Tampereen yliopisto

Atte Ahlblad

TEKNISTEN TUOTEMÄÄRITTELYTIETOJEN LIITTÄMINEN SUORAAN 3D-MALLIIN

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Ilari Laine
Helmikuu 2022

TIIVISTELMÄ

Atte Ahlblad: Teknisten tuotemäärittelytietojen liittäminen suoraan 3D-malliin
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Helmikuu 2022

Teknisten tuotemäärittelytietojen (engl. Product Manufacturing Information, PMI) avulla pyritään uudistamaan koneensuunnittelussa vakiintunutta käytäntöä dokumentoida kappaleen muotoilu-, valmistus-, laatu- sekä muu data eriliseen työpiirokseen. PMI:t ovat annotaatioita, joita voidaan lisätä suoraan 3D-malliin osana mallipohjaista suunnittelua (MBD). Tämän tarkoituksena on tehostaa useita vaiheita suunnittelu- ja valmistusprosesseissa. PMI:n käyttöönotto on kuitenkin vielä hyvin varhaisessa vaiheessa, vaikka ideana se ei ole uusi.

Työssä keskitytään PMI:n käyttämiseen osana MBD:tä perehtymällä sen etuihin perinteiseen tapaan verrattuna sekä haasteisiin, jotka selittävät paremmin tämän teknologian vähäistä käyttöä. Työ on pääosin kirjallisuustutkimus, mutta vertailua tehdään myös kokeellisin menetelmin luomalla oma PMI:tä sisältävä 3D-malli, dokumentoiden mitä vaiheita tähän sisältyy ja miten ne eroavat perinteisestä menetelmästä. Tiedon välittyminen on oleellinen osa dokumentointia, joten työ perehtyy myös sen kannalta MBD:n tekniseen valmiuteen tarkastelemalla eri tiedostomuotojen ja lukutyökalujen kykyä esittää PMI-mallit oikein.

Tutkimuksen myötä havaittiin selviä tekijöitä, sille miksi yritykset eivät laajalti ole siirtyneet PMI:n käyttöön. Nämä syyt pohjautuivat pääosin tiedonsiirtoon ja teknologian alkeellisuuteen. Parhain tulos PMI:n tiedonsiirrossa syntyi, kun käytti yhteensopivia tiedostomuotoja ja katseluohjelmia. Natiivitiedoston käyttö sen omassa ohjelmassaan on oikein tehokas tapa viestiä tieto, mutta se ei sovellu yleishyödylliseksi ratkaisuksi yritysmaailmassa.

Työssä tulee kuitenkin myös ilmi, että oikein käytettynä PMI voi tuoda jo nykytilassaan paljon edistystä suunnitteluun. Myöskin tulevaisuus PMI:lle näyttää lupaavalta, sillä se vastaa teollisuuden neljännen vallankumouksen asettamia vaatimuksia.

Avainsanat: Tiedonsiirto, lukutyökalut, tiedostomuodot, PMI, tarkasteluohjelma, MBD

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Atte Ahlblad “Adding product manufacturing information directly into the 3D model”

Bachelor’s thesis

Tampere University

Mechanical engineering

February 2022

Product Manufacturing Information (PMI) is design, manufacturing and other data included in a 3D CAD file. It enables a new way of documenting 3D CAD objects. So far these documents have primarily been made in a 2D format, producing documents that can be interpreted in a wide range of ways and that add unnecessary paper prints into the design and manufacturing processes. By the use of PMI annotations, the 3D models can be shared among stakeholders in an efficient way, allowing a better information flow during the design phase. Other benefits include concurrent design and the reduction of human error.

In this paper the current state of PMI as a part of Model-based design (MBD) is studied. It will go over subjects like the meaning of PMI and MBD, their technological readiness as well as known projects that use PMI. The use of PMI is also tested in the Siemens NX software to better compare the use of this method to the more traditional method.

Another core part of the paper is the reviewing of different file formats and CAD viewing tools. These are a key part to successful usage of PMI because often different stakeholders don’t share the same software licenses as the designing company and so such tools and files are required to share the documentation.

The paper suggests that technological improvements are needed for the method to reach its potential. Even it its current state PMI and MBD can prove to be useful tools for cutting down costs and error as well as moving towards Industry 4.0.

Keywords: PMI, MBD, 3D, 2D

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Työssä perehdyin PMI:n liittämiseen suoraan 3D-malliin. Työstä haastavan teki lähteiden etsintä, koska PMI:n adaptointi on vielä vähäistä.

Työ oli kuitenkin opettavainen ja koen, että aiheesta jäi minulle paljon käteen. Tulevaisuudessa tulen toivottavasti hyödyntämään PMI:n käyttöä suunnittelussa ja olen näin saanut varaslähdön uuteen menetelmään.

Haluaisin kiittää ohjaajaani Ilari Lainetta hänen antamastaan tuesta ja neuvoista työn tekemiseen. Lisäksi haluan kiittää tukensa antaneita ystäviäni.

Tampereella, 31.1.2022

Atte Ahlblad

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 1
2. MODEL-BASED DEFINITION -MÄÄRITTELY 2
2.1 Product Manufacturing Information 2
2.2 Näkyvyys nykypäivänä 3
2.3 Teknisen tuotedokumentoinnin standardi SFS-ISO 16792 4
3. DOKUMENTOINTITAPOJEN VERTAILU 5
3.1 2D-dokumentointi 5
3.2 Model-Based Definition -dokumentointi 7
3.3 Erot ja yhtäläisyydet 8
4. PRODUCT MANUFACTURING INFORMATIONIN KÄYTTÖ SIEMENS NX -YMPÄRISTÖSSÄ 9
4.1 Alkunäkymä 9
4.2 Teknisten tuotemäärittelytietojen lisääminen 3D-malliin 10
4.3 Valmis tuotemäärittelytietoja sisältävä malli 11
4.4 2D-dokumentin luominen Product Manufacturing Informationin avulla 12
5. TEKNISIÄ TUOTEMÄÄRITTELYTIETOJA SISÄLTÄVIEN MALLIEN TARKASTELU ERI SOVELLUKSILLA 14
5.1 Lukutyökalut 14
5.1.1 JT2GO 14
5.1.2 eDrawings 15
5.1.3 NIST STEP File Analyzer and Viewer 15
5.2 Tiedostomuodot 16
5.2.1 STL ja IGES 16
5.2.2 STEP 16
5.2.3 QIF 17
5.2.4 JT 17
5.2.5 3D PDF 17
5.3 Haasteet tiedonsiirrossa 18
6. YHTEENVETO 20
LÄHTEET 21

LYHENTEET JA MERKINNÄT

MBD	3D-mallipohjainen tuotemäärittely
PMI	Tekniset tuotemäärittelytiedot.
Semantic PMI	Koneluettava tuotemäärittelytieto
CAD	Tietokoneavusteinen suunnittelu
CAM	Tietokoneavusteinen valmistus
BIM	Rakennuksen tietomalli
IFC	MBD tiedostoformaatti rakennusalalla
SFS	Suomen Standardisoimisliitto
ISO	Kansainvälinen standardisoimisjärjestö
B-rep	3D-mallin rajaesitysmuoto
NIST	Kansainvälinen standardien ja teknologian virasto

1. JOHDANTO

Koneensuunnittelussa on vakiintunut käytäntö viestiä kappaleiden tuotemäärittelytiedot 2D-työpiirustuksilla. Nämä työpiirustukset tehtiin alun perin käsin paperille ja myöhemmin CAD-ohjelmia käyttäen. Myöhemmin kuitenkin CAD-ohjelmien kehityksen vuoksi pystyi työpiirustuksien tueksi mallintamaan 3D-kappaleita. Vaikka tämä menettelytapa on koettu toimivaksi, teollisuus kehittyy jatkuvasti ja uusia keksintöjä vaaditaan tehokkuuden parantamiseksi ja kilpailukyvyn säilyttämiseksi.

Model-Based Definition (MBD) eli 3D-mallipohjainen tuotemäärittely on mallintamistapa, jossa kaikki dokumentointi sisällytetään suoraan 3D-malliin Product Manufacturing Information (PMI) -annotaatioiden avulla. Nämä mahdollistavat koneluettavan mallin, joka ideaalisessa tilanteessa valmistetaan täysin automaation avulla, näin välttyen inhimillisiltä virheiltä sekä säästäen insinöörien aikaa. MBD:n tavoitteena on myös luoda enemmän hyödynnettävää dataa.

Yritykset eivät kuitenkaan ole vielä laajalti ottaneet MBD:tä käyttöön, vaikka sitä on kehitetty 2000-luvun alkupuolelta asti. Tässä työssä tarkastellaan MBD:n tämänhetkistä tilannetta ja pohditaan syitä sille, miksi koneensuunnittelussa ei ole vielä täysin siirrytty MBD:n käyttöön. Työssä vertaillaan myös MBD-dokumentointia perinteiseen 2D-dokumentointiin sekä perehdytään Siemens NX -mallinnusohjelman PMI-toimintoihin ja siihen, miten sen avulla luodaan MBD-malleja. Näitä MBD-malleja verrataan myös vastaaviin perinteisiin työkuviin.

Luvussa 2 määritellään tarkemmin, mitä MBD tarkoittaa ja minkälaisia vaatimuksia sille on. Luvussa 3 esitellään MBD:n ja perinteisen menetelmän eroja sekä samanlaisuuksia. Luvussa 4 tutkitaan, miten MBD-malli luodaan NX-sovelluksella. Luvussa 5 keskitytään tiedonsiirtoon eli erilaisiin mallien tarkasteluohjelmiin, MBD:tä tukeviin tiedostoformaatteihin sekä haasteisiin tiedonsiirrossa. Lopuksi työn tulokset ja päätelmät kootaan kasaan yhteenvedossa.

