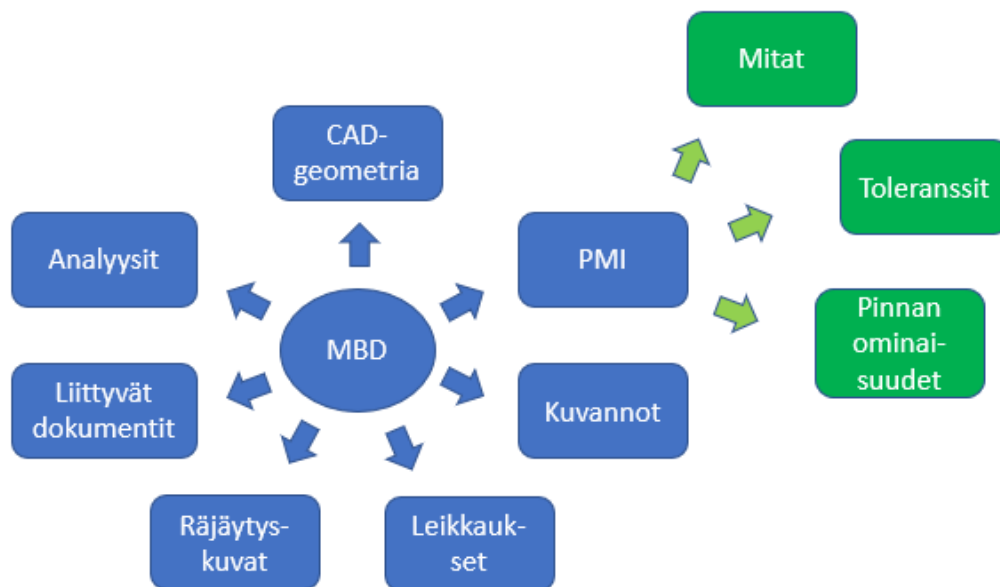
2. MALLIPOHJAINEN MÄÄRITTELY

2.1 Tekniikka

2.1.1 Perusperiaate

Mallipohjaisessa määrittelyssä eli MBD:ssä (Model based definition) tarkoituksena on liittää kaikki tuotemäärittelytiedot 3D-malliin. 3D-malliin liitetään kaikki tuotteen elinkaaren aikana tarvittavat tiedot, jolloin 3D-malli toimii ainoana tuotedokumenttina tiedonsiirrossa ja säilyttämisessä. Mallipohjaista määrittelyä käyttämällä pyritään välttämään perinteisesti käytettyjen piirustusten teko ja yksinkertaistamaan tiedonsiirtoa tuotteen elinkaaren jokaisessa vaiheessa. Tällä tavalla pyritään parantamaan tuotteiden laatua ja tuotannon tehokkuutta sekä lyhentämään aikaa, joka kuluu suunnittelun aloittamisesta tuotteen markkinoille tulon. (Quintana et al. 2010)

MBD:hen liittyy läheisesti PMI (Product and manufacturing information, tuote- ja valmistustiedot). PMI sisältää tuotteelle määritetyt mitat, toleranssit ja pinnanominaisuudet. MBD-malli sisältää PMI:n sisältämät tiedot mutta lisäksi siihen on määritetty muun muassa tuotteen geometria, räjäytyskuvat, leikkaukset ja tieto tuotteen materiaalista. (Rapinoja et al. 2016) MBD:n ja PMI:n välinen suhde on esitetty kuvassa 1.



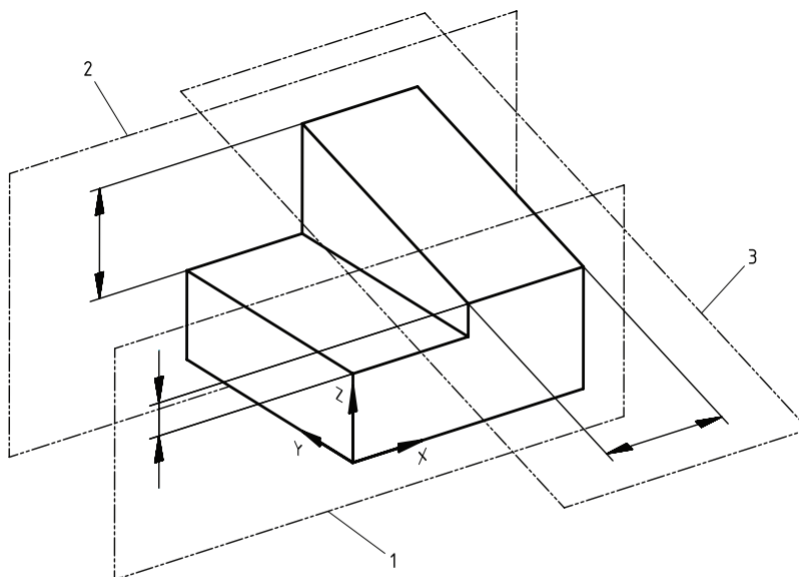
Kuva 1. MBD:n ja PMI:n välinen suhde (muokattu lähteestä Rapinoja et al. 2016 s. 2)

3D-malliin liitettäviä tuotteen mitoitukseen liittyviä tietoja kutsutaan annotaatioiksi. Annotaatiot lisätään malliin käyttäen CAD-ohjelman (Computer-aided design, tietokoneavusteinen suunnitteluohjelma) MBD-työkalua. Annotaatioiden MBD-malliin lisäämiseen liittyvät vaatimukset ja käytännöt määritellään standardissa SFS-ISO 16792 (Tekninen tuotedokumentointi. Digitaalista tuotemäärittelytietoa koskevat käytännöt).

2.1.2 MBD standardissa SFS-ISO 16792

Standardissa SFS-ISO 16792 (2021) määritellään digitaalista tuotemäärittelytietoa koskevat käytännöt. Se sisältää vaatimukset 3D-mallin ja digitaalisen 2D-piirustuksen yhdistetylle käytölle ja pelkän 3D-mallin käytölle tuotedokumentointiin. Tässä luvussa käsitellään kyseisessä standardissa määritettyjä vaatimuksia ja käytäntöjä vain pelkän 3D-mallin käytön osalta.

