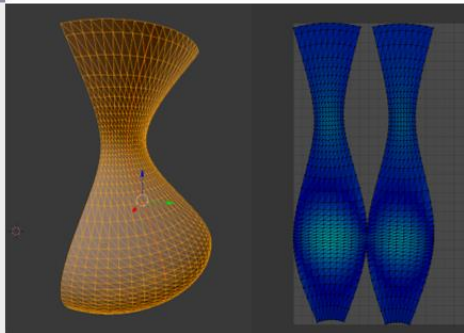
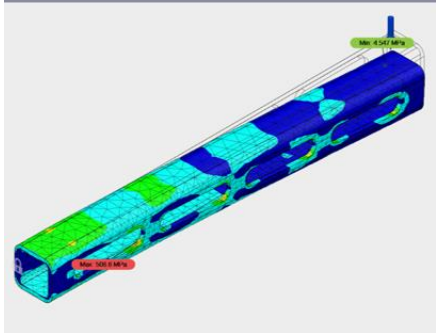
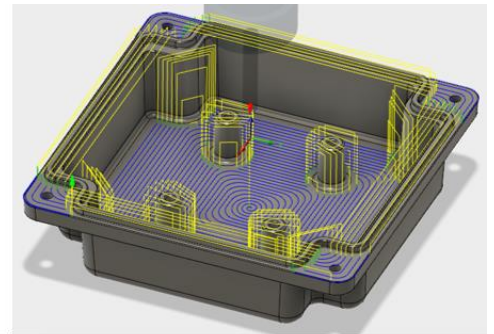
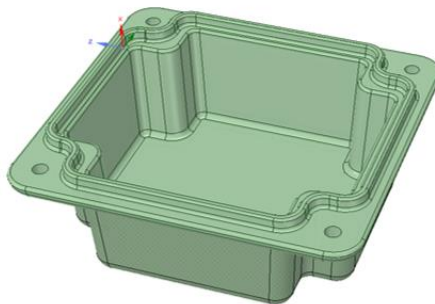
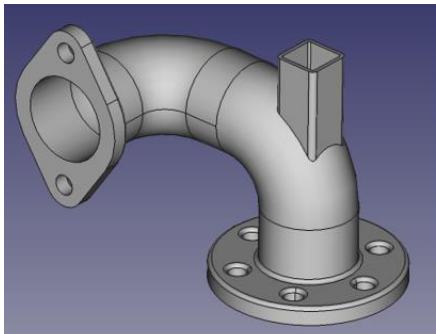


Kustannustehokkaat Cad, Fem ja Cam -ohjelmat

Tutkimus saatavilla olevista ohjelmista tammikuussa 2018

Terho Iso-Junno



OULUN YLIOPISTO
KERTTU SAALASTI INSTITUUTTI

FMT

FUTURE MANUFACTURING
TECHNOLOGIES
Tulevaisuuden tuotantoteknologiat



**KERTTU SAALASTI
INSTITUUTTI**

**OULUN
YLIOPISTO**

Tulevaisuuden tuotantoteknologiat FMT-tutkimusryhmä

Terho Iso-Junno

KUSTANNUSTEHOKKAAT CAD, FEM JA CAM -OHJELMAT

Tutkimus saatavilla olevista ohjelmista tammikuussa 2018

OULUN YLIOPISTO

Kerttu Saalasti Instituutin julkaisuja

Tulevaisuuden tuotantoteknologiat (FMT) -tutkimusryhmä

ISBN 978-952-62-2018-5 (painettu)
ISBN 978-952-62-2019-2 (elektroninen)

ISSN 2489-3501 (painettu)

Terho Iso-Junno

Kustannustehokkaat CAD, FEM ja CAM -ohjelmat. Tutkimus saatavilla olevista ohjelmista tammikuussa 2018.

Oulun yliopiston Kerttu Saalasti Instituutti, Tulevaisuuden tuotantoteknologiat (FMT) -tutkimusryhmä

Oulun yliopiston Kerttu Saalasti Instituutin julkaisuja 6/2018

Nivala

Tiivistelmä

Nykyaikaisessa tuotteen suunnittelussa ja valmistuksessa tietokoneohjelmat ovat avainasemassa olevia työkaluja. Kaupallisten ohjelmien lisenssihinnat voivat nousta korkeiksi ja olla hankinnan esteenä etenkin aloittelevilla yrityksillä. Tässä tutkimuksessa on kartoitettu kustannuksiltaan edullisia CAD, FEM ja CAM -ohjelmia, joita voisi käyttää yritystoiminnassa.

CAD-ohjelmien puolella perinteisille 2D CAD-ohjelmille löytyy useita hyviä vaihtoehtoja. LibreCAD ja QCAD ovat helppokäyttöisiä ohjelmia perustason piirtämiseen. Solid Edge 2D Drafting on erittäin monipuolinen täysiverinen 2D CAD, joka perustuu parametriseen piirtämiseen.

3D CAD-ohjelmien puolella tarjonta on tasoltaan vaihtelevaa. FreeCad on lupaavin parametrinen avoimen lähdekoodin 3D CAD, joka on aktiivisessa kehityksessä. Kaupallinen Fusion 360 on ominaisuuksiltaan ja käytettävyydeltään paras tutkituista ohjelmista. Nopeaan pikamallintamiseen soveltuvat hyvin suoran mallinnustavan Designspark Mechanical ja Creo Elements/Direct Modeling Express.

Mallinnusohjelmien lisäksi 3D-suunnitteluohjelmista tutkittiin geometrian levitys-ohjelmia. Blender sisältää tehokkaan työkalun kaksoiskaarevien 3D-verkkojen levittämiseen. Plate 'n' Sheet Professional, Digital Pipe Fitter ja Sheet Lightning Pro soveltuvat hyvin putkiliitosten ja kartioiden geometrioiden levittämiseen tasoon.

FEM-ohjelmista kartoitettiin helppokäyttöisiä perustason lujuussimulointiin soveltuvia ohjelmia ja tutkittiin niiden antamien tulosten luotettavuutta. Fusion 360 on helppokäyttöinen ja antaa tutkimuksen perusteella tarkkoja tuloksia. Myös FreeCadin FEM-moduuli on käyttökelpoinen ja antaa tarkkoja tuloksia riittävän pienellä elementtiverkolla. Avoimen lähdekoodin FEM-ratkaisijoihin perustuva selainpohjainen SimScale osoittautui tutkimuksessa myös kohtuullisen hyväksi vaihtoehdoksi.

CAM-ohjelmista tutkittiin 2.5D ja 3D -ohjelmia. ECam on helppokäyttöinen 2.5D-ohjelma perustason koneistuksiin. SheetCam on levymateriaalien leikkaukseen ja koneistukseen hyvin soveltuva 2.5D CAM. Täysiveriseen 3D-koneistukseen soveltuu parhaiten Fusion 360, jonka Ultimate-versio tukee myös 5-akselista koneistusta.

Tutkimus kustannustehokkaista ohjelmista on tehty osana Meripohjolan uudistuva metalli- ja konepajateollisuus -hanketta. Tutkimuksen tavoitteena on edistää alueen yritysten digitalisaatiota. Hankkeen on rahoittanut Pohjois-Pohjanmaan Liitto ja EAKR.

Asiasanat: CAD, FEM, CAM

Terho Iso-Junno

Cost Effective CAD, FEM and CAM software. Study of the available programs in January 2018.

University of Oulu, Kerttu Saalasti Institute, Future Manufacturing Technologies (FMT) -group

Publication of Kerttu Saalasti Institute of the University of Oulu 6/2018
Nivala, Finland

Abstract

Computer programs are holding a key position in the modern product design and manufacturing process. However, license costs of commercial software can be high preventing especially startup companies from purchasing required software. Low cost CAD, FEM and CAM software, which could be used in business, are researched in this study.

There are multiple good alternatives for traditional 2D CAD in the field of CAD software. LibreCAD and QCAD are easy-to-use programs for general basic drawing tasks. Solid Edge 2D Drafting is versatile and fully equipped 2D CAD, which is based on parametric sketching.

Quality of available 3D software is varying. FreeCad is the most promising open source 3D CAD, which is still in active development. Commercial Fusion 360 is the most advanced and has the best usability from the tested programs. Designspark Mechanical and Creo Elements/Direct Modeling Express, which are direct modeling style software, are well suited for rapid prototype modeling.

Besides the geometry modeling software, geometry unfolding software were researched. Blender includes a powerful tool for unwrapping double-curved geometry. Plate 'n' Sheet Professional, Digital Pipe Fitter ja Sheet Lightning Pro can be used to unfold pipe fittings and cone geometries into a plane.

Open source and low-cost FEM programs and reliability of the results given by those were studied. Fusion 360 is user-friendly software and according to the studies gives accurate results. FEM module of the FreeCad is also usable and it gives accurate results with well refined element mesh. Web browser based SimScale, which uses open source solvers, is also a reasonable option for business usage.

In the field of CAM software 2.5D and 3D programs were studied. ECam is user-friendly 2.5D CAM for basic level machining. SheetCam is well suitable for sheet metal cutting and machining in 2.5D. Fusion 360 was found to be the most versatile software for 3D machining. Ultimate license of Fusion supports also 5 axis machining.

This study of cost effective design and manufacturing software is done as a part of Meripohjola – Modernization of Metal and Machine Shop-Engineering Industries - project. Aim of the study is to improve digitalization in the Meripohjola area corporations. The project is funded by Council of Oulu Region and EAKR.

Keywords: CAD, FEM, CAM

Lyhenteet

CAD	Computer-aided design
FEM	Finite element method
CAM	Computer-aided manufacturing

Sisälllys

Lyhenteet	5
1 Johdanto	9
2 CAD-ohjelmat	11
2.1 Tutkimukseen valittujen ohjelmien kriteerit	11
2.2 2D-ohjelmat	11
2.3 3D-ohjelmat	13
2.3.1 Parametriseen mallinnustavan 3D-ohjelmat	14
2.3.2 Visuaalisen mallinnustavan 3D-ohjelmat	16
2.3.3 Suoran mallinnustavan 3D-ohjelmat	17
2.3.1 Tekstipohjaiset 3D-ohjelmat	18
2.4 Levitysohjelmat	18
2.4.1 Ohutlevyosien levitysohjelmat	19
2.4.2 Putkenlevitysohjelmat	19
2.4.3 Geometrian verkotukseen perustuvat levitysohjelmat	21
2.5 Yhteenveto CAD-ohjelmista	23
3 FEM-ohjelmat	25
3.1 Tutkimukseen valittujen FEM-ohjelmien kriteerit	25
3.2 Ohjelmien testaaminen	26
3.3 Testatut FEM-ohjelmat	27
3.3.1 Z88Aurora	27
3.3.2 Elmer FEM	28
3.3.3 Fusion 360	29
3.3.4 FreeCad	29
3.3.5 SimScale	29
3.3.6 Muut avoimen lähdekoodin simulointi-ohjelmat	30
3.4 Yhteenveto FEM-ohjelmista	31
4 CAM-ohjelmat	33
4.1 2.5D CAM-Ohjelmat	33
4.1.1 Avoimen lähdekoodin 2.5D CAM-ohjelmat	34
4.1.2 Kaupalliset 2.5D CAM-ohjelmat	35
4.2 3D CAM-ohjelmat	36
4.2.1 Avoimen lähdekoodin 3D CAM-ohjelmat	37
4.2.2 Kaupalliset 3D CAM-ohjelmat	38
4.3 Yhteenveto CAM-ohjelmista	40
5 Yhteenveto tutkimuksesta	41
Kiitokset	42
Lähdeluettelo	43

Kuva 1. Testiosa mallinnettuna FreeCadilla (vasen) ja Fusion 360:llä.	15
Kuva 2. Testiosa mallinnettuna Designspark Mechanicalilla (vasen) ja Creolla.	17
Kuva 3. Kaksoiskaarevan pinnan levitystä Mesh Unfolderilla.	22
Kuva 4. Kaksoiskaarevan pinnan levitys Blenderillä.	22
Kuva 5. Testisimulaatioissa käytetyn taivutuspalkin ja levyosan geometria.	26
Kuva 6. Simulointitulosten vertailu taivutuspalkille.	27
Kuva 7. Simulointitulosten vertailu levyosalle	27
Kuva 8. Esimerkki ECamilla luodusta adaptiivisesta työstöradasta.	35
Kuva 9. Fusion 360:llä luotu spiraalimainen esimerkkityöstörata.	39

Taulukko 1. Testatut 2D CAD-ohjelmat	11
Taulukko 2. Testatut 3D CAD-ohjelmat	13
Taulukko 3. Tutkitut geometrian levitysohjelmat	18
Taulukko 4. Tutkitut FEM-ohjelmat.....	25
Taulukko 5. Tutkitut 2.5D CAM-ohjelmat.....	33
Taulukko 6. Tutkitut 3D CAM-ohjelmat.....	36

1 Johdanto

Erilaiset tietokonepohjaiset suunnittelu- ja simulointiohjelmat ovat nykyään välttämättömiä suunniteltaessa ja valmistettaessa tuotteita tietokoneohjatuilla työstökoneilla. Suunnittelutoimistoille ja konepajoille on tarjolla erilaisia ja eritasoisia kaupallisia ohjelmia, joiden lisenssikustannukset voivat kohota vuositasolla merkittäviksi. Tässä tutkimuksessa on kartoitettu edullisia kaupallisia ja avoimen lähdekoodin ohjelmia, joita voisi mahdollisesti käyttää maksullisten ohjelmien sijaan.

Tietokoneavusteisessa suunnittelussa (CAD, computer-aided design) on perinteisesti käytetty 2D-suunnitteluohjelmia, jotka ovat olleet luonnollinen jatkumo käsin piirtämiselle. Nykyään suunnittelu tehdään yleensä 3D-ohjelmilla, vaikkakin myös 2D-ohjelmat ovat edelleen jonkin verran käytössä.

Suunnittelun apuna voidaan käyttää elementtimenetelmään (FEM, finite element method) perustuvaa simulointia. Simuloinnissa voidaan tutkia esimerkiksi suunniteltavan tuotteen lujuutta, värähtelyä tai lämmön johtamista. Simuloinnin avulla voidaan suunnitella parempia tuotteita ja lyhentää tuotekehitykseen kuluva aikaa. FEM-ohjelmia löytyy erillisinä ohjelmoina, mutta nykyään myös valtaosa CAD-ohjelmista sisältää oman FEM-moduulin.

Tietokoneohjatut työstökoneet vaativat työstöä varten ohjelmakoodin. CAM-ohjelman (computer-aided manufacturing) avulla luodaan koneen työstöpäälle liikeradat koneen ymmärtämän G-koodin muodossa. Tutkimuksessa saatavilla olevia ilmaisia ja edullisia CAM-ohjelmia kartoitettiin ja tutkittiin niiden soveltuvuutta yrityskäyttöön.

Tutkimus kustannustehokkaista ohjelmista on tehty osana Euroopan aluekehitysraston (EAKR) ja Pohjois-Pohjanmaan Liiton rahoittamaa Meripohjolan uudistuva metalli- ja konepajateollisuus -hanketta. Tutkimuksen tavoitteena on edistää alueen yritysten digitalisaatiota tuottamalla uutta tietoa tietokoneavusteisessa suunnittelussa tarvittavista edullisista ohjelmista. Osarahoittajina hankkeessa ovat myös Raahen seudun yrityspalvelut, Ylivieskan seutukuntayhdistys ry, BusinessOulu, Nivala-Haapajärven seutu NIHAK ry, Lapin ammattikorkeakoulu, Oulun ammattikorkeakoulu ja Centria-ammattikorkeakoulu.