2. MODEL-BASED DEFINITION -MÄÄRITTELY

Model-Based Definition on koneensuunnittelun menetelmä, jossa tieto pyritään sisällyttämään yhteen totuudenlähteeseen: 3D-malliin. Se pyrkii myös yhtenäistämään eri tuotannon vaiheita, kuten suunnittelua, valmistusta ja laadunvalvontaa. (Nguyen 2021b) Onnistuneen toimeenpanon jälkeen yritys olisi tehokkaampi ja kilpailukykyisempi.

Bijnens ja Chesire (2019) jaottelevat Model-Based Definitionin neljään eri tasoon tuotemäärittelytietojen viestimisen perusteella:

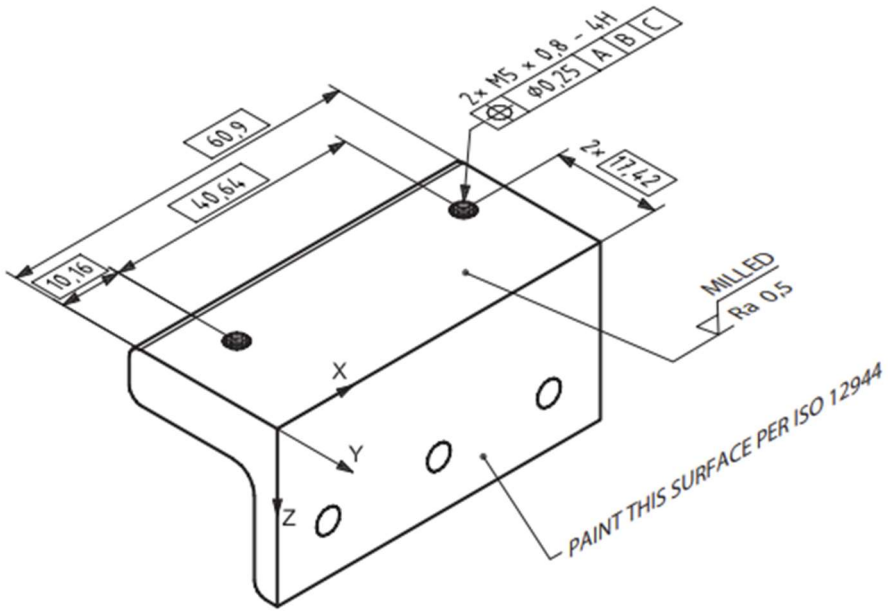
1. Informaatio siirtyy pelkkien 2D-työpiirustusten välityksellä.
2. Työpiirustuksen tukena on täydentävä 3D-malli.
3. 3D-malli on jo pääosassa, mutta työpiirustus toimii kuitenkin apuna.
4. Kaikki tuotemäärittelytiedot viestitään pelkän 3D-mallin avulla.

Nämä tasot ovat sopivia erilaisille yrityksille. Alkupään tasot 1–2 sopivat yrityksille, joilla ei ole keinoa hyödyntää 3D-mallia, tai yrityksille, jotka voivat vain tarkastella 3D-mallia paremman hahmottamisen vuoksi, kuitenkin hyödyntämättä malleja valmistuksessa. Tasot 3–4 sopivat yrityksille, jotka käyttävät mallin tietoja valmistuksessa joko pääluontoisena tai osittaisena lähteenä.

2.1 Product Manufacturing Information

Product Manufacturing Information tarkoittaa teknisiä tuotemäärittelytietoja, joita käytetään MBD-dokumentoinnissa. Näihin lukeutuvat muotoilu-, valmistus-, laatu- sekä muu data 3D-CAD-tiedostosta. Yleisiä esimerkkejä PMI:stä ovat geometriset dimensiot ja toleranssit, pinnankarheudet sekä hitsausmerkinnät. (Nguyen 2019b)

On olemassa graafisesti esitettäviä PMI:tä ja semanttista (semantic) PMI:tä (Bijnens & Cheshire 2019). Näiden kahden ero on suuri, sillä graafinen esitystapa on vain ihmisluettava, kun taas semanttinen PMI on myös koneluettava. Tämä mahdollistaa CAD-mallin uudelleenkäytön tuotteen valmistus- ja tarkastusvaiheissa. Useat CAM (Computer-assisted manufacturing) -systeemit pystyvät lukemaan semanttista PMI:tä, mikä mahdollistaa tuotteen valmistuksen automaation avulla. Tuotteen tarkastus nopeutuu huomattavasti, koska modernit CMM (coordinate measurement machine) -laitteet kykenevät täysin automaattisesti mitoittamaan kappaleita.



Kuva 1. *3D-malli, jossa on teknisiä tuotemäärittelytietoja (PMI) (SFS-ISO 16792 2021, s. 20).*

2.2 Näkyvyys nykypäivänä

Model-Based Definition on kehittynyt paljon viime vuosina muun muassa uusien tai uudistettujen standardien myötä. Näistä mainittavimpia ovat teknisen tuotedokumentoinnin standardi ISO 16792:2021 sekä STEP AP203:n ja STEP AP214:n yhdistävä ISO 10303-242:2020. PMI on myös tuettuna jo useassa CAD-ohjelmassa, tiedostoformaatissa ja katseluohjelmassa.

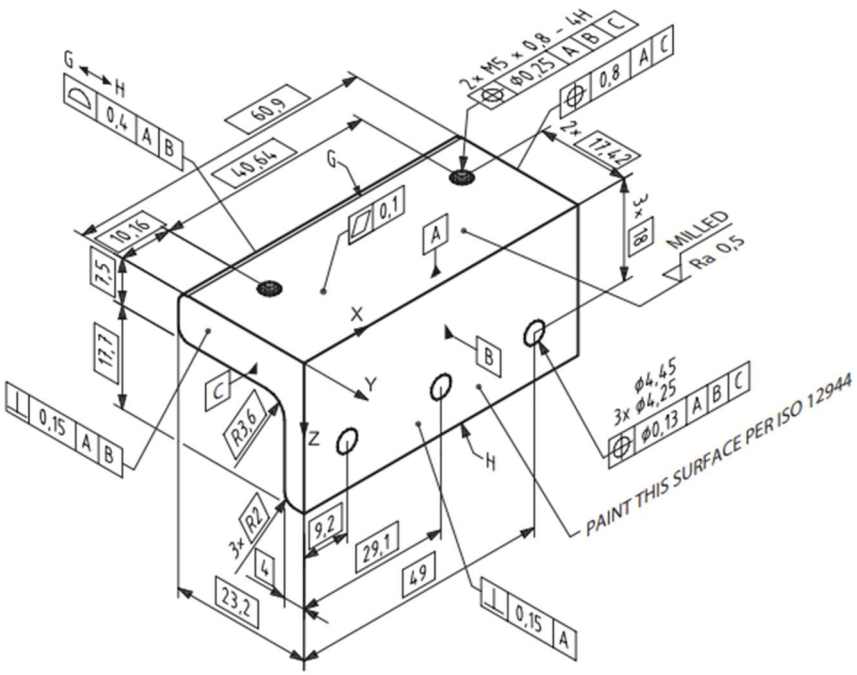
Laajalti MBD ei ole vielä käytössä suunnittelussa, mutta on myös esimerkkejä, joissa isojakin projekteja tehdään jo MBD:n avulla. Teklan (2021) sivuilla esitellään Randselva Bruta, joka on 634-metrinen ulokesilta, jota rakennetaan Norjassa täysin ilman työpiirustuksia. Silta mallinnetaan kansainvälisellä tiimillä Building Information Model (BIM) -muodossa, ja 95 % tiedonsiirrosta tapahtuu Industry Foundation Classes (IFC) -tiedostojen muodossa (Tekla 2021).

Kaikista MBD-kokeiluista ei suinkaan ole vielä yleisessä tiedossa tuloksia, sillä ne säilyvät yrityksissä liikesalaisuuksina. Tämä tiedonpuute on osa syytä MBD:n alhaiselle käytölle ja toimii hidastavana tekijänä uusien kokeilujen toteuttamiselle. (Nguyen 2021b)

2.3 Teknisen tuotedokumentoinnin standardi SFS-ISO 16792

Standardi SFS-ISO 16792 (2021) käsittelee teknistä tuotedokumentointia. Se sisältää dokumentointivaatimuksia niin 2D-työpiirustuksille kuin myös digitaalista tuotemäärittelytietoa koskevat käytännöt. Standardissa luokitellaan dokumentointitapojen yhteiset vaatimukset sekä vaatimuksia, jotka ovat vain toiselle ominaisia. Aiheen kannalta käydään läpi vain MBD:n vaatimuksia.

MBD-mallin annotaatiot on esitettävä yhdellä tai useammalla annotaatiotasolla. Jos tämä ei ole mahdollista, on luotava perinteinen 2D-työpiirros. Näiden annotaatioiden luettavuus tulee taata mallin kääntyessä päivittyvällä tekstillä, määrittämällä jokaisen mallin annotaatiotason oikea lukusuunta tai käyttämällä tallennettuja näkymiä asettamaan kappaleet oikeinpäin lukusuuntaan nähden. Työpiirroksista poiketen MBD-malleihin ei vaadita symmetriaviivojen käyttöä. Jos sisäpuolisten elementtien mitat ja toleranssit ovat hahmotettavissa MBD-mallissa, ei niitä tarvitse esittää leikkauskuvan avulla. Mallissa tulee olla myös yksi tai useampi oikeakätinen koordinaatisto, jossa origo on kolmen akselin leikkauspisteessä ja jossa jokaisella akseli on positiivinen suunta esitettynä sekä nimi. (SFS-ISO 16792 2016, s. 11–12)



Kuva 2. *MBD-malli, standardin SFS-ISO 16792 mukaisesti tehtynä (SFS-ISO 16792 2021, s. 19).*