3D-mallin perustana toimii absoluuttinen koordinaatisto. Absoluuttisella koordinaatistolla tarkoitetaan mallin alkuperäistä koordinaatistoa ja tämän koordinaatiston perusteella määritetään digitaalisten elementtien sijainti mallissa. Annotaatiot määritellään 3D-malliin annotaatiotasolle, jotka määritellään absoluuttisen koordinaatiston suhteen. Annotaatiotasot määritellään joko kohtisuoraan absoluuttisen tai suunnittelijan määrittämän koordinaatiston kanssa tai muuhun tarpeelliseen asentoon. (SFS-ISO 16792 2021, s. 8, 13)



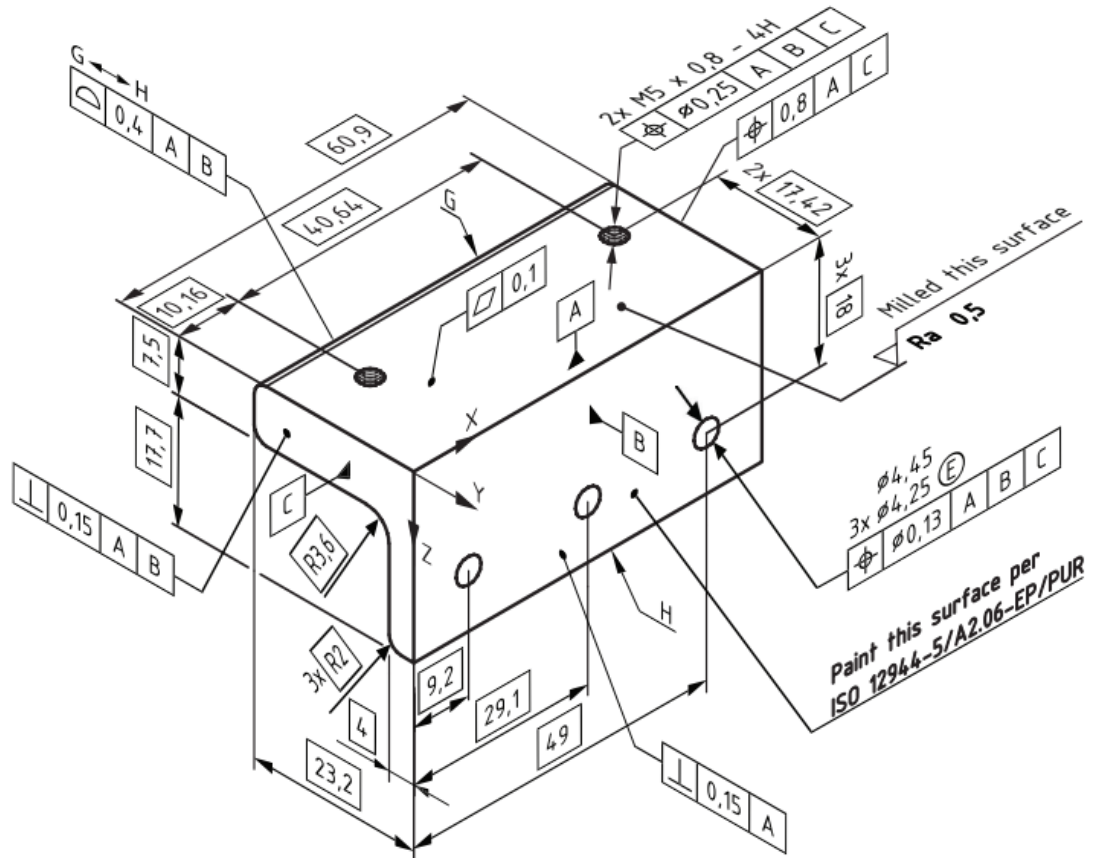
Selite

- 1 etuannotaatiotasoa absoluuttisen koordinaatiston suunnassa
- 2 taka-annotaatiotasoa absoluuttisen koordinaatiston suunnassa
- 3 annotaatiotasoa suunnassa, joka ei ole yhdensuuntainen absoluuttisen koordinaatiston kanssa

Kuva 2. Esimerkki 3D-mallin annotaatiotasosta (SFS-ISO 16792 2021, s. 14)

Annotaatioiden lisäämiseen malliin määritellään standardissa monia vaatimuksia. Vaatimukseen kuuluvat muun muassa vaatimus siitä, että kaikki mallin annotaatioissa esitettävät mitat tulevat mallista itsestään ja se, että annotaatio ei saa olla päällekkäin minkään muun annotaation kanssa, kun mallia katsotaan kohtisuoraan annotaatiotasoa vastaan. Annotaatiotekstejä ei myöskään saa sijoittaa suunnittelumallin päälle. (SFS-ISO 16792 2021, s. 12, 13)

Annotaatiot lisätään annotaatiotasolle niin että niiden luettavuus varmistetaan. Luettavuuden varmistamiseksi mallia käännettäessä on joko varmistettava, että annotaatioiden lukusuunta päivittyy mallin kääntämisen jälkeen, määritettävä oikea lukusuunta jokaiselle annotaatiotasolle tai käytettävä tallennettavia näkymiä niin että malli on oikeassa asennossa annotaatiotasoon oikean lukusuunnan mukaisesti. (SFS-ISO 16792 2021, s. 13)



Kuva 3. Malli, jonka kaikki annotaatiot ovat näkyviä (SFS-ISO 16792 2021, s. 25)

Kuten kuvasta 3 havaitaan mallin ymmärtämistä voi vaikeuttaa annotaatioiden suuri määrä. Tämän takia mallissa näytettäviä annotaatioita tulee olla mahdollista rajata haluttuihin annotaatioihin riippuen mallin käyttäjän tarpeista. Näkyvien annotaatioiden rajaaminen tapahtuu suodattamalla tietyn tyyppiset annotaatiot näkyviksi tai valitsemalla tietyt annotaatiot näkyviin. (SFS-ISO 16792 2021, s. 25, 26)

Annotaatioiden lisäksi 3D-malliin voidaan liittää myös attribuutteja. Attribuuteilla esitetään sellaisia tietoja, joiden esittäminen ei ole mahdollista annotaatioilla tai mallin geometrialla. Attribuutit voivat sisältää tietoa muun muassa kappaleen pinnoituksesta ja kierereistä ja -tapeista. (SFS-ISO 16792 2021, s. 31)

Standardissa esitetään myös vaatimus siitä, että mallista tulee olla mahdollista tehdä kyselyitä. Kyselyillä on mahdollista selvittää 3D-mallista sellaisia tietoja, joita mallissa ei suoraan näy annotaatioiden tai attribuuttien avulla. Kyselyillä voidaan yksittäisten mittojen lisäksi selvittää mallista myös muun muassa yksittäisen elementin tiedot, elementtien muodostaman ryhmän tiedot, sekä paljon muita tietoja. (SFS-ISO 16792 2021, s. 12, 35–37) Kyselyt ovat erityisen hyödyllisiä monimutkaisilla kappaleilla koska ne mahdollistavat sen, ettei kaikkien annotaatioiden tarvitse olla näkyvissä mallissa. Tämä selkeyttää mallia ja helpottaa sen lukemista.

Standardissa määritetään mallille pakolliset hallintatiedot, jotka tulee esittää mallissa. Mallin on muun muassa sisällettävä viittaus kyseiseen standardiin SFS-ISO 16792, suunnittelutoimen tunniste ja osa- tai tunnistenumero. Nämä tiedot on esitettävä annotaatiotasolla tai muulla vastaavalla menetelmällä niin että ne eivät käänny mallin mukana vaan niiden lukusuunta säilyy riippumatta mallin asennosta. (SFS-ISO 16792 2021, s. 17)

2.2 Tuotemäärittelyn tavat

Standardissa SFS-ISO 16792 (2021) tuotemäärittelytavat on jaettu viiteen luokituskoodiin, jotka määrittävät sen mitä tietoja käytettävän piirustuksen ja/tai mallin tulee sisältää. Tämä tuotemäärittelyyn käytettyjen tapojen jaottelu mahdollistaa myös yritysten jaottelun sen perusteella minkä luokituskoodin mukaan ne toteuttavat tuotemäärittelyn.