2 CAD-ohjelmat

2.1 Tutkimukseen valittujen ohjelmien kriteerit

Tutkimusta varten etsittiin ohjelmia, jotka ovat avoimeen lähdekoodiin perustuvia tai lisenssiltään edullisia. Hintarajauksena pidettiin noin 1000 € lisenssihintaa. Ohjelmia etsittiin internetistä hakukoneilla ja aiheeseen liittyviltä foorumeilta. Tutkimukseen valituilta ohjelmilta vaadittiin, että niiden lisenssin tulee sallia ohjelman kaupallinen käyttö. CAD-ohjelmista kartoitettiin 3D ja 2D -suunnittelu- ja mallinnusohjelmia sekä geometrian levitysohjelmia.

Löydettyjä kriteerit täyttäviä ohjelmia testattiin ja niiden ominaisuuksiin perehdyttiin. Testien perusteella arvioitiin ohjelmien soveltuvuutta oikeaan suunnittelukäyttöön. Ohjelmien ominaisuuksien monipuolisuutta ja käytettävyyttä arvioitiin asteikolla 0-5. Nollan saaneet ohjelmat ovat täysin soveltumattomia yrityskäyttöön, arvosana 5 vastaa modernia kaupallista CAD-ohjelmaa.

Testatuista ohjelmista löytyi monen tasoisia ohjelmia. Kaupallisiin ohjelmiin verrattuna avoimen lähdekoodin ohjelmat ovat jäljessä sekä käytettävyydeltään että ominaisuuksiltaan. Perustason suunnittelussa parhaimpien tutkittujen ohjelmien ominaisuudet riittävät kuitenkin hyvin.

2.2 2D-ohjelmat

2D-ohjelmia otettiin mukaan tutkimukseen viisi kappaletta. Tutkittuihin 2D-ohjelmiin perehdyttiin testaamalla niiden geometrian piirtämiseen sisältäviä työkaluja ja osakuvien tekemiseen soveltuvuutta. Kaikkia niiden tarjoamia ominaisuuksia ei ryhdytty kartoittamaan ja testaamaan. Testatut ohjelmat on koottu Taulukkoon 1. Tutkimisen perusteella kaikki testatut 2D-ohjelmat voivat soveltuvat käytettäväksi yrityskäytössä.

Taulukko 1. Testatut 2D CAD-ohjelmat

2D CAD-Ohjelma	Testattu versio	Tuetut tiedostotyypit	Lisenssi	Arvio 0-5	Kommentteja
LibreCad	2.1.3	DXF, SVG	GPL-2	2	Avoimen lähdekoodin ilmainen 2D CAD. Helppokäyttöinen ja yksinkertainen ohjelma, sisältää vain piirtämiseen tarvittavat perusominaisuudet.
QCAD Community edition	3.19	DXF, SVG	GPL-3	2	QCADin avoimen lähdekoodin versio. Helppokäyttöinen ja yksinkertainen ohjelma, sisältää vain piirtämiseen tarvittavat perusominaisuudet.
QCAD professional	3.19	DXF, DWG, SVG	33 €	2	Kaupallinen versio QCADista, sisältää tuen DWG tiedostoille, tulostuksen esikatselun ja muutamia kehittyneempiä piirto-työkaluja.
NanoCad	5.0	DXF, DWG	Vaatii rekisteröitymisen	3	Monipuolinen 2D CAD. Tehokas käyttö vaatii perehtymistä ohjelman ominaisuuksiin ja toimintaperiaatteeseen.
DraftSight	2017 SP2	DXF, DWG, SVG	Vaatii rekisteröitymisen	2	Dassaultin kehittämä ilmainen 2D CAD. Osa ominaisuuksista rajattu toimimattomiksi ilmaisversiossa. Selkeä käyttöliittymä erillisellä piirustustilalla.

2D CAD-Ohjelma	Testattu versio	Tuetut tiedostotyypit	Lisenssi	Arvio 0-5	Kommentteja
Solid Edge 2D Drafting	ST9	DXF, DWG	Vaatii rekisteröitymisen	5	Siemensin erittäin monipuolinen 2D CAD, jonka piirtämistapa on parametrinen. Etenkin 3D CADeihin tottuneelle näppärä ohjelma 2D-suunnitteluun. Ylivoimaisesti laajimmat ominaisuudet testatuista 2D-ohjelmista. Tehokas käyttö vaatii opettelua.

Testatut avoimen lähdekoodin ohjelmat LibreCad ja QCAD ovat hyvin saman tyyppisiä, kummassakin on helposti omaksuttava ja selkeä käyttöliittymä ("LibreCAD," 2016; "QCAD," 2017). Molemmat ohjelmat sisältävät lähinnä tarpeellisimpia perusominaisuuksia, jolloin niiden käyttö on helppoa opetella. Kummastakaan ohjelmasta ei kuitenkaan löydy valmiita piirustuselementtejä kuten hitsausmerkkejä tai geometrisiä toleransseja. Tarvittavat elementit on käyttäjän itse piirrettävä ja tallennettava ohjelman kirjastoon, jonka jälkeen niiden lisääminen on helpompaa. Joissain tapauksissa valmiita elementtejä voi löytyä myös netistä muiden käyttäjien tekemänä.

QCADista on myös kaupallinen versio, joka sisältää lisäominaisuuksia kuten tuen DWG-tiedostoille, parannetun DXF-tuen, tulostuksen esikatselun sekä joitakin muita kehittyneempiä ominaisuuksia. Ominaisuuksiltaan QCAD on parempi verrattuna LibreCadiin; se sisältää esimerkiksi tuen ECMAScripteille, joilla voi helposti toteuttaa parametrisia piirustuselementtejä tai lisätä ominaisuuksia ohjelmaan. LibreCad pärjää kuitenkin vertailussa QCADin avoimeen versioon, sillä esimerkiksi tulostuksen esikatselun on työkalu LibreCadissa muttei avoimessa QCADissa.

LibreCad ja QCAD tarjoavat peruskäyttäjälle helposti käyttöönotettavan 2D-piirustusohjelman perusominaisuuksilla. Koodaustaitoiselle käyttäjälle ne tarjoavat mahdollisuuden lisätä käytettävään ohjelmaan juuri omaan suunnittelukäyttöön tarpeellisia ominaisuuksia.

Kaupallisten toimijoiden ilmaisista 2D-ohjelmista tutkittiin NanoCAD, DraftSight ja Solid Edge. NanoCAD on kaupallisen ohjelman ilmaisversio, ja se on ominaisuuksiltaan samaa luokkaa kuin LibreCAD ja QCAD. Osapiirustuksen tekemiseen ei ole valmiita piirustuselementtejä. Myös mallikirjastoa, josta itse piirretyt elementit voisi helposti lisätä piirustukseen, puuttuu ohjelmasta ("NanoCad," 2013).

DraftSight on myös kaupallisen toimijan ilmaisversio rajoitetuilla ominaisuuksilla ("DraftSight," 2017). Tästä huolimatta ohjelma sisältää laajalti tehokkuutta lisääviä ominaisuuksia, kuten erillisen malli- ja piirustustilan sekä mahdollisuuden lisätä piirustusohjelman tekstit parametrisesti. Lisäksi ohjelmassa on työkalu geometrisien toleranssien lisäämiseen, hitsaussymboleille ei kuitenkaan ole ohjelmassa työkalua. Käytettävyydeltään ohjelma vaatii hiukan opettelua monimutkaisempien ominaisuuksiensa vuoksi.

Solid Edge 2D drafting on testatuista ohjelmista ominaisuuksiltaan ylivoimaisesti laajin ("Solid Edge 2D Drafting," 2016). Ohjelma sisältää erilliset työtilat mallille, piirustukselle ja piirustusohjelmalle. Se sisältää työkalut geometrinen toleranssien, hitsaus-symbolien sekä monien muiden mitoituselementtien lisäämiseen. Solid Edge eroaa muista testatuista 2D-ohjelmista parametrisella piirtotavallaan. Koordinaatistopohjaisen paikkojen syöttämisen sijaan haluttu osa piirretään ensin karkeasti oikean muotoiseksi ja sen jälkeen lisätyillä mitoilla ja rajoitteilla luodaan haluttu mitoitettu muoto. Mallinnustapa on saman tyyppinen 3D-ohjelmien sketsien piirtämisen kanssa. Ohjelman opettelu vaatii hiukan paneutumista, mutta vastineeksi tarjolla on tehokas ja monipuolinen kokonaisuus.

2.3 3D-ohjelmat

3D-suunnitteluohjelmissa ero käytettävyydessä ja ominaisuuksissa kaupallisten ja avoimien ohjelmien välillä on iso. Varsinkin parametrinen 3D-suunnittelu monimutkaisilla malleilla vaatii käytettävältä ohjelmalta kehittyneitä työkaluja, joiden koodaaminen on työlästä. Toistaiseksi avoimia 3D-ohjelmia kehittäneet yhteisöt ovat olleet sen verran pieniä, että ohjelmia ei ole saatu kehitettyä kaupallisia vastaavalle tasolle.

Tutkituista 3D-ohjelmista löytyi monen tasoisia ohjelmia. Osa ohjelmista oli ominaisuuksiltaan niin vanhanaikaisia, rajoittuneita tai vaikeasti käytettäviä, että niiden käyttöä ei voi suositella lainkaan. Ohjelmista löytyi kuitenkin myös muutamia hyviä, joita voisi mahdollisesti hyödyntää myös yrityskäytössä. Kaikki tutkitut 3D CAD-ohjelmat on koottu Taulukkoon 2.

3D-suunnitteluohjelmia voidaan luokitella niiden mallinnustavan ja ominaisuuksien perusteella. Mallinnustapa määrittelee oleellisesti, millaiseen suunnitteluun ohjelma soveltuu. Osa ohjelmista kykenee käyttämään useampaakin mallinnustapaa, jolloin käyttäjä voi valita mitä menetelmää käyttää. Tutkitut 3D-suunnitteluohjelmat on lajiteltu pääasiallisen mallinnustapansa mukaan, jolloin omaan käyttöön mahdollisesti soveltuvan ohjelman löytäminen olisi helpompaa.

Taulukko 2. Testatut 3D CAD-ohjelmat

3D CAD-Ohjelma	Mallinnustapa, testattu versio	Lisenssi	2D Piirustuspuoli	Arvio 0-5	Kommentteja
FreeCad	Parametrinen, 0.17.12560	LGPL2+	Kyllä	2.5	Aktiivisessa kehityksessä oleva avoimen lähdekoodin mallinnusohjelma. Ominaisuuksiltaan ohjelma on suunnattu mekaniikkasuunnitteluun, avoimista ohjelmista lähimpänä kaupallisia CAD-ohjelmia.
Fusion 360	Parametrinen, 2.0.3706	Ilmainen startupeille (liikevoitto alle 100k\$/vuosi)	Kyllä	4	Autodeskin pilvipohjainen CAD-järjestelmä. Selkeä ja helppokäyttöinen. Täysveristen CAD-ohjelmien yksinkertaisempi versio, jonka ominaisuudet riittävät peruskäyttäjälle hyvin.
gCad3D	Parametrinen, 2.34	GPL-3	Ei	0	Korkea käyttökynnys ja vaikeaselkoinen graafinen käyttöliittymä. Mahdollisuus muokata/rakentaa mallia myös tekstipohjaisesti.
SolveSpace	Parametrinen, 2.3	GPL-3	Ei	0	Ominaisuuksia rajoitetusti monimutkaisempaan mekaniikkasuunnitteluun. Mahdollisuus suunnitella ja testata mekanismeja sekä piirtää mekanismien ratakäyriä.
Blender	Suora, 2.78	GPL-3	Ei	3	Visuaaliseen mallintamiseen suunniteltu ohjelma. Soveltuu huonosti mitoitettavaan mekaniikkasuunnitteluun. Hyvät ominaisuudet renderöityjen kuvien ja animaatioiden tuottamiseen
Creo Elements/Direct modeling express	Suora, 6.0	Ilmainen, vaatii rekisteröitymisen	Kyllä	3	Monipuolinen ohjelma suoraan mallinnukseen. Reilusti ominaisuuksia, ilmaisversiossa maksimissaan 60 osaa yhdessä kokoonpanossa.
Designspark Mechanical	Suora, 2.0	Ilmainen, vaatii rekisteröitymisen	Ei, saatavilla lisäosana	3	Helppokäyttöinen suora mallinnusohjelma nopeaan mallintamiseen. Maksusta saatavissa STEP ja IGES -tuki sekä piirustusmoduuli.

3D CAD-Ohjelma	Mallinnustapa, testattu versio	Lisenssi	2D Piirustuspuoli	Arvio 0-5	Kommentteja
BRL-Cad	Tekstipohjainen, 7.26.0	OSI	Ei	0	Erittäin suuri käyttökynns. Perustuu tekstipohjaiseen geometrian luomiseen primitiivigeometrioita yhdistelemällä. Saatavilla myös graafinen käyttöliittymä Archer. Kokonaisuutena vanhanaikainen ja työläästi käytettävä mallinnusohjelma.
OpenSCAD	Tekstipohjainen, 2015.03	GPL-2	Ei	1	Mallinnus tehdään tekstipohjaisena scriptinä. Perustuu geometrian luomiseen primitiivigeometrioita yhdistelemällä, lisäksi mahdollista puristaa primitiivi- tai DXF-pohjaisia 2D-geometrioita.

2.3.1 Parametrinen mallinnustavan 3D-ohjelmat

Parametrinen mallinnus on mekaniikkasuunnittelussa vallitseva mallinnustapa. Siinä geometria muodostetaan luomalla malliin parametrisia piirteitä, jotka tallentuvat mallin historiapuuhun. Piirteitä ovat esimerkiksi sketsit, pursotukset, pyöristykset, reiät ja viisteet. Parametrisuus tarkoittaa, että kaikki luotujen historiapiirteiden mitat ovat parametreja ja niiden arvoa voi muokata jälkikäteen. Parametrinen mallinnustavan vahvuus on se, että suunniteltavaa osaa voi helposti muokata ja sen mittoja muuttaa myös valmiista mallista. Tämä on erityisen tärkeää 3D-suunnittelussa, jossa malli voi elää suunnitteluprosessin aikana merkittävästi. Haasteena parametriseissa mallinnuksissa on sen vaatima suunnitelmallisuus mallin luomisessa. Toimivan ja muokattavan parametrinen 3D-mallin luominen edellyttää, että piirteet on luotu sopivassa järjestyksessä ja mitoitettu oikeisiin referenssipiirteisiin.

Parametrisia 3D-ohjelmia testattiin mallintamalla niillä valettava kotelomainen esimerkkirakenne. Tavoitteena oli luoda osasta parametrinen malli, jossa kotelon kokoa voi helposti muuttaa ilman mallin hajoamista. Kuvassa 1 on esitetty testiosa FreeCadilla ja Fusion 360:llä mallinnettuna.