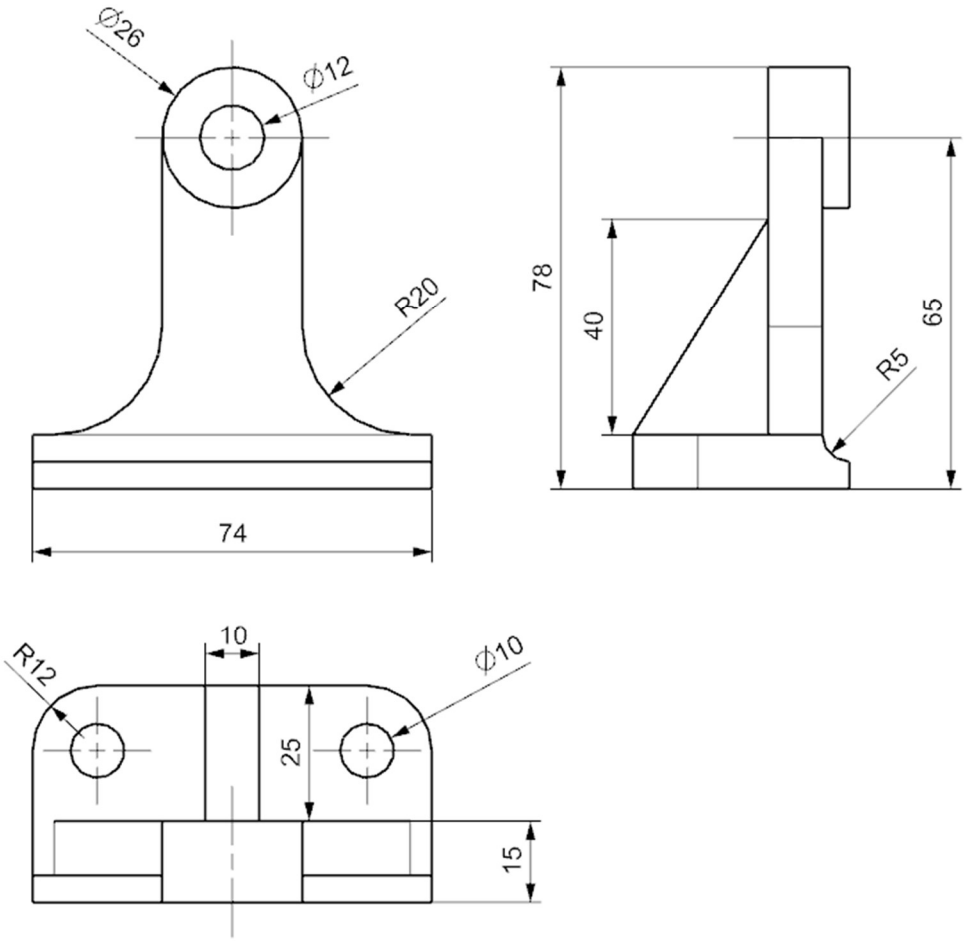
3. DOKUMENTOINTITAPOJEN VERTAILU

Perinteinen 2D-dokumentointi on ollut vallitseva menettelytapa koneensuunnittelussa jo pitkän aikaa, eikä laajalti ole vielä siirrytty MBD:n käyttöön. Syitä tälle ilmiölle pohditaan tässä luvussa perehtymällä tarkemmin 2D- ja MBD-dokumentointimenetelmiin käyden läpi näiden molempien hyviä ja huonoja puolia sekä verraten näitä menetelmiä keskenään.

3.1 2D-dokumentointi

Vaikka työpiirroksia voidaan tehdä myös käsin, useimmat mallinnusohjelmat pystyvät nykyään avaamaan 3D-mallin pohjalta 2D-työpiirrosnäkymän, josta mitat kappaleeseen saa helposti dokumentoitua (Bijnens & Cheshire 2019). Perinteisellä tavalla dokumentoitaessa luodaan siis ensin 3D-malli kappaleesta, minkä jälkeen erilliselle piirrospohjalle merkitään tuotemäärittelytiedot.

On tärkeää esittää kappaleesta niin monta kuvakulmaa ja räjähdyskuvaa kuin tarvitaan kappaleen täyden ymmärtämisen vuoksi. Nämä kuvat tuodaan vierekkäin ja päällekkäin pohjalle asianmukaisella järjestelytavalla. Kuviin tulee merkitä kaikki tarvittavat tuotemäärittelytiedot kappaleen valmistusta varten, muun muassa symmetrisyydet, eri osien pituudet sekä halkaisijat. (SFS-ISO 16792 2021, s. 11)



Kuva 3. *Yksinkertainen 2D-työpiirros, jossa on vain pituuksia, halkaisijoita sekä symmetrisyysviivoja.*

Työpiirrokset tarkastelee tuotannon insinööri joko näytöltään tai paperilta. Tämän jälkeen piirroksesta on ymmärrettävä viestityt tiedot, jotka sitten kirjataan valmistusta varten tietokoneelle. (Nguyen 2021b)

Perinteisen menetelmän hyöty on, että sen käytöstä löytyy paljon tietoa ja dataa. Koneensuunnittelijat osaavat myös jo valmiiksi käyttää perinteistä menetelmää. Työntekijöille ei siis tarvitse perehdyttää mitään uutta, jos dokumentoidaan perinteisellä tavalla, ja näin tuotanto voi jatkaa samaa tahtia. (Nguyen 2021b)

2D-työkuvissa on kuitenkin myös ongelmansa. Työkuvien käyttöön liittyy aina mahdollisuus inhimilliseen virheeseen kuvan ymmärtämisen tai tietojen ylösmerkitsemisen kanssa. Usein piirrosten käsittelemiseen valitaan kokenut insinööri, jolta kuluu arvokasta aikaa kuvan hahmottamiseen ja tietojen merkitsemiseen. Lisää työtä syntyy myös, jos kappaleeseen tehdään muutoksia suunnitteluvaiheessa, jolloin työpiirrosta joudutaan päivittämään. Tämä vaihe saattaa myös unohtua välillä, mikä aiheuttaa yritykselle turhia kustannuksia vääränlaista kappaletta luodessa. (Nguyen 2021d)

3.2 Model-Based Definition -dokumentointi

Toisin kuin perinteisellä tyylillä tehdessä, MBD-dokumentointi aloitetaan suoraan 3D-näkymässä. Kun valmiiseen 3D-malliin halutaan lisätä PMI, avataan siitä vastaava ominaisuus käytössä olevasta CAD-ohjelmistosta (Siemens NX:ssä nimellä PMI).

Oikein toteutettuna MBD-dokumentoinnilla on monta hyvää puolta. Ensinnäkin kappaletta voi muokata ja tarkastella yhdessä useampi insinööri, joka voi nopeuttaa ja parantaa prosessia. On myös helpompaa tarkastella 3D-mallia kuin 2D-työkuvaa, sillä se ei jätä mitään arvailujen varaan. Tämän vuoksi valmistuksessa, kun kappaleen tietoja merkitään koneille ei tehdä vahingossa vääränlaista kappaletta ja näin säästytään suurilta potentiaalisilta menetyksiltä. PMI:stä osa on myös semanttista eli koneluettavaa, mikä vähentää merkittävästi virheiden mahdollisuutta poistamalla vaiheita, joissa voi syntyä inhimillisiä virheitä. Näitä ovat esimerkiksi virheelliset kappaleen hahmottamiset sekä tietojen viallinen ylös kirjaaminen. Koska insinööriä ei enää tarvita kappaleen työkuvan tekoon, -päivittelyyn ja -tarkasteluun, säästyy yritykseltä arvokkaita tunteja, jotka voidaan käyttää arvokkaammin vaikka seuraavaan kappaleen mallintamiseen. (Nguyen 2021b)

Tähän saakka kappaleiden valmistuksesta ainoa saatu data on ollut käytännössä se, että vastaako kappale vaatimuksia ”kyllä tai ei”-luokittelulla. MBD:n ansiosta kappaleesta säilyy valmistustietoja, jolle voidaan tulevaisuudessa keksiä hyödyllisiä käyttötarkoituksia. Tämä kehitys on osa Industry 4.0:aa, jonka suuntaan teollisuus on vahvasti siirtymässä. (Nguyen 2021b)

Ongelmana MBD:ssä on kumminkin sen alkeellisuus. Niin harva yritys on kokeillut MBD:n toimeenpanoa, että sen käytöstä ei löydy tarpeeksi tietoa analysoitavaksi. Haasteena on myös tiedonsiirto, sillä yhdellä sovelluksella tehty PMI:tä sisältävä 3D-malli ei välttämättä näytä samalta avatessa tiedostoa eri mallinnussovelluksessa tai katseluohjelmassa. Lisäksi tiedonsiirron onnistumiseksi on vaadittua, että yhteistyökumppanit käyttävät samaa mallinnussovellusta tai sopivaa katseluohjelmaa. Muita ongelmia ovat teknilliset rajoitteet, yhteentoimivuus ja luotettavuus. (Quintana et al., 2010; Ruemler et al., 2017; Uski et al., 2020)

Joissakin tapauksissa kappaleesta tulisi säilyä toimiva tiedosto jopa monta kymmentä vuotta ja tämä pistää yrityksen mallinnusohjelman armoille, jos kappaleesta ei ole sopivaa yleistiedostoa olemassa, joka pystyy taltioimaan kaiken tiedon kappaleesta oikein. Ei myöskään ole takuuta, että nämä tiedostomallit toimivat CAD- ja katseluohjelmien myöhemmillä ohjelmistoversioilla. Muun muassa näiden syiden vuoksi yritykset saattavat olla epävarmoja aloittaa kokeiluita välttyäkseen turhilta riskeiltä. (Bijnens & Cheshire 2019)

Vaikka MBD on askel lähempänä tuomaan osapuolia yhteen suunnitteluvaiheessa, on siinä vielä omat hidasteensa. Jos kaikki osapuolet eivät ole saman natiiviohjelman käyttäjiä ja kappale muutetaan neutraaliformaattiin yhteistyön vuoksi, katoaa kappaleesta kaikki historiadata, mikä on mennyt sen luomiseen. Tämä vaikeuttaa muutoksien teossa muita kuin alkuperäistä mallintajaa. (Bijnens & Cheshire 2019)

Uudet käytännöt vaativat luonnostaan koulutusta ja tämä vie yritykseltä paljon tärkeitä resursseja, kuten arvokkaita työtunteja ja rahaa. Perinteisen tavan haitat ovat mahdollisesti koettu niin pieniksi, että on jatkettu vanhan, toimivaksi koetun toimitavan käyttöä.