Taulukko 1. *Luokituskoodit standardin SFS-ISO 16792 (2021) mukaan.*

Luokituskoodi	Tuotemäärittely
Luokituskoodi 1	Pelkkä piirustus (fyysinen tai digitaalinen)
Luokituskoodi 2	Suunnittelumalli ja määrittelyt sisältävä piirustus
Luokituskoodi 3	Suunnittelumalli tai osittain annotoitu malli ja yksinkertaistettu piirustus
Luokituskoodi 4	Täysin annotoitu malli ja täydellinen piirustus
Luokituskoodi 5	Täysin annotoitu malli (ei piirustusta)

Taulukossa 1 on esitetty standardin SFS-ISO 16792 (2021) mukaiset luokituskoodit ja se miten minkäkin luokituskoodin mukaan toimittaessa tuotemäärittely tapahtuu. Taulukosta 1 nähdään että mallipohjaista määrittelyä käyttävät yritykset toimivat joko luokituskoodin 5 tai luokituskoodin 4 mukaisesti. Mallipohjaista määrittelyä voidaan käyttää myös luokituskoodin 3 mukaan toimivissa yrityksissä mallin osittaiseen annotointiin. Vaikka luokituskoodin 4 mukaan toimivat yritykset käyttävät mallipohjaista määrittelyä tuotemäärittelyssä eivät ne hyödynnä MBD:n täyttä potentiaalia koska niissä edelleen käytetään myös piirustuksia. Suurin hyöty mallipohjaisesta määrittelystä saadaan siirtymällä mallipohjaiseen yritystoimintaan eli toimimalla luokituskoodin 5 mukaisella tavalla.

2.3 Mallipohjainen yritys

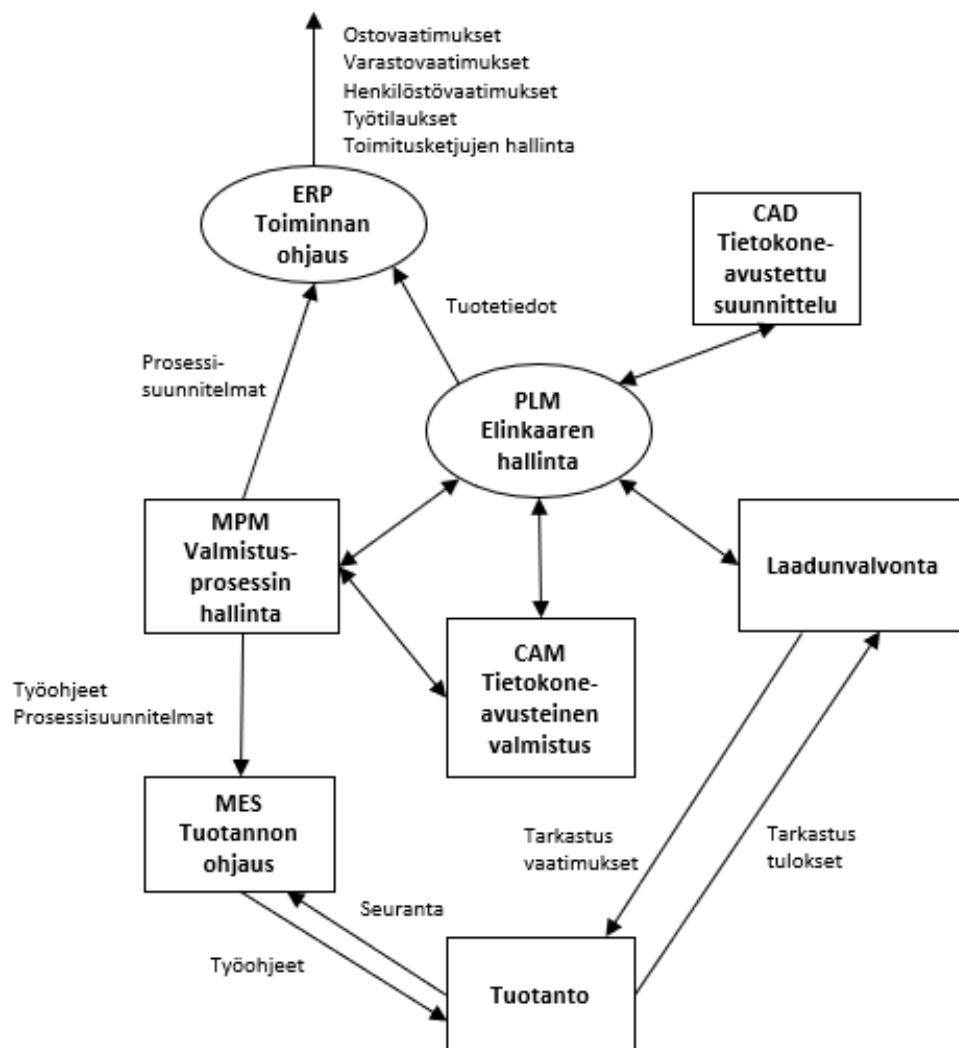
Mallipohjainen yritys eli MBE (Model-based enterprise) käyttää mallipohjaista määrittelyä kaikkien tuotemäärittelytietojen määrittelyyn. Mallipohjaisessa yrityksessä tuotteista ei tehdä lainkaan piirustuksia vaan kaikki tiedonsiirto niin yrityksen sisällä kuin myös yrityksen ulkopuolisten tahojen kanssa tapahtuu käyttäen ainoastaan MBD:n avulla luotuja täydellisesti annotoituja 3D-malleja. (Goher et al. 2021)

Mallipohjaisessa yrityksessä keskeisenä ajatuksena on, että tuotemäärittelytieto luodaan vain kerran. Tavoitteena mallipohjaisessa yrityksessä on, että tätä kerran luotua tietoa käytetään suoraan yrityksen eri osissa ilman että tietoja luotaisiin uudelleen manuaalisesti. (Frechette, 2011) Tähän tiedon uudelleen hyödyntämiseen liittyy tuotteen elinkaaren hallinta eli PLM (Product Lifecycle Management).

Tuotteen elinkaaren hallinnan tehtävä on hallita tuotemäärittelytietoa tuotteen elinkaaren ajan. Tämä tarkoittaa sitä, että PLM:n avulla ohjataan tuotemäärittelytiedon luomista,

käsittelyä ja jakamista. Tuotteen elinkaaren hallinta toteutetaan yleensä jollakin tietokoneohjelmalla. PLM-järjestelmä mahdollistaa tuotetietojen säilyttämisen ja jakamisen lisäksi myös muun muassa muutosten tekemisen tietoihin, käyttäjien oikeuksien määrittämisen ja tietojen varmuuskopioinnin. (Saaksvuori & Immonen 2008 s. 7–17)

MBD:n käyttö tuotteen elinkaaren hallinnassa on välttämätöntä MBD:n tehokkaan käytön mahdollistamiseksi yrityksen kaikessa toiminnassa. MBD:n käyttö PLM-järjestelmässä mahdollistaa tuotteen tuotemäärittelytiedon ajantasaisuuden ja yhdenmukaisuuden yrityksen kaikissa osissa (Rapinoja et al., 2016).