Avoimen lähdekoodin ohjelmista lähimpänä kaupallisia 3D-mallinnusohjelmia on FreeCad ("FreeCad," 2017). Sen ensimmäinen versio on julkaisu 2002 ja ohjelma on edelleen aktiivisessa kehityksessä. Ohjelman viimeisin vakaa julkaistu versio on 0.16 mutta ohjelmasta on saatavilla myös esijulkaisu parhaillaan kehityksen alla olevasta versiosta 0.17. Tässä tutkimuksessa on keskitytty ohjelman versioon 0.17, joka on merkittävästi edeltäjänsä edistyneempi erityisesti mekaniikkasuunnittelun kannalta.

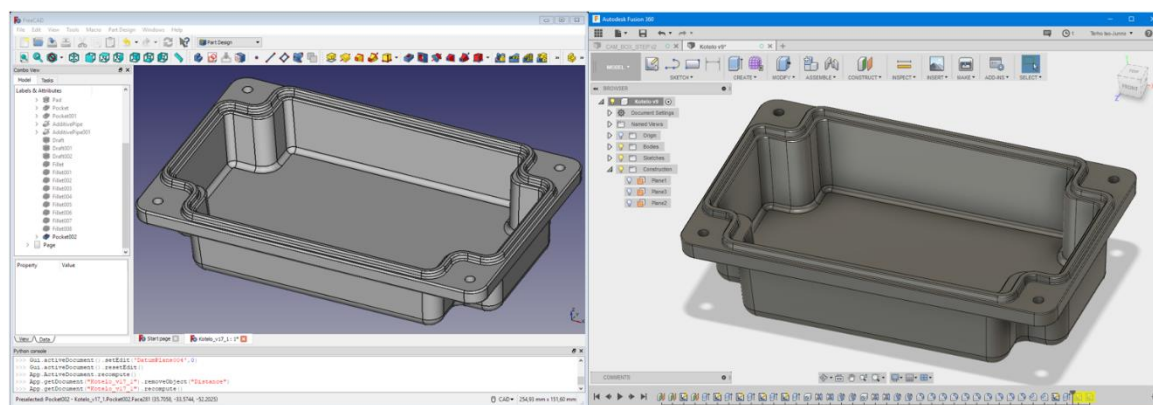
FreeCadin käyttöliittymä koostuu työtiloista, joihin on koottu erilaisia suunnittelu-tehtäviä varten tarvittavat työkalut. FreeCad sisältää työtilat muun muassa arkkitehtuuriin, 2D-piirtämiseen, osien suunnitteluun, veneen suunnitteluun ja piirustusten tekemiseen. Lisäksi ohjelmaan on saatavilla käyttäjien koodaamina lisäosina muita työtiloja esimerkiksi ohutlevyosien ja kokoonpanon suunnitteluun. Ohjelmasta puuttuu kuitenkin vielä selkeä ja yksiselitteinen mallinnustapa osille. Eri työtilat sisältävät osittain päällekkäisiä ominaisuuksia, mutta toisaalta joidenkin työkalujen vuoksi työtilaa joutuu vaihtelevaan kahden tai useamman välillä. Eri työtiloilla tehtyjen piirteiden välillä voi myös esiintyä yhteensopivuusongelmia.

FreeCadista löytyy kaikki tarvittavat perustyökalut 3D-mekaniikkasuunnitteluun. Uusimman 0.17 version mallinnustapa on pääasiassa vastaava kuin kaupallisissakin parametriseissa CAD-ohjelmissa, mikä tekee ohjelman käytön opettelusta kohtuullisen helppoa. Ohjelmalla voi tehdä myös monimutkaisia malleja, mutta parhaimmillaan se on suoraviivaisten osien suunnittelussa. Ohjelmassa on myös palautus-ominaisuus, joka useimmiten ohjelman kaatuessa kykenee palauttamaan kesken jääneen tilanteen.

Perusosia ja niiden parametrisia malleja FreeCad tukee moitteetta, mutta tehokkaan parametrisen mekaniikkasuunnittelun kannalta ohjelma on vielä keskeneräinen. Suurin puute ohjelmassa on mallin kyvyttömyys sietää piirteiden aikajärjestyksen muokkauksista historiapuussa. Tämä johtaa todella helposti mallin hajoamiseen. Lisäksi esimerkiksi pyöristys- ja viistetyökalut eivät useinkaan toimi, mikäli luotavan piirteen alueella on häiritsevää geometriaa.

Kuvan 1 testiosan mallintamisesta FreeCad selvisi moitteetta, mutta kotelon mittoja muutettaessa liikaa kerralla malli saattoi hajota. Syyksi mallin hajoamiseen paljastui se, että sketsien parametriset mitat eivät ota kantaa siihen, kummalla puolella mitoituksen referenssipistettä ne ovat. Esimerkiksi mallinnettu kotelon koko määritettiin referenssitason avulla. Kokoa muutettaessa ja tason liikkuesssa sopivasti osa mitoitetuista piirteistä saattoi siirtyä tason väärälle puolelle. Parametrasta mallia tehdessä tämä ominaisuus tulee huomioida mallia luodessa.

Tällä hetkellä FreeCad soveltuu hyvin 3D-mallintamiseen, jossa jo suunnitellusta osasta tehdään 3D-malli. 3D-suunnittelukin onnistuu, mutta puutteet mallin toimivuudessa mallia muokattaessa hankaloittavat suunnittelukäyttöä. Ohjelmalla on kuitenkin jo laaja aktiivinen käyttäjäkunta ja sitä kehitetään jatkuvasti, joten tulevaisuudessa ohjelma on todennäköisesti entistä lähempänä kaupallisia ohjelmia. Jo tutkimusaikana n. 6kk aikavälillä ohjelmaan tuli useita uusia ominaisuuksia ja parannuksia.



Kuva 1. Testiosa mallinnettuna FreeCadilla (vasen) ja Fusion 360:llä.

Muita testattuja avoimen lähdekoodin parametrisia 3D CAD-ohjelmia ovat SolveSpace ja gCAD3D ("SolveSpace," 2016; "gCAD3D," 2017). Kumpikaan ohjelmista ei ole kannattava vaihtoehto yrityskäyttöön. SolveSpace on sinänsä varustettu kohtuullisen selkeällä käyttöliittymällä, mutta itse mallinnuksen toimintalogiikka on hankalampi sisäistää. Lisäksi mallinnukseen on ohjelmassa vain alkeellisimmat perustyökalut, esimerkiksi pyöristys- tai viistetyökalua ei ole ollenkaan. Ohjelman ainut kehittyneempi piirre on mahdollisuus testata nivelmekanismeja ja piirtää niiden ratakäyriä. Kuvan 1 mukaista testikappaletta sillä ei edes yritetty mallintaa, sillä ohjelman työkalut ovat siihen riittämättömät.

GCAD3D on käyttöliittymältään erittäin vaikeaselkoinen ja sen mallinnuslogiikka ei tule ohjelmasta itsestään ilmi. Ohjelmaan ei ole tarjolla juuri lainkaan ohjeita netissä, ja sen oma manuaali on suppea. Ohjelman käyttöönottokynnys on siis todella korkea. Ohjelmassa on myös mahdollisuus mallintaa tekstipohjaisesti. Käytännössä ohjelman tarjoamia ominaisuuksia ei testattu tarkemmin eikä sillä mallinnettu testikappaletta siitä syystä, että ohjelman käyttö ja käytön opettelu järkevällä ajankäytöllä osoittautui liian vaikeaksi.

Tutkimukseen otettiin mukaan myös kaupallinen Autodeskin pilvipohjainen Fusion 360 3D-ohjelma ("Fusion 360," 2017). Ohjelman lisenssi on ilmainen harrastajille ja startupeille, joiden liikevoitto on alle 100 000 dollaria vuodessa. Ohjelman lisenssi-hinta on perusversiolle reilu 300e vuodessa (05/2017), joten maksullinen versioikin on vielä kohtuullinen kustannuksiltaan.

Ominaisuuksiltaan Fusion360 on testatuista parametrisista CAD-ohjelmista monipuolisin. Ohjelman käyttöliittymä on kohtuullisen hyvä ja selkeä. Parametrisuus toimii ohjelmassa hyvin ja mallin historiaa voi muokata ilman pelkoa mallin kaatumisesta. Ohjelmalla saatiinkin mallinnettua testauksessa käytetty kotelogeometria (Kuva 1) nopeasti ja vaivattomasti. Mallin parametrisuus toimi ongelmitta ja kotelon mittoja pystyi muuttamaan ilman mallin hajoamista.

Puutteena ohjelmassa on toistaiseksi se, että ohutlevypuolta ei ole saatavilla. Se on kuitenkin Autodeskin nettisivujen mukaan tulossa ohjelmaan jossain vaiheessa. Lisäksi ohjelman perustuminen pilveen voi olla mahdollinen ongelma tietoturvan ja toimintavarmuuden kannalta.

Fusion360 soveltuu hyvin yrityskäyttöön. Ohjelma voi käyttää tehokkaasti 3D-suunnittelussa myös monimutkaisemmilla osilla. Ohjelman ominaisuudet riittävät hyvin erityisesti pienempien yritysten tarpeeseen. Pilvipohjaisuus voi olla jossain tapauksessa haitta, mutta se tarjoaa myös mahdollisuuden käyttää ohjelmaa sujuvasti eri tietokoneilla.

2.3.2 Visuaalisen mallinnustavan 3D-ohjelmat

Visuaaliseen suunnitteluun kehitetyissä ohjelmissa ei yleensä ole yksiköitä, ja mallinnus perustuu silmämääräiseen mallin muokkaamiseen. Malli voidaan suunnitella suoraan pisteiden ja viivojen muodostamana verkkona tai "veistämällä" (sculpting) geometria haluttuun muotoon. Tällaisia ohjelmia käytetään pääasiassa animaatio- ja pelihahmojen yms. mallintamiseen. Käyttöä mekaniikkasuunnitteluun rajoittaa merkittävästi mittayksiköiden puute ja selkeä tapa mitoittaa suunniteltavat geometriat tarkasti.

Tutkimukseen mukaan otettu Blender on visuaalisen mallinnustavan ohjelma, joka perustuu avoimeen lähdekoodiin ("Blender," 2017). Ohjelma on erittäin monipuolinen sisältäen työkaluja verkkopohjaiseen 3D-mallintamiseen, animointiin, pintojen teksturointiin sekä dynaamisiin simulointeihin. Ohjelma ei sovellu juurikaan tuotteen mekaanikan mallintamiseen, mutta sitä voi kuitenkin käyttää hyvin esimerkiksi tuotteen visuaalisen ulkoasun suunnitteluun. Blenderin käyttökynnyks on iso ohjelman monimutkaisuuden vuoksi, mutta osaavissa käsissä sillä voi tehdä näyttäviä kuvia tai animaatioita suunnitellusta tuotteesta.

Blenderillä ei sen erilaisen luonteensa vuoksi yritetty mallintaa testigeometriaa käytettyä koteloa. Lyhyen yleisluontoisen testauksen perusteella ohjelma on kuitenkin erittäin varteenotettava vaihtoehto yrityksen työkaluksi visuaaliseen suunnitteluun. Sen verkkopohjaisella mallinnuksella voi tehokkaasti suunnitella tuotteiden muotoja pintamallina. Ohjelman grafiikkatyökalut ja renderöintiominaisuudet mahdollistavat myös tyylikkaiden konsepti- ja tuotekuvien tuottamisen.

Blender on myös hyvä esimerkki siitä, mitä avoimen lähdekoodin ohjelma voi parhaimmillaan olla. Kun avoimen lähdekoodin ohjelma saa riittävästi käyttäjiä, sen ympärille voi muodostua aktiivinen kehitysyhteisö. Suuren käyttäjäkunnan mukana tulee mukaan henkilöitä, joilla on aikaa ja kykyä kehittää ohjelmaa eteenpäin suuren yhteisön toimiessa palautteen ja kehitysideoiden antajan.

2.3.3 Suoran mallinnustavan 3D-ohjelmat

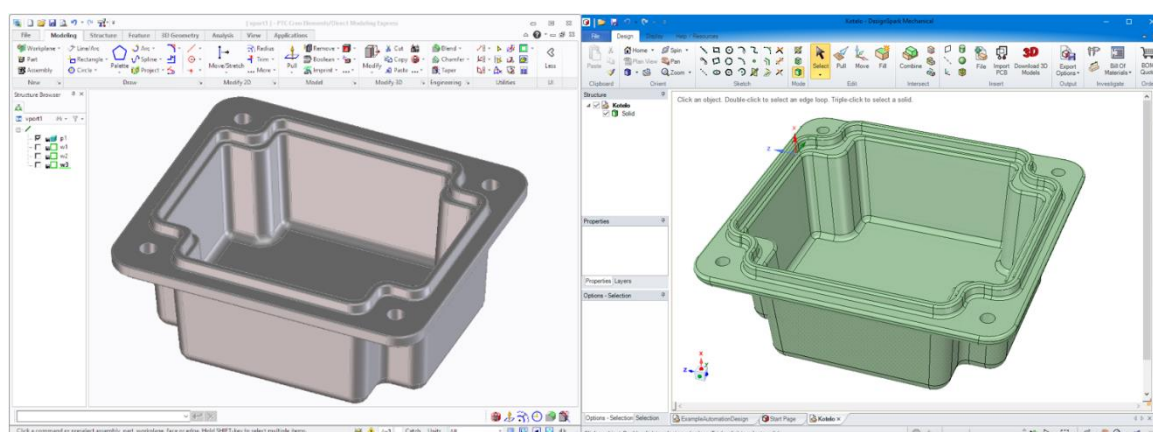
Suorassa mallinnustavassa ei osasta kerry historiapuuta, vaan osa koostuu pelkästään siitä geometriasta, joka näkyy mallinnusikkunassa. Mallinnuksessa piirretään sketsejä, joiden avulla pursotetaan ja leikataan geometriaa. Lisäksi suorassa mallinnustavassa voidaan muokata geometriaa suoraan itse mallissa valitsemalla mallista pintoja tai reunoja, joita sitten muokataan vetämällä haluttuun suuntaan. Näin voidaan esimerkiksi muokata reiän halkaisijaa, tehdä viisteitä nurkkiin tai jatkaa kappaleen pituutta.

Suora mallinnustapa on helppo ja nopea, mutta rajoittuneempi suunnittelukäytössä verrattuna parametriseen mallintamiseen. Sen puutteena on erityisesti monimutkaisten mallien muokattavuus mallin valmistuttua. Pieniä piirteitä voi muokata helposti, mutta esimerkiksi mallin päämittojen muuttaminen voi vaatia mallinnusprosessin aloittamista alusta, jolloin arvokasta suunnittelu-aikaa menee hukkaan. Suora mallinnustapa toimii parhaiten nopeassa prototyyppimallinnamisessa tai silloin, kun olemassa olevaa historiatonta 3D-geometriaa on tarpeen muokata (esimerkiksi step-tiedosto). Täysivieriseen 3D-suunnitteluun se ei ole kuitenkaan tehokkain valinta.