3.3 Erot ja yhtäläisyydet

Dokumentointi molemmilla tavoilla on monilta osin hyvin samanlaista, vaikkakin MBD:n kolmiulotteisuus voi ajoittain hankaloittaa muuten yksinkertaisia toimintoja. Dokumentoinnissa symmetriaviivoja lukuun ottamatta, molempiin tulee merkitä samat tiedot ja tähän työhön kuluu yhtä kokeneelta käyttäjältä lähes tulkoon sama aika (SFS ISO-16792 2021). Tuotemäärittelytiedot esitellään myös samankaltaisesti molemmissa.

MBD-dokumentointi sisältää usein tallennettuja näkymiä, joista on otollisinta tarkastella kappaletta ja sen määrittelyä. Samalla tapaa perinteisellä menetelmällä on useampia näkymiä samasta kappaleesta, jotta kappale tulee oikein ymmärretyksi.

Koska MBD-dokumentoinnissa on keskitettynä kaikki 3D-malliin, kappaletta muokattaessa riittää, että muutoksen tekee 3D-malliin. 2D-toimitavassa muutos työpiirrokseen ei ole automaattinen, vaan työpiirros tulee aina päivittää manuaalisesti 3D-mallin muuttamisen jälkeen. (Bijnens & Cheshire 2019)

Molemmat ovat tarkasteltavissa perinteisesti insinöörin toimesta vaikkakin MBD-dokumentoinnissa kappaleeseen pääsee käsiksi vain tarkasteluohjelmien tai mallinnusohjelman kautta toisin kuin perinteisessä menetelmässä, jossa voidaan käyttää tavallisia PDF-tiedostoja tai tulostaa dokumentointi paperille. MBD-malli voi kuitenkin myös olla koneluettava, missä tapauksessa analysointi on nopeampaa ja luotettavampaa. (Nguyen 2021b)

On myös huomattava, että suurimmat erot näkyvät vasta myöhemmissä vaiheissa kappaleen kehitystä, eivätkä ne vaikuta pelkästään kappaleen suunnitteluun. MBD pyrkii parantamaan kaikkia vaiheita tuotannosta. (Nguyen 2021b)

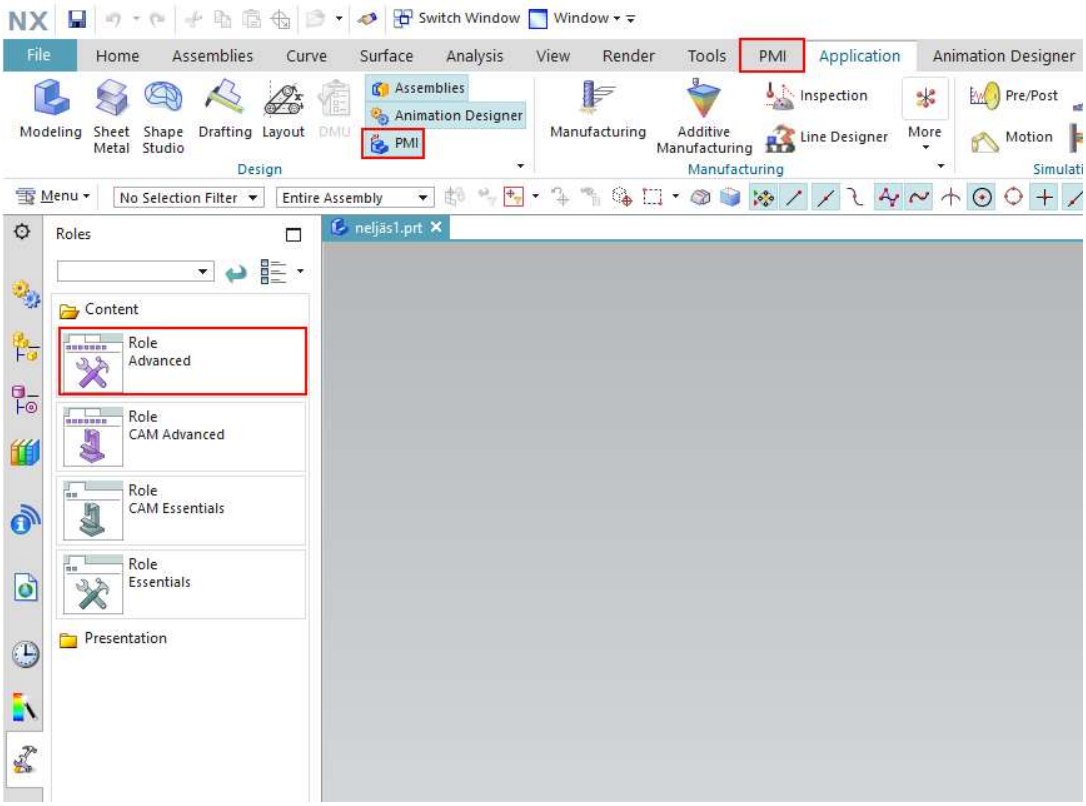
4. PRODUCT MANUFACTURING INFORMATIONIN KÄYTTÖ SIEMENS NX -YMPÄRISTÖSSÄ

Useat CAD-ohjelmat tarjoavat jo mahdollisuuden Model-Based Definitionin käyttämiseen ja jokainen näistä on toiminnoiltaan hieman erilainen. Tässä luvussa tarkastellaan miten Siemens NX ympäristön omat PMI toiminnot toimivat, minkälaista on luoda kuvaa 3 vastaava MBD-malli sekä miten hyvin tämä malli viestii samat tiedot kuin perinteisempi malli.

4.1 Alkunäkymä

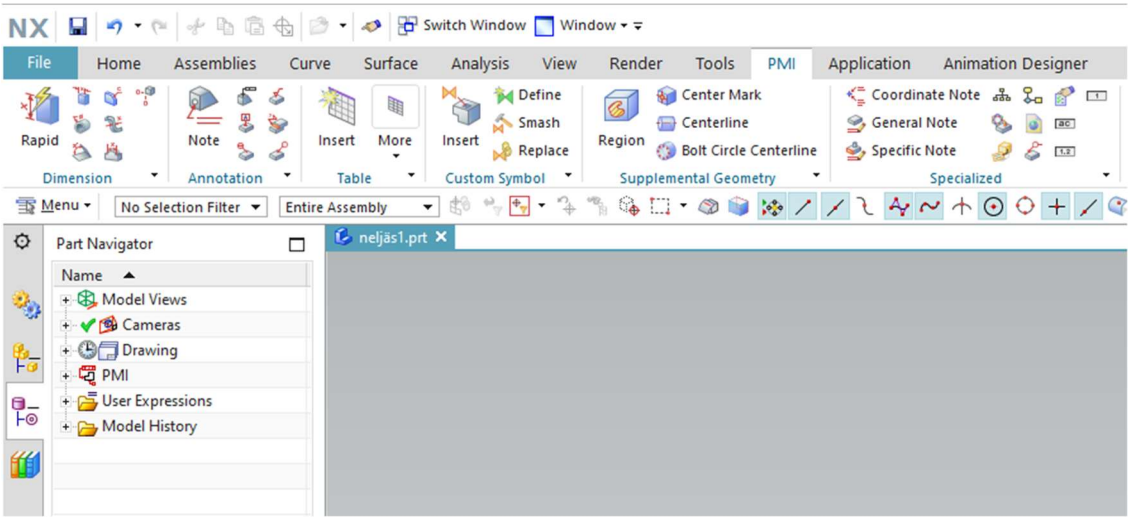
Kun Siemens NX:n PMI-valikon aukaisee, toiminnot ovat hyvin samanlaisia kuin perinteisen piirustuksien tekemiseen tarkoitetussa työkalussa. PMI-valikko antaa jopa enemmän mahdollisuuksia erilaisille merkinnöille, joita ei suoraan piirustus valikosta löydy.

Itse valikkoa ei NX:n vakio asetelmasta löydy vaan se pitää käyttäjän ottaa käyttöön kuvan 4 osoittamalla tavalla. Ensiksi tulee kytkeä päälle Advanced-rooli, jonka jälkeen Application valikosta PMI tulee painaa päälle. Näiden vaiheiden jälkeen PMI valikko näkyy muiden valikkojen joukossa.



Kuva 4. *Punaisella korostettuina PMI:n käyttöön vaadittavat asetukset sekä PMI-valikko*

Kun kappaleeseen lisätään PMI, ne listataan työstetyn osan navigaattoriin (Part Navigator), joka näkyy kuvassa 5 vasemmalla. Osa navigaattorissa kohtaan 'Model Views' voi luoda tallennettuja näkymiä kappaleesta. Näiden avulla osa ja sen PMI voidaan esittää mahdollisimman tehokkaasti.



Kuva 5. *Rajattu kuva Siemens NX:n PMI-valikon alkunäkymästä*

4.2 Teknisten tuotemäärittelytietojen lisääminen 3D-malliin

Kun aloittaa PMI lisäämisen kappaleeseen, on suotavaa tehdä sille oma näkymä (Model View). Tähän näkymään lisätty PMI näkyy vain omassa näkymässään, joka auttaa hahmottamaan kokonaiskuvan kappaleesta, kun sen tarkastelua eivät sekoita kääntöpuolella olevat merkinnät. Näin myöskään kaikkea tietoa ei tarvitse tunkea yhteen näkymään, vaan näkymät voi jättää helposti ymmärrettäviksi, kun niitä on useampi.

PMI:n lisääminen toimii hyvin samankaltaisesti kuin perinteisessä dokumentoinnissa, mutta 3D-elementti lisää omat haasteensa. Jokainen merkintä menee vakiolta sovelluksen ehdottamaan suuntaan, joka pohjautuu näkymän asentoon. Tämäsaattaa hidastaa yksinkertaisten merkintöjen tekoa, jos suuntia joutuu muuttamaan tai merkintätapojen kanssa joutuu temppuilemaan. Valtaosa suosituksista on kuitenkin järkeviä ja ne auttavat hyvin hahmottamista. Yksinkertainen dokumentointi luonnistuu kohtalaisen hyvin pelkällä perinteisen dokumentoinnin taidolla. Dokumentoitaessa on myös työskentelevälle insinöörille selvempää, mitä merkintöjä on tekemässä kappaleen kolmiulotteisuuden ansiosta.