Kuva 4. Mallipohjaisen yrityksen toiminnot ja tiedonsiirto toimintojen välillä (muokattu lähteestä Frechette 2011)

Kuvassa 4 nähdään että elinkaaren hallinnan rooli mallipohjaisessa yrityksessä on hyvin merkittävä. PLM-järjestelmä on kuvan 4 mukaisesti ainoa tuotetiedonlähde kaikille yrityksen osille. Tämän lisäksi kuvassa 4 nähdään, minkälaisia eri toimintoja mallipohjaiseen yritykseen kuuluu ja miten yrityksen eri toiminnot ovat yhteydessä toisiinsa.

3. KÄYTTÖ TEOLLISUUDESSA

3.1 Tuotesuunnittelu

Tällä hetkellä ehdottomasti yleisin tapa tuotesuunnittelussa on, että tuotteesta tehdään 3D-malli CAD-ohjelmalla (Computer-aided design), minkä lisäksi tuotteesta tehdään 2D-piirustus, johon merkitään kappaleita määrittelevät tiedot. Tämä menettelytapa mahdollistaa inhimilliset virheet piirustusta tehtäessä ja sitä luettaessa. (Qin et al. 2020). Mallipohjaista määrittelyä käytettäessä erillisiä piirustuksia tuotteesta ei tehdä vaan tuotemäärittelytiedot liitetään suoraan tuotteen 3D-malliin (Wang et al. 2021). Tuotemäärittelytiedot sisältävät kappaleen mitat, toleranssit, peruselementit, 3D-annotaatiot, pinnanlaadut sekä tiedon materiaaleista (Rapinoja et al. 2016).

Vaikka mallipohjaisessa määrittelyssä tuotemäärittelytiedot liitetään suoraan 3D-malliin annotaatioiden lisääminen 3D-malliin ei ole nopeampaa kuin niiden lisääminen 2D-piirustuksiin. Tämä johtuu siitä, että annotaatioiden lisäämiseen käytetyt työkalut ovat hyvin samankaltaisia riippumatta siitä lisätäänkö annotaatioita 3D-malliin vai piirustukseen. (Quintana et al. 2010)

CAD-ohjelmien MBD-toiminnot sisältävät ominaisuuksia muun muassa mallin automaattiseen mitoitukseen ja tolerointiin. Nämä ominaisuudet eivät välttämättä toimi täydellisesti monimutkaisemmilla geometrioilla mutta niiden käyttö yksinkertaisimpia kappaleita määriteltäessä helpottaa ja nopeuttaa tuotesuunnittelua. Tämän lisäksi CAD-ohjelmiin on sisällytetty standardeja kuten ISO 16792. Tällöin standardien mukaisten piirteiden kuten reikien ja kierteiden määrittely on helppoa eikä niiden määrittelyyn kulu turhaan aikaa. (Varitis et al. 2020)

Mallipohjaisen määrittelyn käyttö helpottaa muutosten tekemistä tuotemäärittelytietoihin, koska tiedot voidaan päivittää suoraan tuotteen 3D-malliin, joka on automaattisesti ajantasaisena käytössä kaikissa organisaation osissa. Tällöin piirustusten päivittäminen ja vanhojen piirustusten poistaminen ei vie suunnittelijan työaikaa. 3D-mallin päivittyessä automaattisesti piirustusten vanhat versiot eivät myöskään johda virheellisten tuotteiden valmistamiseen. (Rapinoja et al. 2016)

3.2 Tuotanto

3.2.1 Koneistus

Koneistus on nimitys ainetta poistaville valmistusmenetelmille. Koneistuksessa kappale muokataan haluttuun muotoon poistamalla siitä materiaalia, kunnes se vastaa annettuja vaatimuksia. Koneistuksessa käytettyihin menetelmiin kuuluvat sorvaus, jyrsintä, poraus ja hionta. Tässä luvussa käsitellään sitä, miten mallipohjaista määrittelyä voidaan hyödyntää helpottamaan ja tehostamaan CNC-koneella (Computer Numerical Control) tehtävää koneistusta.

CNC-kone on tietokoneohjattu työstökone, jonka ohjaamiseen käytetään CAM-ohjelmaa (Computer-aided manufacturing, tietokoneavusteinen valmistus). CAM-ohjelmassa määritetään tuotteen CAD-mallia käyttäen G-koodi, joka sisältää työstöradat. 3D-mallin avulla kappaleen geometria saadaan CNC-ohjelmaan mutta malli ei usein sisällä toleranssidataa, vaan toleranssit joudutaan syöttämään ohjelmaan manuaalisesti 2D-piirustuksen perusteella. Ohjelmassa pyritään pääsemään toleranssialueen keskelle, jolloin toleransseja manuaalisesti syötettäessä joudutaan laskemaan toleranssialueen keski-kohta mikä altistaa ohjelmoinnin inhimillisille virheille. (Evans 2016; Rapinoja et al. 2021)

Mallipohjaista määrittelyä käytettäessä CAD-tiedosto sisältää tiedot toleransseista, jolloin ne siirtyvät suoraan CAM-ohjelmaan. Tällöin ohjelma pystyy itse määrittelemään työstöradan toleranssialueen keskelle. Toleranssidatan konelukeminen ei kuitenkaan onnistu kaikissa nykyisissä CAM-ohjelmistoissa vaan se rajoittuu pääosin CAD-ohjelmistoihin sisällytettyihin järjestelmiin. (Rapinoja et al. 2016)

3.2.2 Valu

Valuosien valmistus tapahtuu tekemällä halutun kappaleen mukainen muotti ja täyttämällä se sulatetulla materiaalilla, jolloin materiaali jää jähmettyessään muotin muotoon. Valuosan mallin suunnittelu tehdään 2D-piirustuksen ja 3D-mallin pohjalta. Valuosan mallin suunnittelussa huomioidaan muun muassa se, että osa koneistetaan lopulliseen muotoonsa, minkä takia malliin jätetään työstövaraa ja lopulliseen tuotteeseen haluttavat reiät jätetään pois mallista. Muotin täyttöä ja materiaalin jähmettymistä simuloidaan käyttäen CAE-ohjelmaa (Computer-aided engineering), jolla pyritään saamaan haluttu lopputulos ja optimoimaan valuprosessia. Tämän jälkeen valuprosessi suoritetaan 2D-muodossa olevia ohjeita käyttäen. (Liu et al. 2018)

Liun et al. (2018) mukaan valuprosessien suunnittelu vie paljon aikaa eikä se ole kovin tehokasta. Tämä johtuu heidän mukaansa siitä, että suunnittelutapa ei ole vakiintunut

vaan 2D- ja 3D-perusteista suunnittelua tehdään vaihtelevasti. Tehokkuutta laskee heidän mukaansa myös prosessiin liittyvien parametrien etsiminen, mittojen laskeminen ja mallin uudelleen luominen.