Tutkituista ohjelmista Designspark Mechanical ja Creo Elements/Direct Modeling Express edustavat suoran mallinnustavan ohjelmia. Designspark Mechanical on käytettävyydeltään yksinkertainen ja helposti omaksuttavissa ("DesignSpark Mechanical," 2015). Osien mallintaminen ohjelmalla on helppoa ja nopeaa, suora mallinnustapa on kehitetty ohjelmassa pitkälle. Mechanicalin puutteena on kuitenkin piirustuspuolen puuttuminen sekä STEP ja IGES -tiedostojen tuen puuttuminen. Nämä on kuitenkin mahdollista ostaa ohjelmaan lisäpaketteina.

Creo Elements/Direct Modeling Express on ominaisuuksiltaan erittäin monipuolinen ("Creo Elements/Direct Modeling Express," 2014). Käytettävyydeltään ja käyttöliittymältään se ei kuitenkaan pärjää vertailussa Designspark Mechanicalille. Tutkittu Creon versio on rajoitettu estämällä geometrian tallentaminen STEP ja IGES -muodossa, lisäksi osien määrä yhdessä kokoonpanossa on rajoitettu kuuteenkymmeneen.

Suoran mallinnustavan ohjelmia testattiin luomalla niillä 3D-geometria testiosana olevasta kotelosta. Kumpikin testatuista ohjelmista suoriutui mallinnuksesta ongelmitta, ja kaikki piirteet saatiin luotua halutulla tavalla. Ohjelmilla mallinnetut osat ovat näkyvissä Kuvassa 2.



Kuva 2. Testiosia mallinnettuna Designspark Mechanicalilla (vasen) ja Creolla.

2.3.1 Tekstipohjaiset 3D-ohjelmat

3D-geometriaa voi myös luoda tekstipohjaisesti kirjoittamalla koodia. Tekstipohjaisessa mallinnuksessa malli luodaan yleensä primitiivigeometrioiden (esim. kuutio, pallo, tetra) yhdisteinä. Luonteeltaan se on parametrissa mallinnusta, sillä luotu malli historioineen säilyy ja sitä voidaan helposti muokata jälkikäteen. Jo luotua geometriaa on myös helppo kopioida ja käyttää uudelleen samassa mallissa. Huonoja puolia menetelmässä on sen rajoittuneisuus monimutkaisempien geometrioiden luomisessa sekä korkeampi käyttöönottokynnys, mikäli käyttäjällä ei ole aiempaa koodausosaamista. Tekstipohjaisia ohjelmia testattiin tutkimuksessa ainoastaan yleisellä tasolla luomalla niillä muutamia primitiivigeometrioita ja niiden yhdisteitä. Testigeometriaan ollutta koteloja niillä ei yritetty mallintaa, koska kyseinen geometria valupäästöineen ja pyörityksineen olisi turhan työläs mallintaa tekstipohjaisesti.

Testatuista ohjelmista tekstipohjaisia ovat OpenSCAD ja BRL-Cad. OpenSCAD on kevyellä ja yksinkertaisella käyttöliittymällä varustettu mallinnusohjelma ("OpenSCAD," 2015). Se koostuu teksti-ikkunasta, ohjelman konsolista ja 3D-mallin piirtoikkunasta. Mallinnusprosessia voi helposti seurata koodin kirjoituksen lomassa päivittämällä piirtoikkunaa. Ohjelman käyttöön löytyy hyvin ohjemateriaalia netistä.

BRL-CAD on myös tekstipohjainen ohjelma, mutta se on vanhanaikainen ja työläs käyttää ("BRL-CAD," 2016). Mallinnuksessa MGED editorilla syötetään yksitellen käskyjä, joiden perusteella malli rakentuu ja näytetään rautalankamallina piirtoikkunassa. Mallin voi myös tehdä erikseen tekstitiedostoon, ja ajaa sen sitten kerralla BRL-CADilla geometrian luomiseksi. Kolmantena vaihtoehtona on käyttää erillistä graafista käyttöliittymää Archeria, joka ei tuo kuitenkaan ohjelman käytettävyyteen parannusta. Kokonaisuutena BRL-CAD on vanhanaikainen ohjelma, eikä sovellu nykyaikaiseen suunnittelukäyttöön.

2.4 Levitysohjelmat

Levitysohjelmia tarvitaan, kun suunnitellusta 3D-geometriasta pitää saada 2D-levitys valmistusmateriaalin leikkausta varten. Useimmista kaupallisista CAD-ohjelmista levitystyökalut löytyvät, mutta tutkituissa kustannustehokkaissa ohjelmissa niitä ei juurikaan ole. Tämän vuoksi kartoitetaan ja tutkitaan erikseen levityskuvion tuottamiseen kykeneviä ohjelmia.

Tutkitut levitystyökalut voidaan jakaa kolmeen kategoriaan. Ohutlevyosien levitystyökalut kykenevät levittämään osia, jotka koostuvat tasomaisista levyistä ja niitä yhdistävistä nurkkataitoksista. Putkenlevitysohjelmat levittävät puolestaan putkien ja kartioiden sekä muiden yhteen suuntaan kaarevien muotojen geometrioita tasomaisiksi. Geometrian verkotukseen perustuvia levitysohjelmia tarvitaan kaksoiskaarevien pintojen levityksessä. Tutkitut levitysohjelmat on koottu Taulukkoon 3.

Taulukko 3. Tutkitut geometrian levitysohjelmat

Levitysohjelma	Testattu versio	Lisenssi	Arvio 0-5	Kommentteja
ConeLayout	2.0.5	35 €	3	Helppokäyttöinen ohjelma kartioiden levitykseen, mallintaa levitetävän kartion annettujen parametrien mukaisesti. Ainut puute mallinnuksessa, että kumpikin kartion pää voi kääntyä vain samansuuntaisen akselin suhteen. Tukee levityksen vientiä DXF-muodossa.

Levitysohjelma	Testattu versio	Lisenssi	Arvio 0-5	Kommentteja
Digital Pipe Fitter	1.92	320 €	3	Valmiiseen mallikirjastoon perustuva helppokäyttöinen putkenlevitysohjelma. Huomioi putken seinämävahvuuden ja tekee tarvittaessa oman levityksen putken sisä- ja ulkopinnoille. Tukee levityksen vientiä DXF-muodossa
Plate 'n' Sheet	4.10.02	660 €	3	Putkiliitosten mallikirjastoon perustuva levitysohjelma. Levityksen voi tehdä putken sisä-, keski-, tai ulkopinnan mukaan. Tukee DXF-viennin lisäksi vientiä AutoCadiin tai IntelliCadiin. Käytettävyydeltään erittäin selkeä.
Sheet Lightning Pro	6.21	80 €	3	Monipuolinen levitysohjelma, jossa voi mallikirjaston valmiiden mallien lisäksi luoda omia liitosmalleja. Kaikki liitokset ovat pintamalleja, joten ei huomioi putken paksuutta. Vanhanaikainen käyttöliittymä ja vaatimaton käytettävyyys.
Mesh Unfolder	3.01	80 €	1	Verkotukseen perustuva levitysohjelma kaksoiskaareville muodoille. Levityskyvykyydeltään vaatimaton, levitetty pinnat jäävät helposti ruttuun. Huono käytettävyyys. Aikaa käyttämällä voi saada myös koh- tuullisia levityksiä aikaiseksi
Blender	2.78	GPL-3	3	Blender on verkkoon perustuva 3D-mallinnusohjelma, joka sisältää myös verkon levitystyökalun. Työkalu on kyvykyydeltään hyvä ja nopea, mutta sen käyttö vaatii opettelua. Tukee viennissä vain SVG-muotoa, joka pitää levityksen jälkeen skaalata oikeaan kokoon manuaalisesti.
FreeCad Sheet Metal	0.1.10	GPL-3	2	Yksinkertainen muutamalla perustyökalulla varustettu ohutlevymoduuli. Kykenee tuottamaan taitoksia halutulla kulmalla ja kevennyksellä sekä levittämään luodun rakenteen tasoon.

2.4.1 Ohutlevyosien levitysohjelmat

Tutkituista ohjelmista ainoastaan FreeCadiin saatava Sheet Metal -moduuli sisältää ohutlevyosien suunnittelu- ja levitystyökalut ("FreeCad Sheet Metal," 2015). Moduulin flange-työkalulla levyn reunaan voi lisätä taitoksen halutulla kulmalla, säteellä ja pituudella. Lisäksi taitokseen on mahdollista lisätä suorakulmainen helpotusleikkaus. Moduulilla ei voi kuitenkaan lisätä taitoksia levyn suoralle osuudelle eikä sillä voi lisätä paininmuovauksia osaan.

FreeCadin ohutlevymoduulin levitystyökalulla voi levittää sekä ohjelmassa luotuja että ohjelmaan tuotuja osia, kunhan geometria on oikea. Rajoituksena geometrialle on se, että taitoksen alueella levyn reunan täytyy olla kohtisuorassa levyn tasoon nähden. Lisäksi moduulin levitystyökalulla kaareva reunageometria taitoksen alueella ei säily levityksessä.

2.4.2 Putkenlevitysohjelmat

Putkenlevitysohjelmien avulla saadaan suunnitellun putkiliitoksen levyosien levityskuvat liitoksen valmistusta varten. Avoimen lähdekoodin ohjelmia putkenlevitykseen ei löytynyt, mutta mukaan otettiin neljä lisenssiltään kohtuuhintaista ohjelmaa. Tutkitut levitysohjelmat on koottu Taulukkoon 3. Kaikki tutkitut ohjelmat sisältävät joko työkalut tai valmiit parametriset mallit putkiliitosten suunnitteluun, joten niiden käyttö ei vaadi erillistä CAD-ohjelmaa geometrian luomista varten.

Ohjelmista yksinkertaisin on Cone Layout ("Cone Layot," 2007). Nimensä mukaisesti se levittää vain kartioita, joiden päädyt ovat leikattu halutussa kulmassa olevalla tasolla. Ohjelma on käyttöliittymältään yksinkertainen ja selkeä. Haluttu kartio mallinetaan muuttamalla valintaikkunoiden arvoja ja piirtoikkunassa näkyy levitettävästä

kartiosta pyöriteltävä 3D-malli. Ohjelma määrittää kartion levityksen automaattisesti siten, että tarvittavan suorakulmaisen levyn palan koko on mahdollisimman pieni. Kartion levityskuva näkyy toisessa ikkunassa ja se voidaan suoraan tulostaa paperille tai tallentaa DXF-muodossa.

Cone Layout tukee myös taivuttamalla muotoiltavaa kartiota piirtäen kuvat halutulla taitosmäärällä. Ohjelman ainoa puute kartion mallinnuksessa on se, että se ei tue päätyleikkauksen kääntämistä kuin yhden kiinteän akselin suhteen. Näin ollen kartion kumpikin pää on sidottu kallistumaan samaan suuntaan. Lisäksi ohjelma ei huomioi levyn paksuuden vaikutusta. Edullisena ohjelmana se kuitenkin on erittäin toimiva ominaisuuksiensa puitteissa.

Sheet lightning pro on ominaisuuksiltaan monipuolinen putkenlevitysohjelma ("Sheet Lightning Pro," 2011). Sen mallikirjasto sisältää kattavasti valmiita parametrisia liitoksia, joiden avulla valmistettava putkiliitos on helppo ja nopea mallintaa. Ohjelmassa on myös työkalut, joilla voi mallintaa halutun liitoksen, mikäli sitä ei mallikirjastosta löydy. Tämä mahdollistaa esimerkiksi kokonaisen moniliitoksisen putkirkenteen mallintamisen yhden liitoksen sijaan. Kaikki ohjelman käsittelemät putkirkenteet ovat pintamalleja, joten materiaalin paksuutta ei huomioida.

Sheet lightning pro on käyttöliittymältään ja ulkoasultaan vanhanaikainen. Ohjelman käytettävyyttä ja intuitiivisuutta on jäänyt kehityksessä jälkeen verrattuna muihin vastaaviin ohjelmiin. Varsinkin rakenteen mallintamisen käytettävyyttä on heikko. Ohjelman mukana on englanninkielinen manuaali, joka ei kuitenkaan tarjoa selkeää prosessikuvausta ohjelman käytöstä. Kiteytettynä ohjelma tarjoaa monipuolisesti ominaisuuksia vaatimattomalla käytettävyydellä.

Digital Pipe Fitter on valmiiseen liitosmallikirjastoon pohjautuva putkiliitosten levitysohjelma ("Digital Pipe Fitter," 2017). Halutun tyyppinen liitos valitaan kirjastosta ja sen dimensiot muutetaan vastaamaan suunniteltavaa liitosta. Ohjelma ottaa tarvittaessa huomioon myös putken seinämäpaksuuden ja piirtää sisä- ja ulkopinnan leikkausviivat erikseen. Ohjelman mallikirjasto on kohtuullisen monipuolinen tarjoten yleisimpiä putkiliitostyyppisiä. Useita erilaisia liitoksia voi myös yhdistää samaan liitokseen, mikä mahdollistaa hiukan monimutkaisempien liitosten suunnittelun. Suunnitellun levityksen voi tallentaa DXF-muodossa tai tulostaa suoraan paperille leikkaussapluunaksi.

Käyttöliittymältään Digital Pipe Fitter on yksinkertainen ja selkeä. Sen käyttö on helppoa oppia ja ohjelman intuitiivisuus on hyvällä tasolla. Suunniteltu liitos näkyy selkeänä 3D-mallina, jolloin suunnitellun liitoksen oikeellisuus on helppo tarkistaa. Kokonaisuutena Digital Pipe Fitter on erittäin kätevä, nopea ja helppo putkenlevitysohjelma. Mikäli sen putkiliitoskirjastosta löytyy riittävästi malleja yrityksen tarpeisiin, on se hyvä valinta levitysohjelmaksi.

Plate 'n' Sheet Professional on myös valmiiseen putkiliitoskirjastoon perustuva levitysohjelma ("Plate 'n' Sheet," 2013). Kirjastosta valittu liitostyyppi tai putki mitoitetaan vastaamaan haluttua tilannetta. Ohjelmassa voidaan lisätä myös putken seinämävahvuus, ja mitoitus voidaan tehdä sisä-, keski- tai ulkomittojen mukaan. Ohjelmaan voidaan lisätä myös liitoksen materiaalit ja materiaalikustannukset, jolloin ohjelma laskee suunnitellun liitoksen levyjen painon ja kustannukset. Suunniteltu putkiliitos voidaan joko tulostaa, tallentaa DXF-muotoon tai lähettää AutoCadiin tai IntelliCadiin.

Ohjelma tukee myös kolmiulotteisia DXF-verkkoja, joten suunniteltu osa voidaan tallentaa myös kolmiulotteisena. Samoin ohjelmaan voi tuoda muusta ohjelmasta 3D DXF-tiedoston, jonka voi ohjelmalla sitten levittää. Vaatimuksena on, että DXF-muotoinen verkko ei ole kaksoiskaareva eikä suljettu muoto.

Käytettävyydeltään Plate 'n' Sheet Professional on helppo ja nopea oppia. Liitoksen mitoitus on testatuista ohjelmista selkein ja yksinkertaisin. Suunniteltu osa näytetään ruudulla rautalankamallina. Kuvaan voi lisätä myös mittoja, joten ohjelma soveltuu periaatteessa myös osakuvien tekemiseen. Kokonaisuutena ohjelma tarjoaa laajan mallikirjaston liitosten ja osien suunnitteluun sekä on yksinkertainen käyttää.