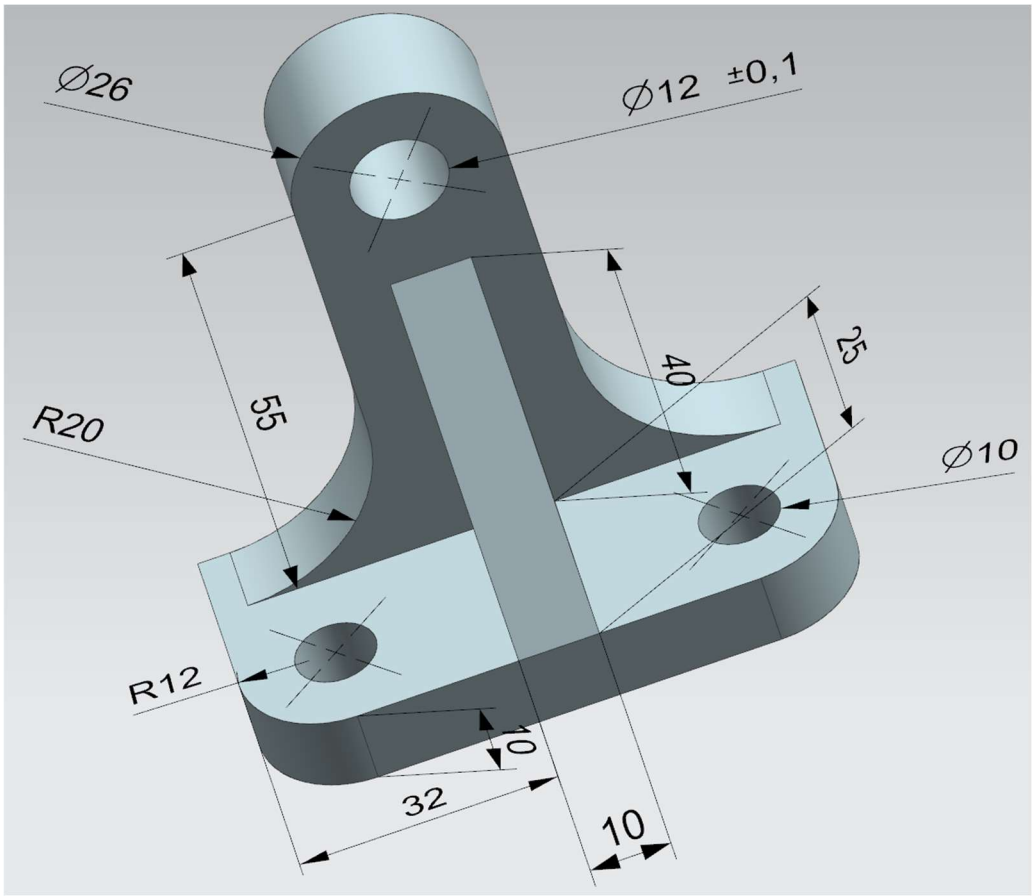
PMI-merkinnöissä on myös käytännöllistä, että geometrisia dimensioita muuttamalla myös itse kappale muuttuu. Näin kappaleeseen voidaan tehdä muutoksia vielä dokumentoinnin aikanakin, jos huomataan virheitä, tai kappaleelle tulee uusia vaatimuksia.

Siemens NX tekee dokumentoinnin sekä tarkastelun helpoksi, sillä merkintöjen tekstit kääntyvät aina katselu kuvakulman mukaisesti, niin kuin SFS-ISO-16792:ssa ohjeistetaan. Tämän vuoksi dokumentoidessa ei tarvitse asetella tekstejä tietyllä tavalla ja työ nopeutuu.

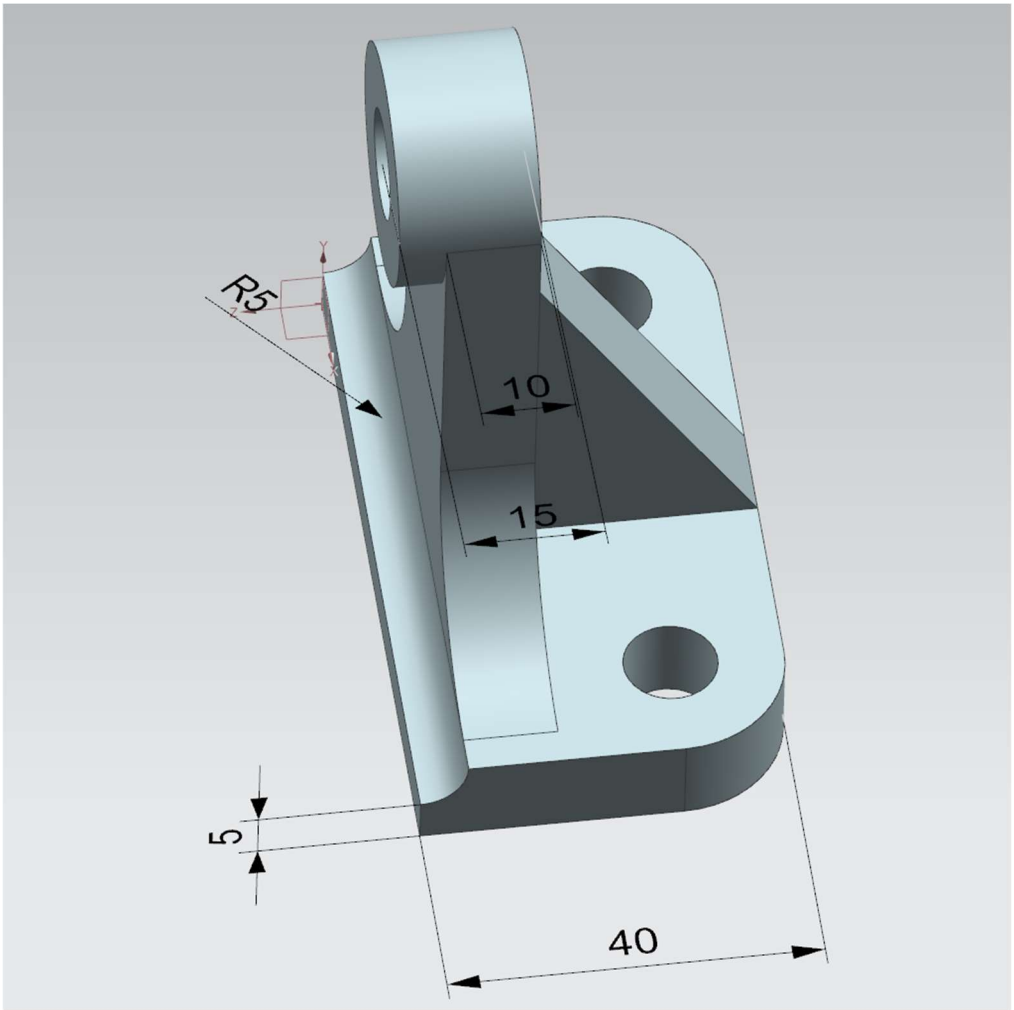
4.3 Valmis tuotemäärittelytietoja sisältävä malli

Kun halutut PMI:t ovat lisätty, voi kappaletta edelleen tarkastella ja muokata samalla tavalla kuin normaalia 3D-mallia. Halutessaan käyttäjä voi kuitenkin liikkua eri tallennettujen näkymien välillä, missä kyseiseen näkymään olennaiset PMI-annotaatiot esittävät kappaleen tuotemäärittelytiedot. Kappaletta voi myös muokata PMI-arvoja muuttamalla.

Viimeistellystä PMI-mallista löytyy kaikki samat tiedot kuin vastaavasta perinteisen tavan mallista. Näkymiä vaaditaan joissain tilanteissa vähemmän kuin työpiirustuksia käyttäessä, sillä mallit viestivät selvemmin kappaleen kokonaisuuden.



Kuva 6. *Yksinkertainen PMI malli Siemens NX sovelluksessa*

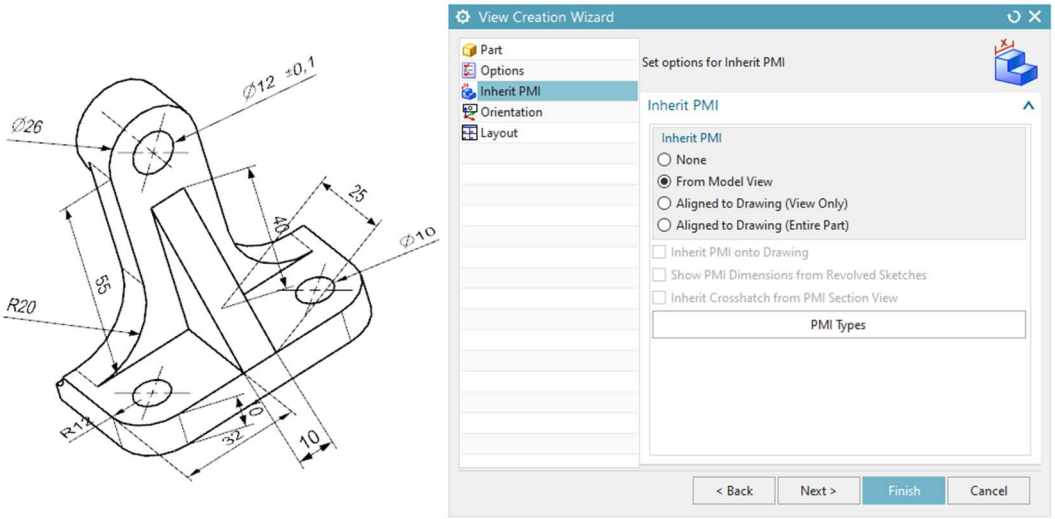


Kuva 7. *Tallennetuilla näkymillä saadaan viestittyä kokonaiskuva kappaleesta tehokkaasti*

4.4 2D-dokumentin luominen Product Manufacturing Informationin avulla

Vaikka yksi tavoitteista MBD-dokumentoinnissa on päästä eroon 2D-työpiirroksista, saattaa alihankkijoilla olla niiden käytölle tarvetta. Tällaista tarvetta varten NX tarjoaa myös mahdollisuuden luoda työpiirroksia nopeasti tallennetuista PMI-näkymistä.