Valuprosessin suunnittelun tehokkuutta on mahdollista parantaa hyödyntämällä mallipohjaista määrittelyä. Valuosan mallin suunnittelu helpottuu MBD:tä käytettäessä koska halutun lopullisen osan geometria-, mitta- ja toleranssiedot saadaan suoraan MBD-mallista, jolloin niitä voidaan hyödyntää helpommin valuosan mallin määrittelyyn. Tämän seurauksena on mahdollista säästää merkittävästi aikaa ja lisäksi virheitä tapahtuu vähemmän, kun tiedot siirtyvät automaattisesti. (Liu et al. 2018)

3.2.3 Ohutlevy

Ohutlevyllä tarkoitetaan ohutta metallilevyä. Ohutlevytuotteiden valmistus tapahtuu leikkaamalla, lävistämällä, taivuttamalla ja venyttämällä ohutlevyä. (Marciniak et al. 2002) Ohutlevytuotteiden suunnitteluun on nykyaikaisissa CAD-ohjelmissa usein erillinen ohutlevytyökalu, jota voidaan käyttää tuotteen muodon suunnittelun lisäksi yhtenäisen seinämävahvuuden varmistamiseen ja tuotteen aukilevittymisen tarkastamiseen. Ohutlevytuotteiden suunnittelu on mahdollista myös ilman ohutlevytyökalua mutta tällöin tuotteen malli joudutaan tuotannosuunnitteluvaiheessa muuttamaan ohutlevyosaksi, jotta saadaan määritettyä valmistuksessa tarvittavat mitat. (Rapinoja et al. 2021)

Ohutlevytuotteen valmistusvaiheessa ei tarvita erillisiä piirustuksia tuotteen aukilevitystä mallista, mikäli tuote on suunniteltu ohutlevytyökälulla. Tällöin tuotannosuunnittelussa voidaan hyödyntää mallin sisältämiä ohutlevypiirteitä ja määritellä tuotantoon tarvittavat tiedot käytettävän valmistusmenetelmän mukaan. (Rapinoja et al. 2021)

3.2.4 Kokoonpano

Kokoonpanon tehtävä on yhdistää yksittäiset osat valmiiksi tuotteeksi. Kokoonpano suoritetaan käyttäen apuna kokoonpano-ohjeita. Perinteisesti käytetyt paperiset kokoonpano-ohjeet perustuvat 2D-piirustuksiin. Niiden käytössä on samoja ongelmia kuin yksittäisten osien paperisten piirustusten käytössä eli ohjeiden tekeminen ja niiden lukeminen vaatii osaamista ja vie aikaa ja lisäksi niiden muuttaminen on haasteellista. (Goher et al. 2021)

3D-malleja voidaan käyttää kokoonpano-ohjeiden tekemiseen luomalla malliin kokoonpanovaiheistus, joka mahdollistaa erillisten kuvien tekemisen eri työvaiheista. 3D-mallin pohjalta tehty kokoonpano-ohje voidaan esittää kokoonpanopisteellä esimerkiksi suuren näytön tai television avulla tai käyttäen AR:ää (augmented reality) eli lisättyä todellisuutta. 3D-malleja hyödyntäen voidaan myös luoda koulutusmateriaalia, jota voidaan

käyttää laajennetun todellisuuden teknologioita käyttäen kokoonpano- ja huoltotoimien harjoitteluun. (Laviola et al. 2022; Rapinoja et al. 2021)

3.3 Laadunvalvonta

Tässä luvussa käsitellään mallipohjaisen määrittelyn käyttöä teollisuuden laadunvalvonnassa. Teollisuuden näkökulmasta laadunvalvonnan tehtävänä on varmistaa että tuotetut tuotteet vastaavat tuotesuunnittelun niille määrittämiä vaatimuksia (Chorafas 2013).

Perinteisesti koordinaattimittauskoneella tehtävä laadunvalvonta suoritetaan käyttäen 2D-piirustuksista saatuja tietoja koska laadunvalvonnan käytössä oleva 3D-malli ei sisällä tietoja geometriasta, mitoituksista ja toleransseista (Quintana et al. 2010). 2D-piirustuksesta tiedot joudutaan syöttämään manuaalisesti koordinaattimittauskoneen mittausohjelmaan (Rapinoja et al. 2021), jolloin virheitä voivat aiheuttaa tulkinnanvaraiset kuvat ja väärät versiot, epäselvät merkinnät, näppäilyvirheet ja muut inhimilliset tekijät (Rapinoja et al. 2016).

Mallipohjaista määrittelyä käytettäessä voidaan MBD-mallin sisältämää PMI-dataa (Product and manufacturing information) käyttää helpottamaan ja nopeuttamaan mittausohjelman tekemistä (Rapinoja et al. 2021). PMI-data sisältää kappaleen geometriset mitat, toleranssit sekä mahdolliset muut tiedot (Saal et al. 2021). Rapinojan *et al.* (2016) mukaan koordinaattimittauskoneen ohjelmisto pystyy automaattisesti muodostamaan mittausstrategian PMI-datan avulla, jolloin mittoja ja toleransseja ei tarvitse syöttää ohjelmaan manuaalisesti ja voidaan säästää merkittävästi aikaa. Monimutkaisilla kappaleilla ajansäästö voi heidän mukaansa olla jopa 90 %. Mittausohjelman muodostaminen automaattisesti vähentää heidän mukaansa myös merkittävästi inhimillisten virheiden vaaraa.

CNC-koneistuksessa laadunvalvontaa voidaan suorittaa myös käyttäen OMI:tä (On Machine Inspection) eli CNC-koneeseen kytkettyä automaattista laadunvalvontajärjestelmää. OMI:tä käyttämällä koneistettava kappale voidaan mitata missä tahansa vaiheessa koneistusta ja mittaustuloksen avulla voidaan parantaa koneistuksen tarkkuutta ja tehokkuutta. Vaikka suuressa osassa CNC-koneita on jo tällä hetkellä OMI-toiminto, sitä käytetään melko vähän koska sen ohjelmointi on haastavaa ja työlästä. OMI-ohjelman automaattinen luominen on kuitenkin mahdollista MBD:n avulla mikä mahdollistaa OMI:n tehokkaamman käytön. (Zhong et al. 2021)

4. TIEDONSIIRTO

4.1 Tiedonsiirron merkitys

Toimiva tiedonsiirto on kaikelle yritystoiminnalle elintärkeää. Toimivalla tiedonsiirrolla on suuri merkitys kun pyritään lisäämään tuotannon tehokkuutta, vähentämään virheitä ja varmistamaan laadunvalvonnan tarkoituksenmukainen toiminta (ASME 2022).

Mallipohjaisen määrittelyn hyödyt perustuvat pitkälti tehostuneeseen tiedonsiirtoon. Tiedonsiirron tehostamisella säästetään aikaa ja vähennetään inhimillisiä virheitä.