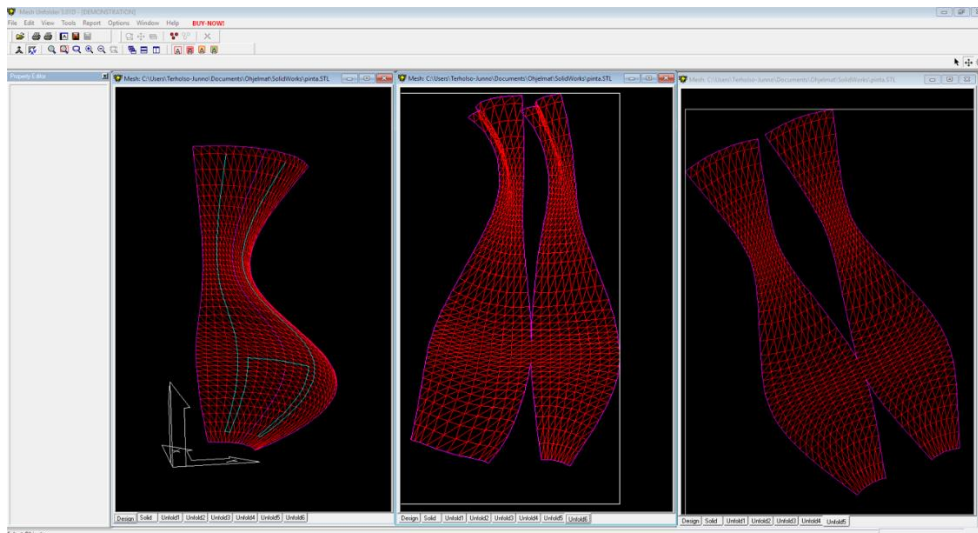
2.4.3 Geometrian verkotukseen perustuvat levitysohjelmat

Verkotukseen perustuvat levitysohjelmat kykenevät levittämään myös kaksoiskaarevia pintoja tasoon. Levitettävä pinta verkotetaan ja verkon avulla muodostetaan 3-ulotteisesta pinnasta tasomainen. Kaksoiskaarevilla pinnoilla tämä tarkoittaa, että levitysprosessissa pintaan tulee venymää ja puristusta. Levitysprosessissa venymien ja puristumien määrä pyritään minimoimaan, jolloin levitysmuoto on optimaalinen. Mikäli pinnan levittäminen aiheuttaa liikaa venymiä, voidaan niitä vähentää lisäämällä levitettävään pintaan saumoja. Verkotukseen perustuvia levitysohjelmia löydettiin tutkimukseen kaksi kappaletta.

Mesh Unfolder on kaupallinen levitysohjelma samalta valmistajalta kuin Sheet Lightning Pro ("Mesh Unfolder," 2012). Mesh Unfolder ei sisällä työkaluja geometrian luontiin eikä verkotukseen, joten levitettävä pinta pitää tuoda sille valmiina verkkona. Ohjelma tukee DXF, STL, 3DS ja OBJ -muotoisia verkkoja, mutta testattaessa ainoastaan STL -muotoinen verkko avautui ohjelmassa luotettavasti. Muun muotoiset verkot aiheuttivat yleensä virheilmoituksia, ainoastaan muutama testatuista DXF, 3DS ja OBJ -tiedostoista suostui avautumaan ohjelmassa.

Käyttöliittymältään Mesh Unfolder on vanhanaikainen eikä ole käytettävyydeltään sujuva ja luonnollinen. Varsinkin saumojen merkintätyökalussa on puutteita. Esimerkiksi merkittyä saumaa ei voi poistaa muuten kuin poistamalla kaikki kyseisen verkon saumat. Ohjelma piirtää 3D-verkon pelkästään kaksivärisenä verkkona, jossa reunat ja saumat ovat eri väriä kuin muu verkko. Koska etu- ja takapinta näkyvät päällekkäin, on verkon hahmottaminen ja halutun kohteen valitseminen verkosta välillä haastavaa.

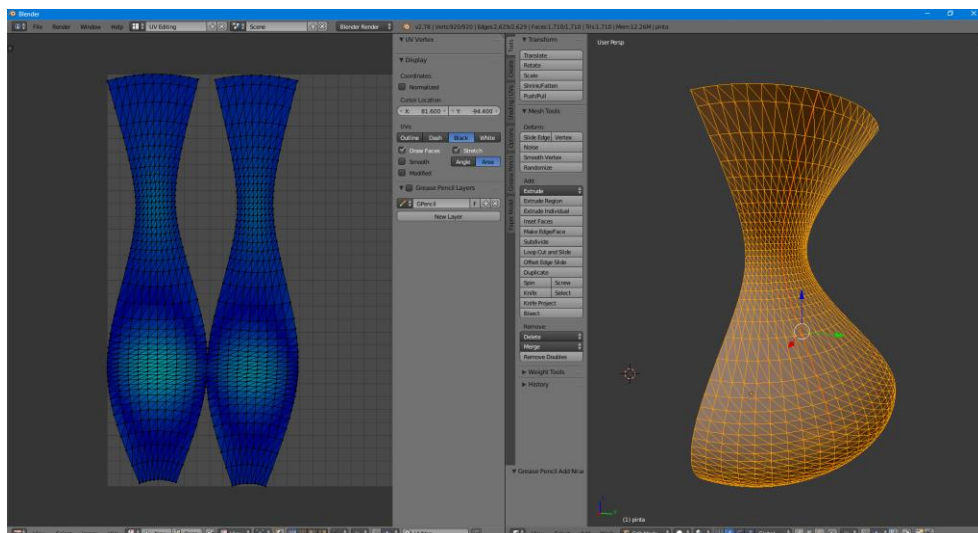
Levityskyvykkyydeltään Mesh Unfolder on huono. Voimakkaasti kaarevilla osilla levitetty verkko saattaa jäädä jopa ruttuun. Lisäksi levitettyihin osiin on taipumusta jäädä kumuloituvaa virhettä, jossa rakenne kaartuu koko matkaltaan tasaisesti samaan suuntaan. Ohjelman näkökulmasta yksittäisissä verkon elementeissä ei juurikaan ole venymää, mutta kokonaisuutena levitys onkin merkittävästi mutkalla. Sopivilla saumojen lisäyksillä ja levityksen aloituskohdan määrittämisellä ohjelmalla kuitenkin saa kohtuullisen hyviä levityksiä. Kuvassa 3 on esitetty yksi Mesh Unfolderilla tehty kaksoiskaarevan pinnan levitys, jossa on näkyvissä epäonnistunut ja kohtuullinen lopputulos. Oleellinen tekijä onnistuneeseen levitykseen ohjelmassa on määrittää kuvan mallissa vaaleansinisellä näkyvä verkotuksen aloituskohta sopivasti. Hyvään tulokseen pääseminen voi kuitenkin edellyttää useampaa yritystä ja vaatii käyttäjältä aikaa ja väivaa. Ohjelma siis ei ole kovin suositeltava valinta levitystyökaluksi, mutta edullisuutensa vuoksi se voi olla toimiva ohjelma satunnaiseen tarpeeseen.



Kuva 3. Kaksoiskaarevan pinnan levitystä Mesh Unfolderilla.

Toinen tutkittu levitysohjelma on avoimeen lähdekoodiin perustuva Blender ("Blender," 2017). Se ei varsinaisesti ole levitysohjelma, vaan verkkopohjainen mallinnusohjelma. Se kuitenkin sisältää levitystyökalun, joka on kehitetty grafiikan lisäämiseen 3D-malliin verkon levittämisen avulla. Työkalua voi kuitenkin soveltaa myös pelkkään pintojen levittämiseen. Levitettävä geometria voidaan tuoda Blenderiin esimerkiksi STL tai OBJ -muodossa olevana verkkona.

Käytettävyydeltään Blender on hyvä, kunhan sitä oppii ensin käyttämään. Ohjelman opettelukynnys on korkeahko, sillä sen käyttö perustuu pitkälti pikanäppäimiin. Lisäksi ohjelman laajuus ja ominaisuuksien määrä voi hämmentää. Ohjelmaan löytyy kuitenkin runsaasti ohjemateriaalia internetistä. Itse levitystyökalu on kätevä ja nopea käyttää. Verkkoon merkitään saumat haluttuun kohtaan, jonka jälkeen muoto levitetään tasoon. Levityksessä rakenteessa tapahtuva venymä voidaan havainnollistaa ohjelmassa värityksellä. Ohjelmalla tehty esimerkkilevitys on näkyvissä Kuvassa 4.



Kuva 4. Kaksoiskaarevan pinnan levitys Blenderillä.

Levityskäytännöiltään Blender on hyvä. Levitetyissä muodoissa ei ole Mesh Unfolderin tapaisia vääristymiä, eikä rakennetta saatu myöskään jäämään ruttuun. Oh-

jelma on myös huomattavan paljon nopeampi levityksen laskemisessa. Blenderin suurin ongelma on, että se tukee levityksen vientiä ainoastaan SVG-muodossa. Levityskuvan voi kuitenkin jälkikäsitellä ja tallentaa DXF-muotoon esimerkiksi QCADilla. Levityksen SVG-muotoon tallentaminen muuttaa sen skaalaa, joten levityksen oikea koko täytyy säätää jälkikäsitelyssä manuaalisesti skaalaamalla. Levityskäyttöön Blender on hyvä ohjelma, jos on valmis käyttämään aikaa ohjelman käytön opetteluun ja levitysten vaatimaan jälkikäsitelyyn. Vaihtoehtoisesti Blenderiin voi itse koodata puuttuvan DXF-tuen ja automaattisen skaalauksen, jolloin ohjelma on erittäin kilpailukykyinen levityksessä suhteessa kaupallisiin ohjelmiin.

2.5 Yhteenveto CAD-ohjelmista

Tutkimuksen perusteella ilmaisia CAD-ohjelmia on kohtuullisen kattavasti tarjolla. 2D-suunnitteluun löytyy useita hyviä ja monipuolisia ohjelmia. Yksinkertaiseen perustason piirtämiseen soveltuvat hyvin LibreCad ja QCad. Monipuolisempaan käyttöön erityisesti Solid Edge 2D Drafting tarjoaa laajasti ominaisuuksia. 3D-ohjelmissa avoimeen lähdekoodiin perustuva FreeCad tarjoaa toimivan työkalun mallintamiseen. Harastajalle tai startupille soveltuu hyvin myös kaupallinen Autodeskin Fusion 360.

Levitysohjelmien puolella ilmaisten ja edullisten ohjelmien tarjonta on heikompa. FreeCad sisältää yksinkertaiset ja toimivat levitystyökalut, joilla voi tuottaa levityskuvat suunnitelluista ohutlevyosista. Kaksoiskaarevien pintojen levitystä voi suorittaa Blenderillä ja Mesh Unfolderilla. Blenderin käyttö tosin vaatii reilusti opettelua, Mesh Unfolder puolestaan tuottaa helposti huonoja levityksiä. Putkiliitosten levityskuvien tekemiseen soveltuvia ohjelmia löytyi useampia hiukan erilaisilla ominaisuuksilla, monipuolisin testatuista ohjelmista on Sheet lightning Pro.

Oleellista CAD-ohjelmien kohdalla on valita parhaiten omaan käyttöön ja tarpeeseen soveltuva ohjelma. Ennen käyttöönotettavan ohjelman lopullista valintaa kannattaa testata mahdollisia vaihtoehtoja, joista sitten valita omaan käyttöön parhaiten soveltuva ohjelma. CAD-ohjelmista löytyy lisää vertailumateriaalia myös esimerkiksi wikipediasta, jota voi käyttää oman ohjelman valinnan tukena ("Comparison of computer-aided design editors," 2017; "List of 3D modeling software," 2017).

3 FEM-ohjelmat

FEM-ohjelmat ovat elementtimenetelmään perustuvia laskentaohjelmia, joiden avulla voidaan esimerkiksi simuloida rakenteeseen kuormituksesta syntyviä jännityksiä. FEM-ohjelmat ovat erittäin hyviä suunnittelun apuvälineitä ja mahdollistavat simuloinnin avulla suunnitellun rakenteen testaamisen ja iteroimisen ilman oikean osan valmistamista.

3.1 Tutkimukseen valittujen FEM-ohjelmien kriteerit

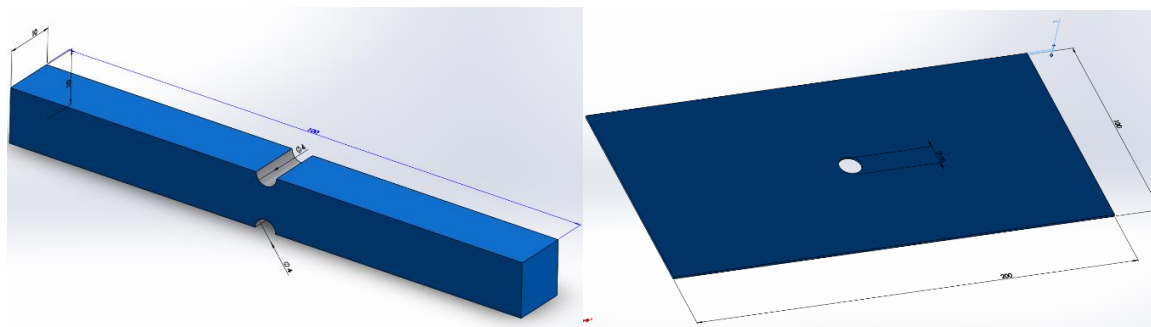
Tutkimukseen otettiin graafisella käyttöliittymällä varustettuja FEM-ohjelmia, joissa esi- ja jälkikäsittelijä on yhdistetty ratkaisijan kanssa samaan käyttöliittymään. Lisäksi vaadittiin, että ohjelmasta täytyy olla valmis asennuspaketti eli käyttäjän ei tarvitse itse kääntää ohjelmaa lähdekoodista. Tällaisten ohjelmien käyttöönottokynnys on pienempi ja ne soveltuvat hyvin myös aloitteleville FEM-simuloijille. Avoimien FEM-ohjelmien puolella on tarjolla useita tekstipohjaisia tai ilman esi- ja jälkikäsittelijää olevia ohjelmia, jotka soveltuvat paremmin tutkimustyyliin käyttöön ja edistyneille käyttäjille. Tutkitut ohjelmat kommentteineen on koottu Taulukkoon 4. Ohjelmien käytettävyyttä ja monipuolisuutta on arvioitu asteikolla 0-5. Nollan saaneita ohjelmia ei voi suositella lainkaan, kun taas 5 vastaa yleisten kehittyneiden kaupallisten ohjelmien tasoa.