Työpiirrokset luodaan normaaliin tapaan Drafting-työkalun puolella, valitsemalla oikea tallennettu näkymä, joka sisältää PMI:tä. On syytä huomata, että NX ottaa juuri samat tiedot työpiirrokseen kuin kyseisessä näkymässä on. Myös kuvakulma, joka tallennetulla näkymällä on, pysyy työpiirroksessa samana. Ongelmana voi olla myös työpiirrosten mustavalkoisuus. Näiden syiden vuoksi osa tiedoista ei välttämättä välity katsojalle yhtä selkeästi kuin PMI vastine, jos tallennettuja näkymiä ei olla luotu tätä tarkoitusta varten sopiviksi.



Kuva 8. *Tallennetusta näkymästä otettu kuva ja siihen vaaditut lisäasetukset.*

5. TEKNISIÄ TUOTEMÄÄRITTELYTIETOJA SISÄLTÄVIEN MALLIEN TARKASTELU ERI SOVELLUKSILLA

Vaikkakin PMI edesauttaa mallien viestimistä sidosryhmien välillä, niin seuraavaksi pulmaksi muodostuu tiedonsiirto. Yksinkertaisimmillaan mallin voi tallentaa natiiviin tiedostoformaattiin, eli käytetyn 3D-CAD-ohjelman omalle tiedostoformaatille. Jos kuitenkaan sidosryhmillä ei ole oikeuksia samaan CAD-systeemiin, on malli muutettava toiseen tiedostomuotoon. (Bijnens & Cheshire 2019)

On olemassa neutraaleja 3D-CAD-tiedostoformaatteja, jotka ovat yhteen toimivia useilla CAD-ohjelmistoilla sekä mallin tarkasteluun tarkoitetuilla lukutyökaluilla (Nguyen 2021a). Nämä neutraalit tiedostoformaatit ovat suosittuja tämän ominaisuuden vuoksi, sillä ne eivät rajoita yhteistoimintaa saman lisenssin omaavien osapuolten välille. Tässä luvussa perehdytään tarkemmin eri lukutyökaluihin sekä tiedostomuotoihin.

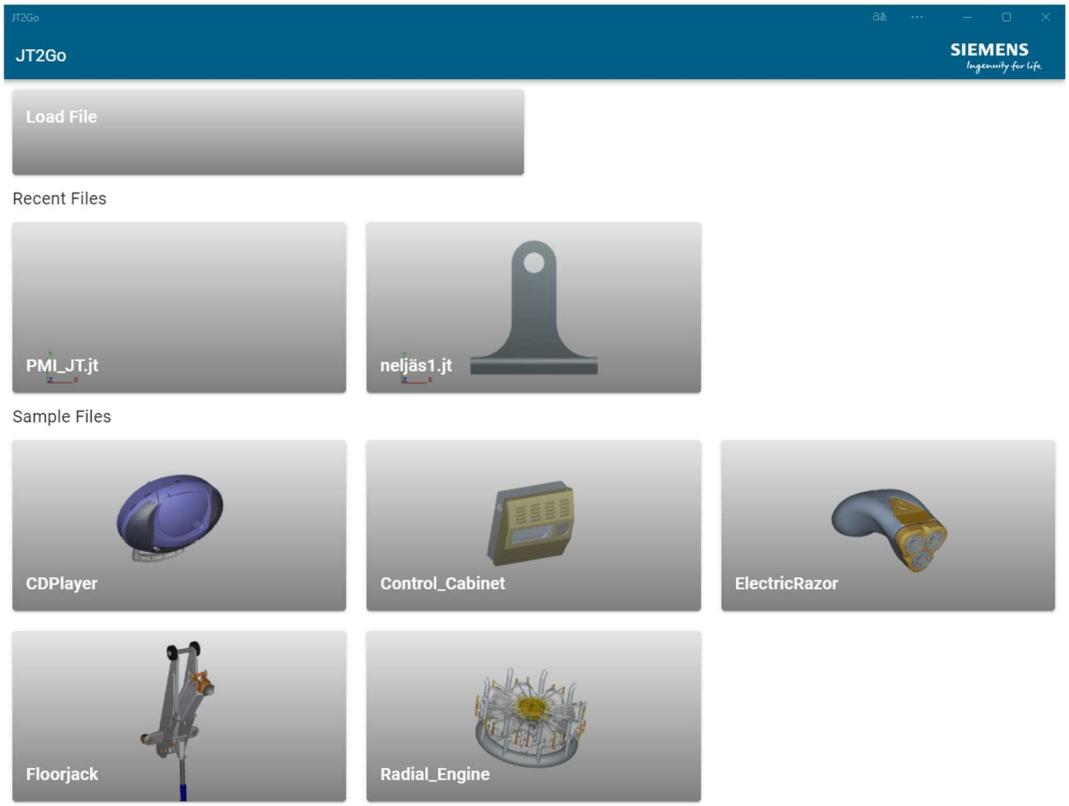
5.1 Lukutyökalut

Lukutyökaluilla tarkoitetaan tässä neutraalin 3D-CAD-tiedoston avaamiseen tehtyä sovellusta, joiden avulla vain tarkastelu on mahdollista, ja joilla kappaleeseen ei pystytä tekemään muutoksia. Lukutyökalut eivät usein vaadi lisenssejä, vaan niitä on saatavilla verkosta ilmaiseksi. Tarkastellaan muutamaa ilmaisista työkaluista.

5.1.1 JT2GO

JT2GO on Siemensin kehittämä JT-tiedostoformaattiin erikoistunut 3D-mallien lukutyökalu. Se toimii suoraan verkosta ja työpöytä sovelluksena ilman lisenssejä. Perusgeometrian lisäksi JT2GO pystyy myöskin esittämään malliin tallennetun PMI:n sekä tallennetut näkymät.

Sovelluksessa on vakiona esillä myös muutama esimerkki PMI-malli, joita voi tarkastella ennen oman mallin tuomista. Muita ominaisuuksia ovat mahdollisuus tehdä merkintöjä malliin, kuvakaappauksien otto, ja kyky esittää poikkileikkauksia mallista.



Kuva 9. *JT2GO:n päävalikko*

5.1.2 eDrawings

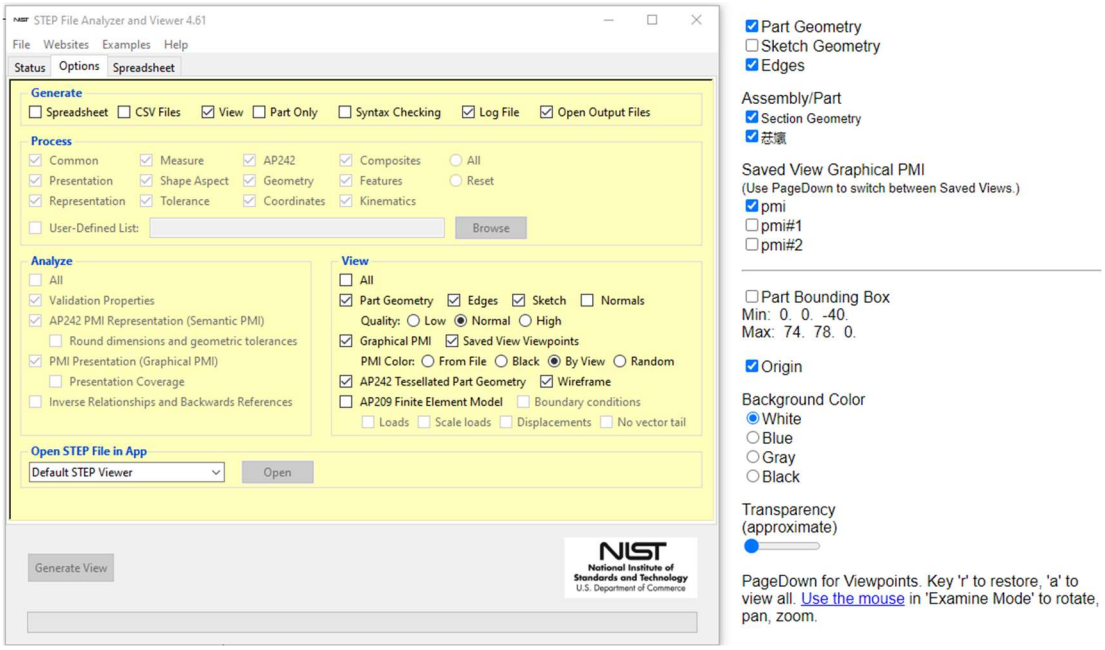
Dassault systemes:in katselutyökalu eDrawings tukee PMI-tiedostoja, kuten yleisesti käytettyjä STEP242-tiedostoja. Sovellus tarjoaa mahdollisuuden tehdä merkintöjä ja poikkileikkauksia, sekä mahdollisuuden mitata geometrisia etäisyyksiä.

Sovelluksessa on kuitenkin heikkouksia, kuten sen puute tukea tallennettuja näkymiä. Monimutkaiset kappaleet voivat sisältää paljon erilaisia PMI-merkintöjä, joiden tarkastelu vaikeutuu huomattavasti ilman kykyä jaotella PMI:tä eri näkymiin.

5.1.3 NIST STEP File Analyzer and Viewer

STEP File Analyzer and Viewer on STEP-tiedostojen tarkasteluun tarkoitettu sovellus. Se tukee PMI-tiedostoja ja myös kohtalaisesti tallennettuja näkymiä. Alkunäkymässä on valikko, josta käyttäjä voi tarkentaa miten tiedostonsa haluaa aukeavan.