4.2 MBD-tiedonsiirron edut tavanomaiseen tiedonsiirtoon verrattuna

Yksi mallipohjaisen määrittelyn merkittävistä eduista on se, että kaikki tuotemäärittelytieto on liitettyä yhteen datapakettiin sen sijaan että tuotteesta olisi erillinen 3D-malli ja 2D-piirustus. Tietojen ollessa yhdessä datapakettissa tuotemäärittely on yksiselitteisempää ja mahdollisuutta 2D-piirustuksen ja 3D-mallin välisiin ristiriitoihin ei ole. (Quintana et al. 2010)

MBD:n käytöllä pyritään saavuttamaan ajan säästöä tuotetietoa käyttävissä organisaation osissa. Tämä tapahtuu vähentämällä manuaalista tiedon uudelleen syöttämistä, jota perinteisiä menetelmiä käytettäessä tehdään paljon. Manuaalista tiedon uudelleen syöttämistä vähennetään tekemällä MBD-datasta koneluettavaa, jolloin eri CAx-järjestelmät (Computer-aided technologies) pystyvät lukemaan tuotemäärittelytietoja suoraan mallista. (Wang et al. 2021)

2D-piirustuksiin perustuvassa toiminnassa tehtäessä muutoksia piirustuksiin voi vanhojen dokumenttiversioiden saaminen pois organisaatiosta viedä merkittävän osan suunnittelijan työajasta. MBD:tä käytettäessä muutosten teko tuotannon perustana toimivaan dataan on helpompaa ja muutokset voidaan päivittää suoraan kaikille organisaation osille. Tällöin ei myöskään tarvitse huolehtia dokumenttien aiempien versioiden poistamisesta organisaation eri toimijoilta. (Rapinoja et al. 2016)

Perinteisten 2D-piirustusten ymmärtäminen vaatii kokemusta ja ymmärrystä teknisistä piirustuksista. Mallipohjaista määrittelyä käytettäessä jopa monimutkaisten tuotteiden tuotedokumenttien ymmärtäminen on helppoa koska 3D-mallissa tuote nähdään sellai-

sena kuin se olisi fyysisenä tuotteena. Tällöin myös henkilöt, joilla ei ole kokemusta teknisistä dokumenteista voivat ymmärtää ja hyödyntää MBD-mallin sisältämiä tietoja. (Quintana et al. 2010; Varitis et al. 2020)

Quintanan et al. (2010) mukaan MBD:tä käyttämällä tuotemäärittelytiedon käyttämisen tallennustilan määrä laskee keskimäärin 25–30 % verrattuna 2D-piirustuksen ja annotoimattoman 3D-mallin käyttöön. Tämän seurauksena yrityksen tietojärjestelmissä säilytetävän datan tarvitsema tallennuskapasiteetti laskee. Lisäksi pienempi tiedostokoko mahdollistaa myös tiedonsiirron nopeutumisen.

4.3 MBD-tiedonsiirron ongelmakohdat

Tämänhetkisellä teknologialla MBD-tiedonsiirto ei ole vielä täydellistä vaan siinä on muutamia merkittäviä ongelmakohtia. Näiden ongelmien ratkaisua tulee tutkia ja pohtia yrityksessä ennen mallipohjaiseen toimintaan siirtymistä.

Yksi MBD-tiedonsiirtoon liittyvä ongelma on osapuolien kyky vastaanottaa ja käyttää MBD-dataa. MBD-tiedostot ovat luettavissa pelkästään sähköisessä muodossa. Tällöin jokaisella, jolla on tarve käyttää MBD-tiedoston sisältämää dataa, on oltava käytössään päätelaite, jolla tiedostoa voi lukea. Tämä tarkoittaa investointeja laitteisiin ja henkilöstön kouluttamiseen. Kaikilla osapuolilla ei välttämättä ole käytettävissä CAD-ohjelmaa, joten MBD-datan jakamisessa tulee kiinnittää huomiota valittavaan tiedonsiirtoformaattiin koska se vaikuttaa datan luettavuuteen eri katseluohjelmissa. (Quintana et al. 2010; Varitis et al. 2020)

Vaikka MBD-tiedonsiirrossa pyritään siihen, että mahdollisimman suuri osa tiedosta olisi koneluettavaa eri CAx-ohjelmien välillä saattaa esiintyä ongelmia, jolloin CAx-ohjelma ei pysty lukemaan kaikkea tarvittavaa dataa MBD-tiedostosta. Tällöin CAx-ohjelmassa joudutaan manuaalisesti täydentämään tai korjaamaan tietoja mikä vähentää MBD:n käytöstä saatavaa ajan säästöä. (Saal et al. 2021)

MBD-datan digitaalinen luonne vaikeuttaa datan pitkäaikaista säilyttämistä. Tuotemäärittelytiedot pitäisi pystyä säilyttämään koko tuotteen elinkaaren ajan, joissain tapauksissa jopa yli 50 vuotta. 2D-piirustuksia voidaan säilyttää sähköisessä muodossa, tulostettuna tai mikrofilmillä. MBD-dataa sen sijaan voidaan säilyttää vain digitaalisessa muodossa mikä vaikeuttaa tuotemäärittelytietojen säilymisen varmistamista. Tämän takia 2D-piirustus koetaan edelleen varmemmaksi tavaksi tuotemäärittelytiedon pitkäaikaiseen säilyttämiseen. (Quintana et al. 2010)

MBD-datan digitaalisuuden vuoksi monissa yrityksissä myös pelätään tietovuotoja. Vaikka jotkin CAD-ohjelmat mahdollistavat lähetettävän tiedon rajaamisen haluttuihin tietoihin nähdään 2D-piirustus edelleen turvallisempänä tiedonsiirtotapana. (Rapinoja et al. 2016)

5. MBD:N YRITYSKÄYTTÖ

5.1 Tausta

Mallipohjainen määrittely kehitettiin, kun 3D-mallinnuksen ja digitaalisen teknologian kehittyessä yritykset halusivat käyttää 3D-malleja tiedonsiirrossa tehostaakseen tuotantoa ja ylläpitääkseen kilpailuetua. Vuonna 2003 ASME (American Society of Mechanical Engineers) esitteli standardin ASME Y14.41 joka mahdollisti 3D-mallien sisältämän datan käytön tuotannon eri vaiheissa. Ensimmäisinä mallipohjaisen määrittelyn ottivat käyttöön ilmailu- ja puolustusteollisuuden yritykset Boeing, Lockheed Martin, Airbus ja Toyota Motorsport. (Yan 2012)

Metalliteollisuuden Standardointiyhdistys ry:n (Metsta) 18.1.2022 järjestämään webinaariin osallistuneista yritysten edustajista vain 22 % kertoi edustamansa yrityksen hyödyntävän mallipohjaista määrittelyä. Mallipohjaisen määrittelyn vähäistä käyttöä selittää se, että vain 51 % vastaajista arvioi MBD:n nykytilassaan mahdollistavan laadun parantamisen ja/tai kustannusten alentamisen. (Metsta 2022)

5.2 Valmistautuminen MBD:n käyttöönottoon

Mikäli yrityksessä nähdään mallipohjainen määrittely mahdollisuutena parantaa yrityksen toimintaa ja ollaan kiinnostuneita MBD:n käytöstä, on yrityksessä aloitettava selvitystyö liittyen MBD:n käyttöönottoon. Valmistauduttaessa mallipohjaisen määrittelyn käyttöönottoon tulee yrityksessä selvittää, minkälaiset valmiudet yrityksellä on MBD:n käyttöön. MBD:n käyttöön siirtymistä harkittaessa tulee tietää mikä on yrityksen tämänhetkinen toimintatapa tuotetiedon käsittelyssä eri yrityksen osissa. Lisäksi on tiedettävä, miten tuotetietoa siirretään yrityksen ulkopuolisille toimijoille kuten alihankkijoille. Kun tunnetaan yrityksen oma toiminta tuotetiedon suhteen, voidaan alkaa selvittämään minkälaiset valmiudet yrityksellä ja alihankkijoilla on henkilöstön ja infrastruktuurin osalta MBD:n käyttöön.