Taulukko 4. Tutkitut FEM-ohjelmat

FEM-ohjelma	Testattu versio	Lisenssi	Arvio 0-5	Kommentteja
Elmer FEM	20.1.2017	GPL	1	Korkeahko käyttökynnys, vaatii perehtymistä. Graafinen käyttöliittymä ei kovin havainnollinen eikä intuitiivinen. Ongelmatilanteissa ei selkeitä virheilmoituksia, joista kävisi ilmi virheen syy. Soveltuu paremmin tutkijakäyttöön. Mahdollisuus lisätä omia moduuleja.
FreeCad	0.17.12560	LGPL2+	2	Käyttöliittymä vaatii hiukan opettelua. Mallin luominen onnistuu kuitenkin helposti ja nopeasti osaavalta käyttäjältä. Toimii erinomaisena lisänä FreeCadissa mahdollistaen suunnittelun osan nopean lujuustarkastelun. Tukee lujuus- ja lämpöanalyysia.
Fusion 360	2.0.3706	Ilmainen startupeille (liikevoitto alle 100k\$/vuosi)	4	Selkeä ja yksinkertainen käyttöliittymä, joka on intuitiivinen käyttää. Simulointimallin luominen helppoa ja nopeaa. Informatiiviset ohjeruudut madaltavat entisestään ohjelman matkaa käyttöönottokynnystä. Tukee lujuus- ja lämpöanalyysia.
SimScale	8.12.2017	Julkiset projektit ilmaisia	3	Täysin selainpohjainen simulointiohjelma. Kohtuullisen helppo opetella käyttämään. Ohjelma perustuu avoimen lähdekoodin ratkaisijoihin. Jälkikäsittelijässä vaatimattomasti ominaisuuksia. Tukee lujuus-, lämpö ja virtausanalyysia sekä partikkeleiden liikkeen simulointia.
z88Aurora	v4.4.0	Vapaasti ladattavissa	0	Pääosin yksinkertainen käyttää ja luoda simulointimalli. Verkostustyökalussa ei aitoa mahdollisuutta verkon paikalliseen tihentämiseen. Mallin koon kasvaessa käyttö hidastuu ja käy lopulta mahdottomaksi. Lisäksi tulosten tarkkuus huonolla tasolla vertailun perusteella. Tukee lujuus- ja lämpöanalyysia.

3.2 Ohjelmien testaaminen

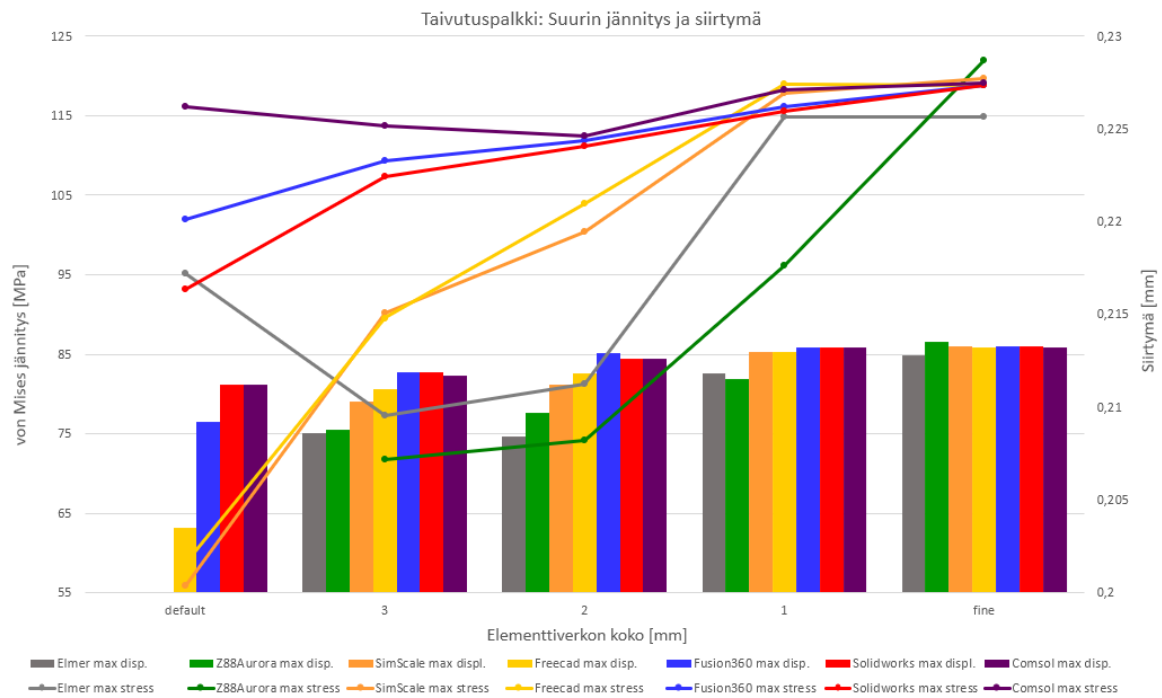
Valittuja ohjelmia testattiin laskemalla niillä kaikilla kaksi testigeometriaa. Taivutus-palkkia (Kuva 5) kuormitettiin 100 N voimalla vapaasta päästä toisen päässä ollessa sidottuna paikalleen. Vertailutuloksina otettiin uran pohjalle tuleva suurin von Mises vertailujännitys ja suurin taipuman arvo palkin päässä. Levygeometriassa (Kuva 5) toinen lyhyemmistä päätypinnoista sidottiin paikalleen ja kuormituksena käytettiin 100 MPa:n vetävää painekuormaa vastakkaisen päädyn pintaan lisättynä. Vertailuarvoiksi otettiin suurin vertailujännitys levyssä olevan reiän reunoilla ja suurin siirtymä levyn kuormitetussa päässä.



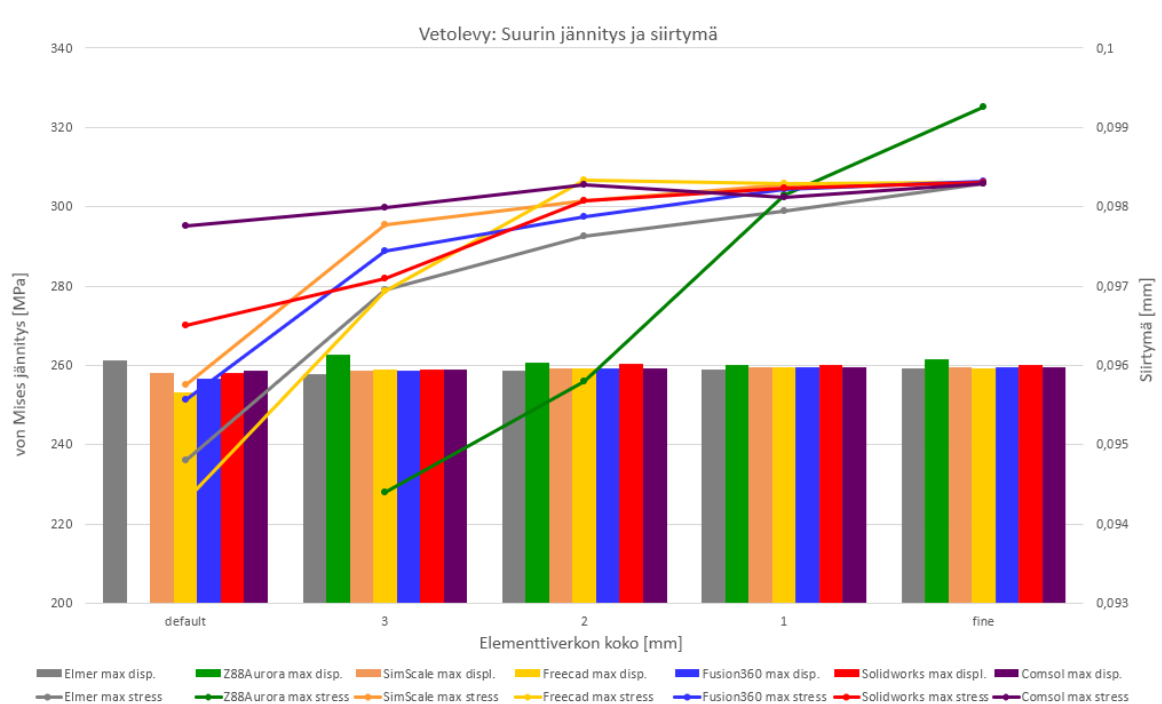
Kuva 5. Testisimulaatioissa käytetyn taivutus-palkin ja levyosan geometria.

Kummassakin mallissa materiaalina käytettiin terästä kimmomoduulilla 210 GPa ja poissonin vakiolla 0,3. Testisimulaatiot suoritettiin aluksi kunkin ohjelman verkotuksen vakioarvoilla ja sen jälkeen kiinteällä verkon koon arvoilla 3, 2 ja 1 mm. Lopuksi kullakin ohjelmalla tehtiin mahdollisimman tarkka simulaatio, jossa verkon kokoa suurimman jännityksen kohdalla pienennettiin paikallisesti. Vakioasetuksia lukuun ottamatta kaikki simuloinnit on tehty toisen asteen tetra-elementeillä.

Testisimulaatioiden tavoitteena oli selvittää, saadaanko testatuilla ohjelmilla tarkkoja tuloksia ja kuinka paljon tulokset riippuvat käytetystä elementtiverkosta. Testatuille ohjelmille käytettiin vertailuohjelmina kaupallisten ohjelmien puolelta SolidWorksin simulointipakettia ja Comsolia. Simulointitulokset on koottu Kuviin 6 ja 7. Oleellisen tärkeää tehdyssä testissä tuloksille on konvergenssi eli tulokset lähestyvät ratkaisun tarkkaa arvoa, kun elementtiverkon kokoa pienennetään. Toisin sanoen tulos ei enää juurikaan muutu, vaikka elementtiverkon kokoa pienennetään. Kuvien perusteella voidaan todeta, että yhtä lukuun ottamatta kaikkien ohjelmien tulos konvergoi likimain samaan arvoon.



Kuva 6. Simulointitulosten vertailu taivutuspalkille



Kuva 7. Simulointitulosten vertailu levyosalle

3.3 Testatut FEM-ohjelmat

3.3.1 Z88Aurora

Z88Aurora on graafisella käyttöliittymällä oleva yksinkertainen ilmainen FEM-simulointiohjelma ("z88aurora," 2017). Sillä voi tehdä lineaarisia ja epälineaarisia staattisia mekaniikka- ja lämpösimulointeja sekä värähtelyanalyyseja. Ohjelman käyttöliittymä

on kohtuullisen selkeä ja siitä löytyy myös kätevä aputyökalu, joka näyttää mitkä tarvittavista piirteistä on lisätty jo malliin ja mitä vielä pitää lisätä.

Puutteena ohjelman muutoin hyvässä käytettävyydessä on reunaehtojen lisääminen kappaleeseen. Mallin pintojen sijaan ne lisätään elementtiverkon solmuista, elementeistä tai pinnoista luotaviin ryhmiin. Koska reunaehdot siis sidotaan mallin elementtiverkkoon, pitää koko simulointimalli käytännössä luoda uudelleen elementtiverkon muuttuessa. Lisäksi paljon elementtejä sisältävillä verkoilla reunaehtojen lisääminen tahtoi olla vaikeaa ohjelman toiminnan hidastuessa. Ohjelma myös kaatuili esimerkiksi silloin, jos mallia muokkasi väärässä järjestyksessä.

Simuloitava kappale voidaan tuoda ohjelmaan esimerkiksi STEP-tiedostomuodossa. Ohjelma tukee lineaarisia ja toisen asteen elementtejä. Työkaluja elementtien koon määrittämiseen on vähän, mutta paikallisesti verkkoa voi tihentää jakamalla alkuperäisen verkon elementtejä pienemmiksi elementeiksi. Ongelmana tällaisessa tihentämisessä on se, että se ei korjaa karkealla verkolla kappaleen kaarevuuden vuoksi tulevaa virhettä. Jälkikäsitteijä on myös ominaisuuksiltaan vaatimaton, mutta se tarjoaa helposti oleellisen perusinformaation.

Kokonaisuutena Z88Aurora on välttävä ohjelma. Mallin luominen on reunaehtojen lisäämistä lukuun ottamatta kohtuullisen helppoa. Suurena heikkoutena ohjelmassa on sen antamien tulosten tarkkuus. Testin perusteella suurin von Mises -vertailujännitys ei suppene kohti tarkkaa ratkaisua, kun elementtiverkkoa pienennetään. Simuloitu maksimijännitys kasvoi miltei lineaarisesti ohi todellisen maksimijännityksen kummallakin testikappaleella Kuvien 6 ja 7 mukaisesti. Näin ollen tarkkaa maksimijännitystä ei voi löytää ohjelmalla luotettavasti. Yksi syy ohjelman epätarkkuuteen on sen käyttämässä verkottajassa, jolla ei voi minimoida geometrista virhettä paikallisesti verkkoa tihentämällä. Ohjelmaa voi kuitenkin käyttää lujoustarkastelussa kriittisimmän kohdan etsimiseen tai kahden samankaltaisen rakenteen paremmuuden vertailuun.

3.3.2 Elmer FEM

Elmer FEM on suomalaistaustainen avoimen lähdekoodin monifysiikan FEM-simulointiohjelma ("Elmer FEM," 2017). Sitä voi käyttää joko tekstipohjaisesti tai graafisella käyttöliittymällä. Graafinen käyttöliittymä on rakenteeltaan sekava ja ominaisuuksiltaan vaatimaton, lisäominaisuuksia saa ohjelmaan itse koodattua. Ohjelman tehokas käyttö edellyttäisikin käyttäjältä koodausosaamista. Jälkikäsitteijänä ohjelmassa käytetään Paraview-ohjelmaa, jonka voi suoraan avata Elmerin käyttöliittymästä

Simulointimallin luominen Elmerin graafisella käyttöliittymällä ei onnistu helposti ilman perehtymistä ohjelman käyttöön jonkin tutoriaalivälikappaleen avulla. Mikäli mallin määrittely on puutteellinen, ei puute selviä ymmärrettävästi ohjelman antamasta virheilmoituksesta. Ohjelman verkotustyökalu on myös puutteellinen, esimerkiksi verkon tihentäminen paikallisesti ei ole mahdollista. Lisäksi ohjelma ei kyennyt tekemään toimivaa elementtiverkkoa alle 1,5 mm elementtikooalla testatulle levyosalle. Niinpä testisimulointien alle 2 mm verkot tehtiin Comsolilla ja käännettiin ElmerGrid-ohjelmalla Elmerin käyttämään tiedostomuotoon.

Elmer ei ole vartenotettava vaihtoehto peruskäyttäjälle ja peruskäyttöön. Sen käyttö on kohtuullisen työlästä ja graafinen käyttöliittymä ei tarjoa esimerkiksi työkaluja kunnolliseen verkotukseen. Ohjelma soveltuukin paremmin tutkijakäyttöön, jossa

tarvitaan itse koodattuja ominaisuuksia. Ohjelman tarkkuus testisimulaatioiden perusteella on kohtuullisen hyvä, kun elementtiverkon koko on riittävän pieni. Karkeamilla verkoilla ohjelma antaa liian pieniä jännitustuloksia.

3.3.3 Fusion 360

Fusion 360 sisältää FEM-moduulin, jonka ominaisuudet riippuvat käytössä olevasta lisenssistä ("Fusion 360," 2017). Peruslissenssillä (ilmaislissenssillä) voi simuloida staattisia jännitys ja lämpöanalyyssejä sekä tehdä moodianalyysin värähtelyistä. Ultimatelissenssillä voi näiden lisäksi simuloida rakenteiden lommahdusta, epälineaarisia jännityksiä sekä iskumaisten kuormitusten vaikutusta rakenteeseen. Parempi lisenssi tukee myös pulttiliitoksia, jäykkiä elementtejä sekä muita simuloinnin lisätyökaluja.