Kun sovelluksessa avataan STEP242-tiedosto se aukeaa selaimessa esittäen kaiken geometrian ja PMI:n. Sivuvalikosta voi kuitenkin valita omien tallennettujen näkymien mukaiset PMI:t pois näkyviltä tai takaisin näkyville. Sovellus ei tue merkintöjen tekoa, vaan on pelkästään tarkasteluun.



Kuva 10. *NIST:n työkalun alkunäkymä (vas.) ja avatun tiedoston valikko (oik.)*

5.2 Tiedostomuodot

Neutraaleja 3D-CAD-tiedostoja on useita mistä valita, mutta PMI:n tallentamiseen ne eivät kaikki sovi. Vertaillaan seuraavaksi mitkä tiedostomuodot ovat parhaita juuri PMI-mallien säilömiseen.

5.2.1 STL ja IGES

Stereolithography (STL) tiedostot keskittyvät mallien pinta geometriaan ja muotoihin, mutta jättävät huomioimatta rakenteet ja värin. Tämän vuoksi ne eivät toimi CAD-systeemeissä, jotka operoivat pääosin kiinteillä kappaleilla. STL:n pääkäyttökohteita ovat 3D-printtaaminen ja nopea prototyyppien valmistaminen. (Nguyen 2021c)

Initial Graphics Exchange Specification (IGES) on vanhin neutraali CAD-tiedostoformaatti, jonka tarkoitus on toimia ainoastaan säiliönä mallin geometrialle (Nguyen 2021a). Kumpikaan näistä tiedostomuodoista ei siis kykene säilömään PMI-malleja.

5.2.2 STEP

Standard for the Exchange of Product Data (STEP) on suosittu neutraali CAD-tiedostoformaatti, joka toimii useissa CAD-ohjelmissa. STEP on ISO standardin määrittelemä ja siihen on tehty useita päivityksiä. Uusin standardi on tehty vuonna 2020 (ISO-10303-242:2020) ja sen mukainen versio STEP:stä (STEP 242) tukee PMI-malleja sekä on koneluettava. Siinä yhdistyvät muiden uudistuksien ohella entinen STEP AP203 ja STEP AP214. (Nguyen 2021a)

Ongelmana STEP-tiedostoissa on niiltä puuttuva ominaisuus esittää kappaleita ”kevyessä” muodossa, minkä vuoksi ne eivät sovellu kappaleen yleiseen visualisointiin. Myöskin tiedostokoot ovat STEP-malleilla suuria. *(Pfouga & Stjepandić 2015, s.577)*

5.2.3 QIF

Quality Information Framework (QIF) on melko uusi ISO-standardin mukainen neutraali CAD-tiedostoformaatti parhaimmalla Model-Based Design tuella, varsinkin koneluettavuuden osalta automaatiossa ja data analyyseissä (Nguyen 2021a). QIF on rakennettu XML tiedostomuodon tavoin, jotta se toimisi hyvin muissa systeemeissä ja applikaatioissa sekä muiden virallisten standardien kanssa (Nguyen 2021e).

Siemens NX ei kuitenkaan vielä tue QIF-tiedostoja, joten tässä työssä ei niitä tulla käsittelemään tarkemmin.

5.2.4 JT

JT on Siemensin avoimella saatavuudella (open access) julkaisema tiedostomuoto, joka tukee PMI:tä sekä mallin rajaesityksen (B-rep) esittämistä (Nguyen 2021a; JT Siemens Software n.d.). JT-tiedostoja käytetään pääosin Siemensin omissa työkaluissa kuten JT2GO (Nguyen 2021a), mutta myös Dassault Systemes CATIA, PTC Pro/ENGINEER sekä Autodesk Inventor tukevat JT-tiedostoja (Universal-Robots 2020).

Suuri etu JT-tiedostoissa on niiden kyky kompressoida tiedostoja pienempään muotoon, joka mahdollistaa kappaleen ”kevyen” visualisoinnin. Tämän vuoksi JT-tiedostot sopivat hyvin myös PMI:n esitykseen. *(Pfouga & Stjepandić 2015, s.577–578)*

5.2.5 3D PDF

3D PDF-tiedostot ovat suosittuja, koska ne ovat helpoiten tarkasteltavissa. Niiden esittämiseen tarvitsee vain pelkän Adobe Reader sovelluksen, joka monilta löytyy jo entuudestaan puhelimista sekä tietokoneistaan. (Nguyen 2021b)

3D PDF-tiedostoja on kahdentyyppisiä. Vanhempi näistä kahdesta on U3D, jota määrittelee ECMA:n standardi, ja uudempi on ISO 14739 standardin määrittelemä PRC (Pfouga & Stjepandić 2015*)*. PRC tiedostoformaatti on ideaalinen MBD mallintamiseen, sillä siinä on tuettuna PMI ja B-rep, ja koska se mahdollistaa korkealaatuisen tarkan esityksen mallille (PDF3D 2015).

Pfouga ja Stjepandić (2015, s. 582) vertailevat työssään sekä suosituimpien 3D-CAD-formaattien, että näiden kahden 3D PDF-formaatin ominaisuuksia keskenään. Listattuna on useita MBD-dokumentoinnin kannalta hyödyllisiä ominaisuuksia, ja miten eri formaatit

tukevat niitä: täysin tuettu, osittain tuettu tai ei ollenkaan tuettu. Annetuilla vertailukriteereillä 3D PDF osoitetaan monipuolisimmaksi formaatiksi, vaikkakin JT-formaatti on hyvin lähellä samoja ominaisuuksia. (Kuva 11)

Capabilities	3D CAD Formats			3D PDF	
	IGES	STEP	JT	U3D	PRC
Open standard	ANSI	ISO 10303	ISO 14306	ECMA	ISO 14739
Geometry type	BREP 2D & 3D	BREP 2D & 3D	BREP + Tessellated 3D	Tessellated 3D Only	BREP + Tessellated 3D
Texture, material, light, animation	Partial support	Partial support	Partial support	Full support	Partial support
Assembly tree, physical properties, meta data	No support	Full support	Full support	Partial support	Full support
Model Views, PMI and GD&T	No support	Full support	Full support	No support	Full support
CAx interoperability	Full support	Full support	Full support	No support	Full support
Measurement accuracy	Full support	Full support	Full support	Partial support	Full support
Very large assembly size	Partial support	Full support	Full support	Partial support	Full support
Compression	No support	No support	Partial support	Partial support	Full support
Low-end visualization & publishing	No support	No support	Partial support	Full support	Partial support
High-end visualization & interoperability	No support	No support	Full support	No support	Full support

Full support Partial support No support

Kuva 11. *Tiedostomuotojen vertailu (Pfouga & Stjepandić 2015, s.582).*

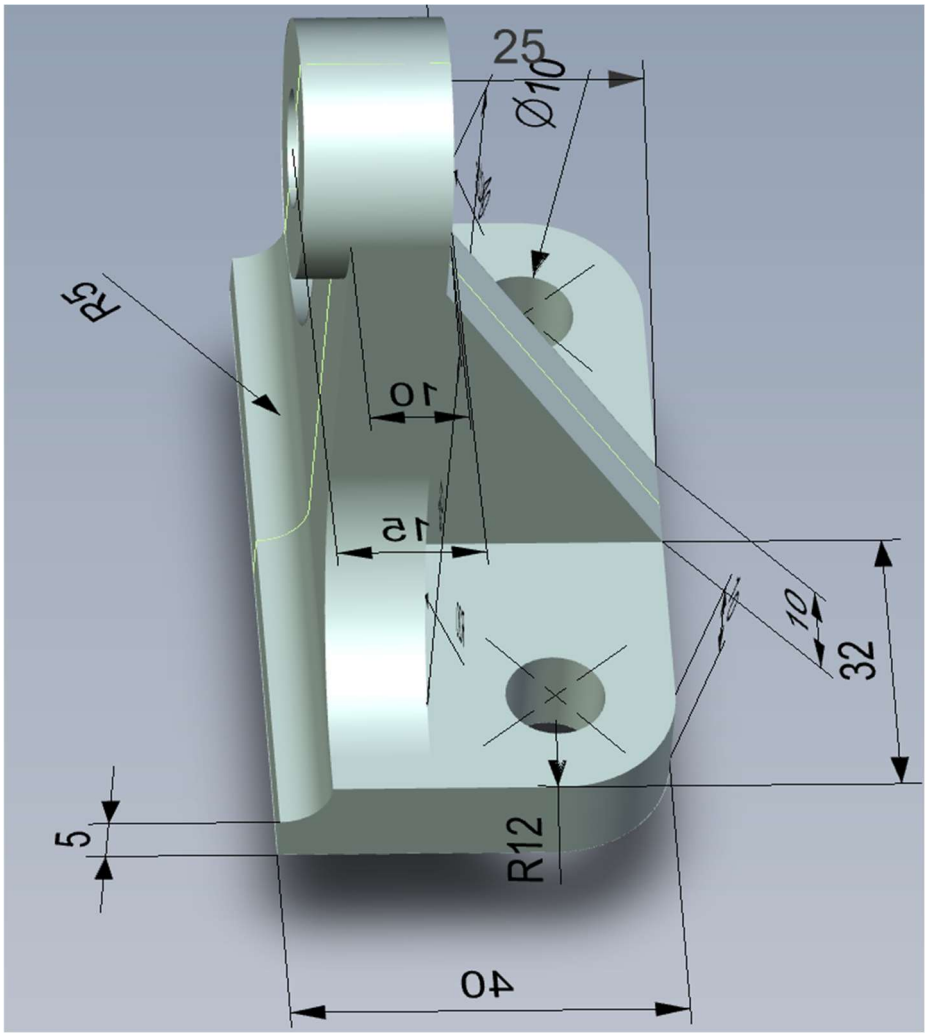
5.3 Haasteet tiedonsiirrossa

Kaikilla osapuolilla ei aina ole samoihin ohjelmiin lisenssejä, mikä johtaa siihen, että tiedostoja tulee tallentaa neutraaleihin tiedostoformaatteihin. Tämän jälkeen tiedostoihin saatetaan tehdä muutoksia muissa ohjelmissa ja taas siirtää edelleen neutraaliformaatin kautta alkuperäiseen sovellukseen tai CAM-systeemiin Tämä asettaa vaatimuksia neutraaliformaattien tarkkuudelle. Jotta tarkkuus on riittävä, on pienimmän sallittavan virheen oltava pienempi, kuin pienin käytetty toleranssi. (Bijnens et al. 2018)

Vaikka katseluohjelmat ovat kätevä tapa viestiä kappaleet ilman, että vastapuoli joutuu ostamaan natiiviohjelman lisenssin, ne eivät viesti tietoa yhtä luotettavasti kuin natiiviohjelmat. SFS-ISO 16792 (2016) määriteltiin, kuinka annotaatioiden luettavuus pitää säilyä, vaikka kappaletta käännellään tarkasteltaessa. Tämä ei yhdessäkään työssä käytetyissä katseluohjelmissa toteudu, joten annotaatiot voivat olla hyvinkin epäselviä.