Henkilöstön osalta valmiudet MBD:n käyttöön ovat paremmat, mikäli henkilöstö on tottunut toimimaan digitaalisten laitteiden kanssa. Tämä on harvoin ongelma tuotesuunnitteluhenkilöstön osalta koska tuotesuunnittelu tehdään pääosin digitaalisilla alustoilla. Henkilöstön valmiudet digitaalisen tuotemäärittelytiedon käyttöön saattavat kuitenkin esimerkiksi tuotannon henkilöstöllä vaihdella merkittävästi riippuen siitä, miten tuotemäärittelytietoa on totuttu siirtämään ja käyttämään. Tämän takia henkilöstön valmiudet on selvi-

tettävä ja varauduttava siihen, että henkilöstö tarvitsee mahdollisesti varsin paljon koulutusta ja perehdytystä, jotta toiminta digitaalisen tuotemäärittelytiedon kanssa onnistuu sujuvasti.

Valmiudet ovat myös infrastruktuurin osalta sitä paremmat mitä enemmän yrityksessä käytetään digitaalisia alustoja. Infrastruktuuri sisältää fyysisen ja digitaalisen infrastruktuurin. Fyysisen infrastruktuurin valmiuksiin vaikuttaa muun muassa se minkälaisia tuotantolaitteita yrityksessä käytetään ja miten paljon yrityksen eri osissa käytetään pääte-laitteita. Digitaalisen infrastruktuurin valmiuksiin sen sijaan vaikuttavat muun muassa yrityksen tietojärjestelmien tila ja yrityksessä käytettävät ohjelmistot. Mikäli esimerkiksi tuotesuunnitteluun käytetään sellaista CAD-ohjelmaa, joka mahdollistaa mallipohjaisen määrittelyn on siirtyminen MBD:n käyttöön helpompaa, mikäli päädytään jatkamaan kyseisen ohjelman käyttöä.

Kun yrityksen ja alihankkijoiden valmiudet mallipohjaisen määrittelyn käyttöön on selvitetty, voidaan alkaa selvittämään, minkälaisia muutoksia infrastruktuuriin tulee tehdä ja minkälaista koulutusta henkilöstölle tulisi antaa. Tässä vaiheessa tulee myös viimeistään päättää, pyritäänkö heti täydelliseen ideaaliseen mallipohjaiseen toimintaan. Täydellisessä mallipohjaisessa toiminnassa hyödynnetään kaikkia MBD:n tarjoamia mahdollisuuksia muun muassa tuotannossa. Toisena vaihtoehtona on käyttää mallipohjaista määrittelyä tiedonsiirron sujuvoittamiseen jolloin muun muassa tuotannon automatisaatioaste ei nouse heti yhtä paljon.

Mikäli siirtyminen suoraan täydelliseen mallipohjaiseen toimintaan nähdään liian suurena kertainvestointina, on järkevintä siirtyä ensin käyttämään MBD:tä pelkästään piirustusten käytön korvaajana käyttäen samoja tuotantolaitteita kuin ennenkin. Tällöin saavutetaan merkittävä osa MBD-tiedonsiirron eduista ilman massiivisia investointeja tuotantolaitteisiin. Siirtymän jälkeen yrityksen toimintaa voidaan viedä kohti täydellistä MBD:n hyödyntämistä askel kerrallaan esimerkiksi sitä mukaa kun tuotantolaitteita vaihdetaan uusiin niiden ikääntyessä.

5.3 Siirtyminen mallipohjaiseen toimintaan

Kun yrityksen siirtyminen mallipohjaiseen määrittelyyn on suunniteltu ja vaadittavat muutokset on selvitetty, on aika tehdä hankintoja. Nämä hankinnat sisältävät tarvittavat laiteja ohjelmistohankinnat sekä lisäksi mahdolliset muutokset henkilöstössä. Ohjelmistoja valittaessa paras ratkaisu on pyrkiä siihen, että kaikki mahdolliset ohjelmistot ovat saman

ohjelmistojulkaisijan tarjoamia koska tällöin varmistetaan ohjelmistojen paras mahdollinen yhteensopivuus. Myös laitehankinnoissa tulee ottaa huomioon laitteiden yhteensopivuus valittujen ohjelmistojen kanssa.

Ennen uusien ohjelmistojen ja laitteiden käyttöönottoa tulee mahdollisuuksien mukaan kouluttaa henkilöstö mahdollisimman hyvin uusiin toimintatapoihin ja ohjelmistojen ja laitteiden käyttöön. Tällä varmistetaan sujuva siirtymä mallipohjaiseen toimintaan ja varmistetaan ettei yrityksen toiminta ole seisahtuneena kohtuuttoman pitkään. Kun uudet laitteet ja ohjelmistot on otettu onnistuneesti käyttöön, tulee henkilöstön koulutusta jatkaa ja toimintaa seurata. Tällä tavalla varmistetaan, että uusia toimintatapoja noudatetaan ja tehdystä investoinnista saadaan kaikki mahdollinen hyöty yritykselle.

Vaikka mallipohjaiseen määrittelyyn siirtymisprosessi on aina perusrakenteeltaan edellä esitetyn mukainen, vaikuttaa yrityksen lähtötilanne merkittävästi siihen miten suuri operaatio siirtyminen on. Merkittävin siirtymään vaikuttava tekijä on se, miten tuotemäärittely on ennen siirtymää toteutettu.

Taulukko 2. Erot MBD:n käyttöön siirtymisessä eri alkutilanteiden välillä

	MBD käytön vaatimukset	Piirustus	Piirustus ja malli
Ohjelmistot	Ohjelmistojen tulee mahdollistaa mallipohjainen määrittely ja MBD datan käyttö yrityksen muissa osissa	Käytössä olevat ohjelmistot eivät todennäköisesti mahdollista MBD:n käyttöä, joten ohjelmistot vaihtuvat	Voidaan mahdollisesti käyttää samoja ohjelmistoja mm. suunnittelussa ja tuotannossa, koska ohjelmistot ovat mahdollistaneet mallien käytön tuotemäärittelyyn myös aiemmassa toimintatavassa
Tietojärjestelmät	Tietojärjestelmien tulee mahdollistaa annotoitujen mallien siirto, käyttö ja säilytys	Käytössä olevat tietojärjestelmät eivät todennäköisesti mahdollista MBD:n tehokasta käyttöä	Käytössä olevat tietojärjestelmät mahdollistavat mallien käytön tiedonsiirrossa, joten on todennäköistä, että annotoitujen mallien käyttö on myös mahdollista
Henkilöstö	Henkilöstön on kyettävä käyttämään MBD:tä kaikissa yrityksen osissa mm. suunnittelussa ja tuotannossa	3D-mallien käyttö täysin uutta, joten henkilöstö tarvitsee enemmän koulutusta	Henkilöstöllä on jo kokemusta 3D-mallien käytöstä tuotemäärittelytiedon tuottamisessa ja käyttämisessä, joten koulutusta tarvitaan vähemmän

Kuten taulukosta 2 nähdään vaikuttaa yrityksen aiemmin käyttämä tuotemäärittelyn tapa merkittävästi sen valmiuksiin käyttää mallipohjaista määrittelyä. Aiemmin paperipohjaisena toimineella yrityksellä siirtyminen mallipohjaiseen toimintaan on siis merkittävästi haasteellisempaa kuin sellaisella yrityksellä, jossa tuotemäärittelyyn on käytetty mallin ja piirustuksen yhdistelmää.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä selvitettiin kirjallisuuskatsauksen avulla mallipohjaisen määrittelyn kehityksen tilannetta ja sen käytön tarjoamia mahdollisuuksia teollisuuden toiminnan tehokkuuden parantamiseen. Lisäksi tässä työssä esitettiin tehdyn kirjallisuuskatsauksen pohjalta peruseriaate yrityksen siirtymiselle mallipohjaiseen toimintaan.