Käytettävyydeltään ja informatiivisuudeltaan Fusionin FEM-paketti on erittäin hyvää tasoa. Ohjelma näyttää lyhyen opasikkunan kunkin työkalun tarkoituksesta, kun hiiren vie työkalun kohdalle. Simulointimallin luominen on helppoa ja nopeaa. Laskennan voi suorittaa joko pilvipalvelimella tai käyttäjän omalla koneella. Tulosten tarkasteluun löytyy tarvittavat perustyökalut ja ohjelma osaa lisäksi laskea ja piirtää varmuuskertoimen kappaleen eri osiin suhteessa annetun myötölujuuden arvoon.

Fusion 360 on erinomainen valinta perustason lujuus ja lämpösimulointeihin. Se ei tarjoa yhtä kattavasti ominaisuuksia kuin varsinaiset FEM-ohjelmat, mutta on erittäin hyvä ohjelma ominaisuuksiensa puitteissa. Ohjelmalla saadut tulokset ovat myös hyvin vertailukelpoisia muihin ohjelmiin, kuten Kuvista 6 ja 7 nähdään.

3.3.4 FreeCad

FreeCadin FEM-moduuli perustuu avoimen lähdekoodin CalculiXiin, ja se on integroitu ohjelmaan yhtenä työtilana ("FreeCad," 2017). Ohjelma käyttää verkotukseen avoimen lähdekoodin Gmsh-verkotustyökalua. Testattu FreeCadin 0.17 pre-julkaisu sisältää työkalut jännitys ja lämpösimulaatioiden tekemiseen lineaarisena ja epälineaarisena. Lisäksi ohjelmalla onnistuu ominaistajuusanalyysi.

Käyttöliittymältään ja käytettävyydeltään FreeCadin simulointityökalu on hiukan sekava. Simulointien tekeminen onnistuu kuitenkin lyhyen perehtymisen jälkeen helposti. Jälkikäsitteilyyn on ohjelmassa myös perustyökalut, joilla pärjää kohtuudella. Esimerkiksi reunaehtojen tukivoimien selvittämiseen ei kuitenkaan ole ohjelmassa työkaluja. Ohjelma on kuitenkin jatkuvan kehityksen alaisena, joten tulevaisuudessa sen tarjoamat ominaisuudet ovat todennäköisesti laajemmat.

FreeCadin FEM-moduuli on toimiva ratkaisu kevyeen simulointikäyttöön. Käytettävyydeltään se on parempi kuin Elmer FEM tai Z88Aurora. Erityisesti silloin kun varsinainen suunnittelutyö tehdään myös FreeCadilla, on se nopea keino varmistaa suunnitellun osan riittävä lujuus. Testauksen perusteella sen antamat tulokset ovat myös kohtuullisen hyviä, kun käytetään riittävän pientä elementtiverkkoa.

3.3.5 SimScale

SimScale on selainpohjainen simulointiohjelma, jonka laskenta tapahtuu pilvessä olevilla palvelimilla ("SimScale," 2017). Ohjelman käyttö on ilmaista, kunhan luotu simulointi määritellään julkiseksi eli kuka tahansa voi sitä tarkastella. Lisäksi ilmainen käyttö on rajattu vuosittaiseen 3000 tunnin ydinkohtaiseen laskenta-aikaan ja 500 GB:n

levytilaan. SimScalen laskenta perustuu seuraaviin avoimen lähdekoodin alustoihin; Code_aster, CalculiX, OpenFOAM ja YADE.

SimScalen käyttöliittymä on yksinkertainen ja mallin luonti sen avulla helppoa ja nopeaa. Yleisten STEP, IGES ja STL -formaattien lisäksi ohjelma tukee Solidworksin, Rhinon ja Inventorin tiedostomuotoja. Mallin luomisessa SimScalessa luodaan ensin elementtiverkko, johon lisätään sitten materiaalit ja reunaehdot. Tästä johtuen mallin verkotusta muutettaessa reunaehdot pitää liittää uudelleen malliin.

Verkotus ja simulointi lasketaan SimScalen palvelimilla pilvessä. Välillä laskennan alkamista joutui jonottamaan, joten varsinkin pienillä malleilla laskenta-aika voi olla moninkertainen verrattuna omalla koneella tapahtuvaan laskentaan. SimScalen jälkikäsittelijä on ominaisuuksiltaan vaatimatonta. Tuloksia voi helposti tarkastella visuaalisena mallina, mutta tarkkoja lukuarvoja ei mallista voi saada. Myöskään esimerkiksi reaktiivoimia reunaehdoissa ei ole saatavilla. Tulokset voi kuitenkin ladata omalle koneelle muulla ohjelmalla jälkikäsiteltäväksi.

Testien perusteella SimScale antaa tarkkojakin tuloksia. Levyosan simuloinnissa kuitenkin tulokseksi saatiin yli 10% liian suuria jännityksiä, kun elementtikoko oli noin puolet levyn paksuudesta. Harventamalla verkon levyn paksuiseksi tai tihentämällä verkkoa entisestään tulokset kuitenkin pienenevät lähelle tarkkaa arvoa. Ohjelmaa käytettäessä onkin syytä tiedostaa, että sen antamat tulokset saattavat vaihdella merkittävästi elementtiverkon koon mukaan.

Kokonaisuutena SimScale on kohtuullinen. Etenkin perustason käyttäjälle se tarjoaa helpon työkalun simulointiin ominaisuuksiensa puitteissa. Mikäli simulointien julkisuus ei haittaa ja simulointitarve jää alle 3000 tunnin vuosittaisen rajan, on ohjelma hyvä valinta kevyeen yrityskäyttöön.

SimScalen laskenta perustuu avoimen lähdekoodin paketteihin, joten ohjelma itsessään on vain nettipohjainen käyttöliittymä niiden hyödyntämiseen. Kaupallisten versioiden hinta on joulukuussa 2015 ollut 180€/kk/professional ja 850€/kk/enterprise, mutta nykyään kiinteitä hintoja ei ole ohjelmalle nähtävillä. Kaupallisen version merkittävin ominaisuus on sen tarjoama laskentakapasiteetti. Mikäli riittävä laskentakapasiteetti on jo olemassa omasta takaa, on SimScale kalliin puoleinen pelkäksi avoimen lähdekoodin pakettien käyttöliittymäksi. Tällöin voi olla järkevämpää käyttää suoraan vastaavia avoimia ohjelmia, käyttää jotain muuta avoimen lähdekoodin käyttöliittymää niille tai vertailla muiden kaupallisten ohjelmien tarjoamia mahdollisuuksia.

3.3.6 Muut avoimen lähdekoodin simulointi-ohjelmat

Avoimen lähdekoodin FEM-ohjelmia kartoitettaessa löydettiin myös useita ohjelmia, joita ei otettu mukaan tarkempaan vertailuun asetettujen rajausten vuoksi. Esimerkiksi avoimeen lähdekoodiin perustuvat Code_Aster sekä virtausdynamiikan simulointiin soveltuvat OpenFoam ja Code_Saturne voisivat olla hyvä ohjelma osaavalle käyttäjälle. Erillisenä avoimen lähdekoodin esi- ja jälkikäsittelijänä voi sitten käyttää Salomea tai Paraviewiä (vain jälkikäsittely). Kohtuullisen kattava lista olemassa olevista FEM-ratkaisijoista löytyy myös wikipediasta ("List of finite element software packages," 2017).

3.4 Yhteenveto FEM-ohjelmista

FEM-ohjelmien puolella ero kaupallisten ja avoimien ohjelmien välillä varsinkin käytettävyyden osalta on iso. Kaupalliset ohjelmat antavat myös tarkempia tuloksia karkealla elementtiverkolla ja niiden laskentanopeus on parempi. Ilmaisohjelmillakin kuitenkin pärjää perustason simuloinneissa. Suoritetujen testien perusteella niilläkin saa tarkkoja tuloksia, kunhan elementtiverkon kokoa pienentää erityisesti kriittisillä alueilla.

Testatut FEM-ohjelmat edustavat helppokäyttöisiä graafisella käyttöliittymällä varustettuja ohjelmia, joiden käyttöönotto ei vaadi erityisosaamista. Niistä Fusion 360 on ylivoimaisesti helppokäyttöisin ja tarkkuudeltaankin parasta tasoa. Avoimeen lähdekoodiin perustuva FreeCadin FEM-paketti tarjoaa myös kohtuullisen hyvän käytettävyyden yhdistettynä hyvään tarkkuuteen. Z88Auroran käyttöä ei voi suositella sen tarkkuusongelmien vuoksi, ohjelman muutoin hyvä käytettävyys kärsi myös merkittävästi huonosti toteutetun ja tökkivän reunaehtojen lisäämisen vuoksi. Elmerin graafinen käyttöliittymä on rakenteeltaan sekava ja verkotustyökalut puutteelliset. Koodaus-taitoiselle käyttäjälle se tarjoaa kuitenkin hyvän alustan monenlaisten simulointien tekemiseen. SimScale on selainpohjainen simulointiohjelma, jonka merkittävin etu on yksinkertainen käyttöliittymä ja sen tarjoama laskentakapasiteetti. Ilmaiskäyttö on kuitenkin rajattu 3000 vuosittaiseen laskentatuntiin.

4 CAM-ohjelmat

CAM-ohjelmilla luodaan tietokonepohjaisesti liikeratoja työstökoneille kappaleiden koneistusta tai leikkaamista varten. CAM-ohjelmat voidaan jakaa 2.5D ja 3D -ohjelmiin. 2.5D-ohjelmat kykenevät tuottamaan liikeratoja, joissa koneistus/leikkaus tapahtuu yhdessä tasossa kerrallaan. Ne soveltuvat lähinnä levymäisten kappaleiden leikkaamiseen ja koneistamiseen sekä yksinkertaisille 3D-geometrioille. 3D-ohjelmilla voi luoda työstöratoja, joissa myös karan suuntainen akseli liikkuu aktiivisesti koneistuksen aikana. Tämä mahdollistaa myös muiden kuin karan suuntaisten viistojen ja kaarevien pintojen koneistamisen. Lisäksi jotkin ohjelmat tukevat myös 4 tai 5 akselisten työstökoneiden liikeratojen luontia.

CAM-ohjelmassa täytyy olla määritettynä asetukset, joiden perusteella ohjelma osaa luoda liikeradoista oikeanlaisen G-koodin työstökoneessa käytettävää ohjausta varten. Osasta ohjelmista löytyy suoraan kattava valikoima valmiita konekohtaisia asetuksia. Mikäli halutulle koneelle ei löydy valmiita asetuksia, ne on yleensä mahdollista määrittellä manuaalisesti. Asetusten säätäminen vaatii kuitenkin jonkin verran osaamista. Kaupallisten ohjelmien kohdalla on usein mahdollista saada valmistajalta tukea oikeiden asetusten määrittämiseen. CAM-ohjelmaa valittaessa täytyykin tarkistaa, että asetukset halutulle työstökoneelle tai osaaminen niiden tekemiseen on saatavilla.

Useimmat perustason ohjelmat käyttävät liikeratojen luontiin yksinkertaista mallia, jossa koneistusradat ovat suoraviivaisia ja koneistusterälle kohdistuva työstörasitus vaihtelee suuresti koneistuksen aikana. Pehmeitä materiaaleja koneistettaessa se ei ole suuri ongelma, mutta esimerkiksi teräksen koneistuksessa on eduksi, että käytettävä ohjelma tukee adaptiivisia työstöratoja. Adaptiivisissa työstöradoissa työkaluun kohdistuva kuormitus on tasaisempaa, jolloin työkalun kuluminen on vähäisempää ja särkymisriski pienempi.

Yksinkertaisempien CAM-ohjelmien ongelmana voi olla myös työkalun viiston syöttöliikkeen puuttuminen koneistuksen alussa. Kaikissa työkaluissa ei ole päädyn keskellä leikkaavaa särmää, jolloin ne pitää syöttää materiaaliin viistosti. Yksinkertaisimpien ohjelmien suora alaspäin suuntautuva syöttöliike ei siten sovellu kyseisille työkaluille.

Tutkitut CAM-ohjelmat on arvosteltu ominaisuuksien ja käytettävyyden perusteella. Ohjelmien suuren tason ja ominaisuuksien vaihtelun vuoksi niitä ei testattu millään samalla geometrialla, vaan kutakin ohjelmaa testattiin ominaisuuksiensa puitteissa. Ohjelmat arvosteltiin asteikolla 0-5. Nollan saaneita ohjelmia ei voi suositella lainkaan, kun taas 5 vastaa yleisten kehittyneiden kaupallisten ohjelmien tasoa.

4.1 2.5D CAM-Ohjelmat

2.5D CAM-ohjelmia löydettiin tutkimukseen kuusi kappaletta. Ohjelmista kolme on avoimen lähdekoodin ohjelmia, loput ovat maksullisia. Tutkitut ohjelmat on koottu Taulukkoon 5.

Taulukko 5. Tutkitut 2.5D CAM-ohjelmat

2.5D CAM-Ohjelma	Testattu versio	Lisenssi	Arvio 0-5	Kommentteja
dxfgcode	Julkaistu 25.9.2017	GPLv3	2	Tekee liikeradat DXF-tiedostossa olevan 2D-geometrian pohjalta. Käyttöliittymä vaatii opettelua, ei ole kovin havainnollinen eikä intuitiivinen. Ei sisällä lainkaan valmiita konekohtaisia asetuksia jälkikasittelijälle. Tukee porauksia ja kappaletta koneistuksessa kiinni pitäviä tukia. Jyrsinnän lisäksi tukee vetoveistä ja sorvausta

2.5D CAM-Ohjelma	Testattu versio	Lisenssi	Arvio 0-5	Kommentteja
ECam	3.2.0.160	Kaupallinen, 150-350€	3	Yksinkertainen ja moderni 2.5D CAM-ohjelma. Koneistettavat piirteet piirretään ohjelman omilla työkaluilla tai tuodaan 2D-geometria (DXF, DWG). Ohjelma 3D-mallintaa valmiin kappaleen määritetyn aihion ja koneistusten perusteella. Käytettävyydeltään hyvällä tasolla, kehittyneet työkalut, saatavissa myös adaptiiviset työstöradat. Sisältää työkalut myös sorvaukseen. Mahdollisuus simuloida luodut työstöradat.
MakerCAM	Julkaistu 1.12.2017	Avoim	1	Flash-pohjainen 2.5D CAM, joka toimii suoraan verkkoselaimessa. Tukee vain SVG-tiedostomuotoa. Sisältää työkalut profiiliin, taskun, ja kaiverrusten leikkaamiseen sekä porauskierrot. Ohjelmassa myös alkeellinen nesting-työkalu. Sisältää bugeja, ei enää aktiivisessa kehityksessä.
SheetCam	6.1.38	Kaupallinen, 125€ Lisäosat 30-70€	3	Vanhanaikainen, mutta toimiva ja monipuolinen 2.5D CAM. Suunniteltu lähtökohtaisesti levyateriaalien leikkaukseen ja yksinkertaiseen koneistukseen. Tukee HPGL, DXF ja SVG -tiedostoja. Käytettävyyys hyvä, käyttöliittymä vaatii hiukan opettelua. Lisäosina saatavilla v-kaiverrus, vetoveitsi, pyörivän putken leikkaus, lankaleikkaus ja laser -moduulit.
Simple2D CAD/CAM	1.0	BSD	0	2.5D CAM-ohjelma, jossa yksinkertainen 2D CAD työstöradan geometrian luomista varten. Ulkopuolisen geometrian tuonti ohjelmaan ei saatu testissä toimimaan. Käyttö vaatii opettelua. Jälkikäsittelijä ei luo NC-koodin lainkaan konekäskyjä.
Qcad CAM	3.19.1	Kaupallinen, 89€	1	QCADin päälle rakennettu kaupallinen 2.5D CAM-lisäosa. Ohjelman ainoa työkalu testihetkellä on työstörata valittua profiilia seuraten. Luotu työstörata on mahdollista myös simuloida. Hintansa nähden todella vaatimaton ohjelma.