Vielä enemmän ongelmia ilmeni eDrawings ohjelmassa, jossa ei ollut tallennettuja näkymiä ollenkaan, eikä keinoa suodattaa ei-haluttuja PMI-merkintöjä pois näkyviltä. Tämän

lisäksi merkintöjen tekstit eivät olleet oikeinpäin edes niille tarkoitetussa kuvakulmassa. (Kuva 12)



Kuva 12. *Tiedon välittymisen ongelmia*

6. YHTEENVETO

Työssä tutkittiin mallipohjaista tuotemäärittelyä (MBD), joka on 2D-työpiiroksille vaihtoehtoinen dokumentointimenetelmä. Työn päätavoitteina oli selvittää miksei MBD:tä ole vielä laajalti otettu käyttöön. Tutkiminen aloitettiin määrittämällä MBD:n mukainen toimitapa ja vertaamalla sitä perinteiseen menetelmään. Työssä myöskin perehdyttiin PMI:n käyttöön NX CAD-ohjelmassa, ja luotiin MBD-malli, jota verrattiin vastaavaan 2D-työpiirokseen. Työn ohella perehdyttiin myös tiedonsiirtoon pääosin katseluohjelmien ja tiedostoformaattien näkökulmasta.

Dokumentointi MBD:n mukaisesti oli laajalti samanlaista perinteisen tavan kanssa. Vaikkakin tietyt kolmiulotteisuuden elementit tuovat dokumentointiin omat haasteensa, oli sen oppiminen nopeaa.

Tiedonsiirto osoittautui hyvin keskinäiseksi aihealueeksi työssä, sillä siitä johtuu useat MBD:n tämän päivän haasteet. Vaikka MBD-malleja pystyy tekemään jo vaivattomasti CAD-ohjelmilla, nämä mallit eivät pääse täyteen potentiaaliinsa, sillä tukeva teknologia ei ole vielä samassa pisteessä niiden kanssa. Ilmaiset katseluohjelmat neutraaliformaattien kanssa eivät esitä PMI-dataa yhtä hyvin kuin natiivitiedostot omissa ohjelmissaan, mikä vähentää MBD:n käytön arvoa. Kaikissa katseluohjelmissa vastaan tuli tekstinluettavuuden ongelmat ja osassa tallennettujen näkymien puute. Kuitenkin jos nämä ongelmat sivuutetaan käyttämällä natiiviohjelmia tiedonsiirtoon, ovat MBD-mallit selkolukuisempia kuin perinteiset vastineet, ja ne vaativat vähemmän näkymiä kappaleen ymmärtämiseksi.

Neutraaleja tiedostoformaatteja tutkittiin useita, ja niistä PMI käyttöön sopivia olivat QIF, JT, 3D PDF sekä STEP AP242. Kuitenkaan mikään katselu- tai mallinnusohjelmista ei tukenut kaikkia näistä tiedostoista. Työssä kokeilluista formaateista JT suoriutui parhaiten, mutta sen ongelmana on heikko tuettavuus muilla mallinnusohjelmilla. Tutkimus osoitti myös 3D PDF:n vahvaksi tiedonsiirtoformaatiksi. Näillä kahdella yhteistä on niiden kevyt tiedostokoko, hyvä tarkkuus sekä vahva tuki korkeatason visualisoinnille (Pfouga & Stjepandić 2015, s.582).

Näyttää kuitenkin siltä, että teknologian kehittymisen sekä onnistuneiden kokeilujen myötä siirtyminen MBD:n käyttöön on todennäköistä, sillä se vastaa teollisuuden neljännen vallankumouksen (Industry 4.0) tarpeisiin tarjoamalla toivottuja ominaisuuksia koneensuunnitteluun.

LÄHTEET

Bijnens, J., Kellens, K. & Cheshire, D. (2018). Accuracy of geometry data exchange using STEP AP242. 6th CIRP Global Web Conference “Envisaging the future manufacturing, design, technologies and systems in innovation era”. pp. 219–224. Saatavissa: https://www-sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S2212827118312113?via%3Dihub

Bijnens, J. & Cheshire, D. (2019). The Current State of Model Based Definition. Computer-Aided Design & Applications. Vol.16(2), pp. 308–317. Saatavissa: http://cad-journal.net/files/vol_16/CAD_16(2)_2019_308-317.pdf

Hou, Y., Liu J. & Yue G. (2021). 3D Interpreted Model: A Novel Product Definition Model by Integrating and Fusing a 3D Annotated Model and Design Knowledge. Appl. Sci. Vol.11(16), pp. 1–23. Saatavissa: https://www.mdpi.com/2076-3417/11/16/7192/htm

Kupari, N. (2020). PMI tekniikan alalla, Teknisten tuotemäärittelytietojen liittäminen 3D-malliin. Kandidaatintyö, Tampereen yliopisto. Saatavissa (viitattu 7.11.2021): https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/122336/KupariNiklas.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Nguyen, J. (2021a). Best STEP File to Use: AP203, AP214, and AP242. Capvidia Blog. Päivitetty 15.2.2021. Saatavissa (viitattu 30.10.2021): https://www.capvidia.com/blog/best-step-file-to-use-ap203-vs-ap214-vs-ap242

Nguyen, J. (2021b). MBD (Model-Based Definition): 2021 Edition. Capvidia Blog. Päivitetty 8.2.2021. Saatavissa (viitattu 30.10.2021): https://www.capvidia.com/blog/mbd-model-based-definition-in-the-21st-century

Nguyen, J. (2021c). Top 8 Neutral 3D CAD File Formats. Capvidia Blog. Päivitetty 18.1.2021. Saatavissa (viitattu 14.11.2021): https://www.capvidia.com/blog/top-neutral-3d-cad-file-formats

Nguyen, J. (2021b). What is PMI (Product Manufacturing Information). Capvidia Blog. Päivitetty 1.3.2021. Saatavissa (viitattu 30.10.2021): https://www.capvidia.com/blog/what-is-pmi-product-manufacturing-information

Nguyen, J. (2021e). QIF (Quality Information Framework): 2021 Definitive Guide. Capvidia Blog. Päivitetty 23.3.2021. Saatavissa (viitattu 7.11.2021): https://www.capvidia.com/blog/qif-quality-information-framework-definitive-guide

PDF3D (2015). About PRC, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 28.12.2021): https://www.pdf3d.com/about-prc/.

Peltola, J. (2020). Koneistettavan kappaleen mallipohjainen tuotemäärittely. Diplomityö, Tampereen yliopisto. Saatavissa (viitattu 28.11.2021): https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/122954/PeltolaJaakko.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Pfouga, A. & Stjepandić, J. (2015). Leveraging 3D CAD Data in Product Life Cycle: Exchange – Visualization – Collaboration. Transdisciplinary Lifecycle Analysis of Systems. Vol. 2, pp. 575–584. Saatavissa: https://ebooks.iospress.nl/publication/40011

Quintana, V., Rivest, L., Pellerin, R., Venne, R. & Kheddouci, F. (2010). Will Model-based Definition replace engineering drawings throughout the product lifecycle? A global perspective from aerospace industry. Vol. 61(5), pp. 497–508.

Rinos, K., Kostis, N., Varitis, E. & Vekis, V. (2021). Implementation of model-based definition and product data management for the optimization of industrial collaboration and productivity. 31st CIRPDesign Conference 2021(CIRPDesign 2021), pp. 355–360. Saatavissa: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827121005497?via%3Dihub

Ruemler, S., Zimmerman, K., Hartman, N., Hedberg, T. & Feeny, A. (2017). Promoting Model-Based definition to establish a complete product definition, Transactions of the ASME. Vol.139(5), pp. 1–7.

Siemens PLM (2021a). JT, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 14.11.2021): https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/plm-components/jt.html

Siemens PLM (2021b). JT2GO, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 14.11.2021): https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/plm-components/jt2go.html

Siemens PLM (2021c). Product and Manufacturing Information (PMI), verkkosivu. Saatavissa (viitattu 30.10.2021): https://www.plm.automation.siemens.com/en_us/Images/9645_tcm1023-4581.pdf

SFS-ISO 16792 (2021). Tekninen tuotedokumentointi. Digitaalista tuotemäärittelytietoa koskevat käytännöt, Suomen standardoimisliitto, Helsinki, s. 1–112.

Tekla (2021) Randselva Bridge, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 28.12.2021): https://www.tekla.com/bim-awards/randselva-bridge

Universal-robots (2020). JT File Format for your Robots, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 7.12.2021): https://www.universal-robots.com/articles/ur/application-installation/jt-file-format-for-ur-robots/

Uski, P., Pulkkinen, A., Hillman, L & Ellman, A. (2020). Issues on Introducing Model-Based Definition – Case of Manufacturing Ecosystem, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 28.11.2021): https://www.tuni.fi/sites/default/files/media/file/3_pulkkinen_issues-on-introducing-model-based-definition.pdf