Kirjallisuuskatsauksesta selvisi, että MBD:n potentiaali yrityksen toiminnan tehostamiseen on merkittävä. MBD:n avulla voidaan saavuttaa muun muassa ajan säästöä ja virheiden vähentymistä monissa yrityksen eri osissa.

Vaikka mallipohjaisen määrittelyn edut ovat huomattavat verrattuna perinteiseen piirustus pohjaiseen toimintaan, eivät MBD-järjestelmät ole vielä täydellisiä vaan niissä on myös puutteita. MBD:n toiminnassa suurimmat ongelmat kuitenkin liittyvät MBD-datan automaattiseen hyödyntämiseen eri laitteissa ja ohjelmissa, minkä takia ne eivät varsinaisesti häiritse MBD:n käyttämistä paperisten piirustusten korvaajana.

Edellä mainituista syistä optimaalinen tapa MBD:n käyttöön tällä hetkellä on korvata sillä piirustusten käyttö mutta muuten jatkaa yrityksen toimintaa minimaalisilla muutoksilla käytössä oleviin tuotantolaitteisiin. Tällöin kertainvestointi ei ole kohtuuttoman suuri, mutta silti saavutetaan merkittävä osa MBD:n hyödyistä välttäen MBD:n käytön ongelmallisimmat osuudet.

Tulevaisuudessa MBD:n käyttö yrityksissä tulee lisääntymään merkittävästi, kun ongelma kohtiin löytyy ratkaisuja ja kun tietoisuus MBD:n mahdollisuuksista lisääntyy. MBD:n käyttöönotosta ja käytöstä oikeissa yrityksissä tarvitaankin lisää syvällisempää tutkimusta, jotta MBD nähtäisiin yrityksissä toimivana ja tehokkaana vaihtoehtona piirustuksille.

LÄHTEET

Alemanni, M., Destefanis, F. & Vezzetti, E. (2010). Model-based definition design in the product lifecycle management scenario. *Int J Adv Manuf Technol* 52, 1–14.

ASME (2022). Model Based Enterprise (MBE) - ASME. Saatavissa (viitattu 3.2.2022): [https://www.asme.org/codes-standards/about-standards/the-future-of-asme-standards/model-based-enterprise-\(mbe\)](https://www.asme.org/codes-standards/about-standards/the-future-of-asme-standards/model-based-enterprise-(mbe))

Chorafas, D.N. (2013). *Quality Control Applications*, 1st ed. 2013. ed, Springer Series in Reliability Engineering. Springer London, London.

Evans, K. (Kenneth W.) (2016). *Programming of CNC machines*, 4th ed. ed. Industrial P., South Norwalk, Conn.

Frechette, S.P. (2011). Model based enterprise for manufacturing, in: *Proceedings of the 44th CIRP International Conference on Manufacturing Systems*.

Goher, K., Shehab, E. & Al-Ashaab, A. (2021). Model-Based Definition and Enterprise: State-of-the-art and future trends. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 235, 2288–2299.

Laviola, E., Gattullo, M., Manghisi, V.M., Fiorentino, M. & Uva, A.E. (2022). Minimal AR: visual asset optimization for the authoring of augmented reality work instructions in manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 119, 1769–1784.

Liu, X., Li, X., Xing, J., Chen, H. & Ni, Z. (2018). Integrating modeling mechanism for three-dimensional casting process model based on MBD. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 94, 3145–3162.

Marciniak, Z., Duncan, J.L. & Hu, S.J. (2002). *Mechanics of sheet metal forming*, 2nd ed / Z. Marciniak, J.L. Duncan, S.J. Hu. ed. Butterworth-Heinemann, Oxford.

Qin, Y., Zhang, M. & Zhang, X. (2020). Research on Model Based Digital Definition of Complex Product, in: *2020 IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)*. pp. 1219–1222.

Quintana, V., Rivest, L., Pellerin, R., Venne, F. & Kheddouci, F. (2010). Will Model-based Definition replace engineering drawings throughout the product lifecycle? A global perspective from aerospace industry. *COMPUT IND* 61, 497–508.

Rapinoja, J.-P., Laaksonen, T., Nieminen, J., Pulkkinen, A., Simons, J., Uski, P., et al. (2016). Malliperustaisen tuotemäärittelyn (MBD) mahdollisuudet. Metsta, Helsinki.

Rapinoja, J.-P., Henell, A., Hinkkanen, M., Kellokoski, M., Kähäri, M., Laaksonen, T., et al. (2021). Opastusta mallipohjaisen tuotemäärittelyn (MBD) käyttöön. Metsta, Helsinki.

Rapinoja, J.-P., Metsta (2022). Webinaari: Mallipohjainen tuotemäärittely, MBD - Metsta. Saatavissa (viitattu 17.2.2022): <https://metsta.fi/webinaari-mallipohjainen-tuotemaaritely-mbd>

Saaksvuori, A. & Immonen, A. (2008). *Product Lifecycle Management*, 3rd ed. 2008. ed. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

Saal, C., Lipp, C., Metrich, R. & Brionne, P. (2021). New Methods for Continuous Communication within the 3D-Model-Based Process Chain, in: 2021 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE). pp. 1–7.

SFS-ISO 16792 (2021). Tekninen tuotedokumentointi. Digitaalista tuotemäärittelytietoa koskevat käytännöt. Suomen standardisoimisliitto, Helsinki.

Varitis, E., Rinos, K. & Kostis, N. (2020). Model-based definition capabilities and its impact on industrial productivity. *MATEC web of conferences* 318, 1048.

Wang, M., Pan, S., Zhang, W., Qu, Y. & Wang, S. (2021). Research on MBD Process Design of Light Weapons Based on UG, in: 2021 IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA). pp. 940–943.

Yan, H.-S. (2012). History of mechanical technology and mechanical design 2012: selected, peer reviewed papers from the 9th International Conference on History of Mechanical Technology and Mechanical Design, (ICHMTMD2012), March 23–25, 2012, Taiwan, Applied mechanics and materials, volume 163. Trans Tech Publications, Durnten-Zuerich, Switzerland.

Zhong, W., Zhai, C., Cao, Y. & Wang, M. (2021). A MBD Model-driven Automatic Generation Method of On-machine Measuring Program for CNC Machining. *Journal of Physics: Conference Series* 2095, 012045.