4.1.1 Avoimen lähdekoodin 2.5D CAM-ohjelmat

Avoimen lähdekoodin 2.5D ohjelmia löytyi tutkimukseen 3 kappaletta. Simple2D CAD/CAM osoittautui soveltumattomaksi yrityskäyttöön ("Simple2D CAD/CAM," 2010). Sen tuottamasta G-koodista puuttuu kaikki konekäskyt, kuten karan päälle laittamiset ja työkalun vaihdot. Ulkopuolisen geometrian tuonti ohjelmaan ainoassa tuetussa WRL-muodossa ei toiminut testatussa versiossa. Helppoa mahdollisuutta konekohtaisten asetusten määrittämiseen ei ohjelmassa ole, eikä ohjelma ole enää aktiivisessa kehityksessä.

MakerCAM on yksinkertainen selainpohjainen CAM-ohjelma ("MakerCAM," 2013). Ohjelma tukee vain SVG-tiedostoja. Se sisältää suoraviivaiset työkalut profiilien, taskujen ja reikien koneistukseen, lisäksi siinä voi määritellä malliin kappaletta koneistuksen aikana pitävät tuet. Ohjelmassa on myös välttävä nesting-työkalu useiden osien automaattiseen sovittamiseen koneistettavalle levyille. G-koodin luontiin on vain yksi perusasetus, eikä ainakaan testatussa nettikäyttöliittymässä ole työkaluja asetusten muuttamiseen. Muuten lupaavan oloinen ohjelma, mutta sisältää vielä kohtuullisen paljon bugeja ja puutteita. Ohjelman aktiivinen kehitys on loppunut jo vuosia sitten, joten ohjelman käyttökelpoisuuden kannalta vaadittavia parannuksia ei ole näkyvissä. Puutteidensa vuoksi ohjelmaa ei voi suositella yrityskäyttöön.

Testatuista avoimen lähdekoodin 2.5D CAM-ohjelmista dxf2gcode osoittautui toimivimmaksi ("dxf2gcode," 2017). Ohjelman ominaisuudet rajoittuvat profiilia seuraaviin liikeratoihin ja porauksiin. Ohjelman käyttö vaatii perehtymistä, esimerkiksi kappaletta kiinni pitävät tuet ja poraukset täytyy ohjelmassa itsessään lisäämisen sijaan lisätä geometrian DXF-malliin omille oikein nimetyille tasoilleen. Muutoinkaan oh-

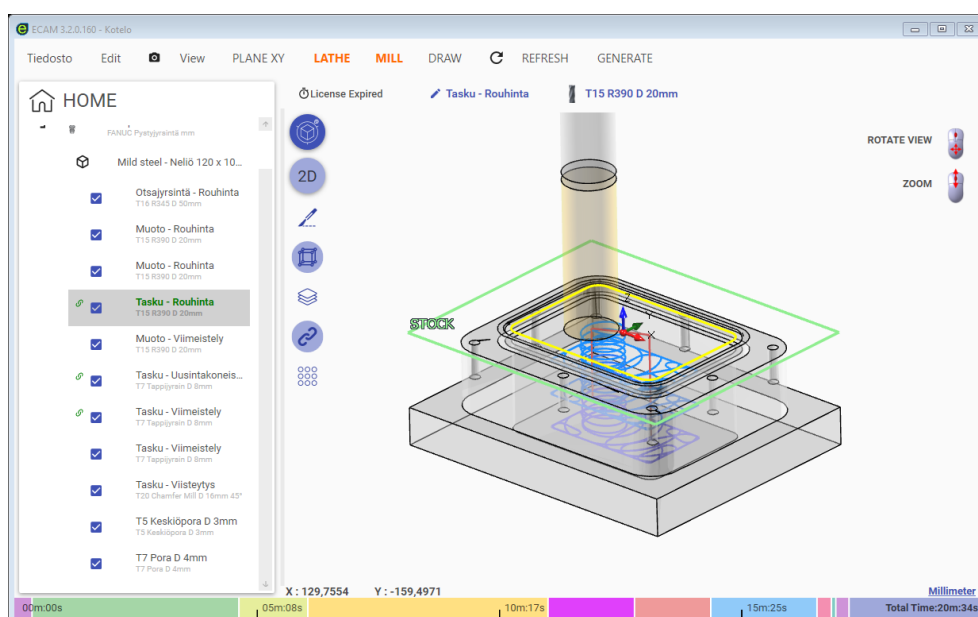
jelma ei ole käytettävyydeltään kovin intuitiivinen. Ohjelmassa ei ole valmiita konekohtaisia asetuksia, mutta siitä löytyy kuitenkin hyvät työkalut jälkikäsittelijän konfigurointiin. Ohjelma tukee jyrsinän lisäksi vetoveistä ja sorvausta.

4.1.2 Kaupalliset 2.5D CAM-ohjelmat

Kaupallisella puolella vaatimattomin CAM-ohjelma on QCadiin saatavilla oleva CAM-moduuli ("QCAD," 2017). Testatun version ainut työkalu kykenee tekemään profiilia seuraavia työstöratoja. Jälkikäsittelijän konfigurointiin on muutamia vaihdettavia asetuksia, mutta ei valmiita konekohtaisia asetuksia. Nyt testattu versio ei ole järkevä valinta yrityskäyttöön eikä tarjoa riittävästi ominaisuuksia hintansa vastineeksi. Qcad on kuitenkin aktiivisessa kehityksessä, joten tulevaisuudessa tilanne voi parantua.

ECam on positiivisesti uudella tavalla rakennettu 2.5D CAD/CAM-ohjelma, joka tukee sekä jyraintä, että sorvausta ("ECam," 2017). Siinä on moderni ja visuaalisesti erittäin havainnollinen käyttöliittymä, jossa on pyritty ensisijaisesti käytön helppouteen. Erityisen hyvä oivallus ohjelmassa on sen älykkäät ja nopeakäyttöiset työkalut. Esimerkiksi taskun koneistuksessa samalla työkalumäärittelyllä voidaan luoda nopeasti useita koneistuksia, kuten isolla terällä rouhinta, lopun materiaalin poisto pienemällä terällä, viimeistelyjyraintä ja nurkan viistäminen. Lisäosalla työkalut tukevat myös adaptiivisia työstöratoja, joissa työkalun kuormitus on optimaalisempi koko työstön ajan. Puutteena ohjelmassa on, että se ei tue 3D-tiedostojen tuontia. Haluttu geometria pitää piirtää ohjelmassa tai tuoda 2D:nä ohjelmaan. Ohjelma itse simuloi määritetyn aihion ja luotujen liikeratojen perusteella 3D-mallin koneistusgeometriasta. Esimerkki ohjelman mallintamasta geometriasta ja taskun adaptiivinen koneistusrata on esitetty Kuvassa 8.

Yksinkertaisen käyttöliittymän kääntöpuolena ohjelmassa on rajoitetusti manuaalisia asetuksia ja se soveltuukin huonosti monimutkaisemmille geometrioille. Lisäksi ohjelma on uudehko, minkä vuoksi se sisältää jonkin verran puutteita ja käytettävyysongelmia. Ohjelma on kuitenkin erittäin lupaavan oloinen valinta yrityskäyttöön yksinkertaisten kohteiden koneistukseen ollen helppokäyttöinen ja nopeasti opittavissa.



Kuva 8. Esimerkki ECamilla luodusta adaptiivisesta työstöradasta.

SheetCam on ensisijaisesti levymäisten materiaalien työstämiseen kehitetty ohjelma ("SheetCam," 2016). Se tukee profiililiikeratojen lisäksi taskukoneistuksia, porauksia ja kierteityksiä. Lisäosina ohjelmaan on saatavilla moduulit v-kaiverrukseen, vetoveitselle, pyörivän putken leikkaukseen, lankaleikkaukseen ja laserille. Ohjelman käyttöliittymä on vanhahko mutta toimiva. 2D-geometriaa voi tuoda ohjelmaan HPGL, SVG tai DXF -muodossa. Jälkikäsittelijä sisältää valmiit asetukset yli 250 erilaiselle koneelle. Lisäksi jälkikäsittelijälle voi helposti luoda myös omia asetuksia. Testin perusteella ohjelma on ominaisuuksiensa puitteissa hyvä, ja sitä voi suositella myös yrittäjäkäyttöön.

4.2 3D CAM-ohjelmat

3D CAM-ohjelmia löydettiin tutkimukseen monen tasoisia. Yksinkertaisimmissa ohjelmissa 3D-ominaisuudet rajoittuvat muutamaankin työkaluun, monipuolisimmassa käytettävissä on useita työkaluja erilaisilla koneistusstrategioilla. Tutkitut ohjelmat on koottu Taulukkoon 6.

Taulukko 6. Tutkitut 3D CAM-ohjelmat

3D CAM-Ohjelma	Testattu versio	Lisenssi	Arvio 0-5	Kommentteja
CamBam	1.0.6222	Kaupallinen, 108€	2.5	Vanhanaikainen, mutta toimiva 3D CAM-ohjelma. 3D-mallin voi tuoda RAW, 3DS tai STL -muodossa. Koneistusratojen luomista varten 3D-mallista täytyy luoda erilliset reunaviivat ohjelmassa olevan työkalun avulla. Sisältää toimivat perustyökalut, käytettyydelteään keskikastia. Ei työstöratojen simulointia.
CAMotics	1.1.1	GPL v2	2	Simulointiohjelma, jonka avulla voi testata muissa ohjelmissa luotuja G-koodeja. Mahdollistaa G-koodin verifiointin virheiden varalta. Yksinkertainen käyttää, mutta ohjelma hidastuu ja saat- taa kaatua isoilla malleilla. Sisältää jonkin verran bugeja, ohjelma ei enää aktiivisessa kehityksessä.
FreeCAD	0.17.12560	LGPL2+	2	FreeCadin 3D CAM-moduuli sisältää kohtuullisen monipuolisesti 2.5D-työkaluja ja muutaman yksinkertaisen 3D-työkalun liikeratojen luontiin. Tukee liikeratojen simulointia. Tehokas käyttö vaatii hiukan perehtymistä. Moduuli on aktiivisen kehityksen alainen, testiversio sisälsi joitain bugeja ja puutteita.
FreeMill	6.0.0.413	Kaupallinen ilmaisversio	0	Ominaisuuksiltaan todella vaatimaton 3D CAM. Käyttöliittymä on yksinkertainen ja helppo käyttää. Tekee annetulle geometrialle joko x- tai y-suuntaan siksak-työstöradan, joka seuraa annettun 3D-mallin pintaa. Poistaa koko materiaalipaksuuden yhdellä leikkauksella, ei tue työkalun syöttöä viistosti materiaaliin.
Fusion 360	2.0.3706	Ilmainen startupeille (liiketoiminta alle 100k\$/vuosi)	4	Erittäin monipuolinen pilvipohjainen 3D CAM. Käytettävyyks hyvällä tasolla. Useita 2.5D ja 3D -työkaluja monipuolisilla koneistusstrategioilla, tukee adaptiivisia työstöratoja. Mahdollisuus luoda liikeradat edellisiltä työkaluilta koneistamatta jääneen materiaalin alueelle. Sisältää liikeratojen simulointityökalun.
HeeksCNC	1.1	BSD 3 12€ valmis asennuspaketti	2	3D CAM perustason ominaisuuksilla. Käyttöliittymä sekava ja käytettävyydelteään keskinkertainen. Tukee 3D STEP ja IGES -tiedostomuotoja. Ei tue työkalun syöttöä viistosti materiaaliin. Sisältää työstöratojen simulointityökalun. Ohjelman aktiivinen kehitys on loppunut.

3D CAM-Ohjelma	Testattu versio	Lisenssi	Arvio 0-5	Kommentteja
MeshCAM	7 Build 5	Kaupallinen, 210-420€	1	Vahvasti yksinkertaistettu 3D CAM. 3D työstöradat voi luoda parametrisesti koko mallille. Lisäksi 2.5D tasku- tai profiilikoneistuksen voi luoda haluttuun piirteeseen, tukee myös porauksia. Luotujen työstöratojen muokkaus ja hallinta eivät toimi ohjelmassa kunnolla. Ei tue työkalun syöttöä viistosti materiaaliin, sisältää työstöratojen simuloinnin.
PyCam	0.5.1.1	GPL v3	1	3D CAM, joka luo liikeradat parametrusten asetusten perusteella koko geometrialle. Ohjelma ei tue porauksia ja on todella hidas laskemaan liikeratoja. Tukee STL, DXF, SVG ja PS -tiedostomuotoja. Soveltuu lähinnä harrastekäyttöön. Ohjelman kehitys jatkunut 5 vuoden tauon jälkeen versiolla 0.6 syksyllä 2017.
Vetric		Kaupallinen, 135-1800€	3	Useita ohjelmia hiukan eri ominaisuuksilla, suunniteltu visuaalisten kohteiden CNC-koneistukseen. Esimerkiksi kyltit, 3D-kai-verrukset jne. Periaatteena, että liikeradat luodaan automaattisesti koko geometrialle.

4.2.1 Avoimen lähdekoodin 3D CAM-ohjelmat

Avoimen lähdekoodin puolelta 3D-ohjelmia mukaan tutkimukseen löytyi kolme, lisäksi löydettiin yksi G-koodin simulointiohjelma. Löydetty simulointiohjelma CAMotics soveltuu muilla ohjelmilla tuotetun G-koodin testaamiseen virheiden varalta ("CAMotics," 2015). Se toimi testattaessa kohtuudella, mutta varsinkin suuremmilla malleilla sen simulointi hidastuu tai kaatuu. Ohjelman käyttö on helppoa ja nopeaa, suurin vaiva on oikeanlaisten työkalujen määrittämisessä. Määritetyt työkalut voi tallentaa ohjelman työkalukirjastoon. Testattaessa ohjelma löydettiin jonkin verran bugeja ja puutteita. Esimerkiksi 3D-koneistuksessa tietyn suuntaisissa viistossa liikkeessä ohjelma simuloi virheellisen geometrian. Lisäksi ohjelma ei tue esimerkiksi ohjelmallista työkalun säteen kompensointia. Ohjelman aktiivinen kehitys on loppunut, joten parannuksia puutteisiin ei ole näköpiirissä.

PyCam perustuu parametrusten asetusten pohjalta luotaviin työstöratoihin ("PyCAM," 2012). Käyttäjä ei valitse piirteitä geometriasta työstöratojen luomiseksi, vaan ohjelma luo geneerisellä menetelmällä liikeradat koko ohjelmaan tuodulle geometrialle. Käytännössä koneistus suoritetaan edestakaisena siksak-liikkeenä koneistettavan pinnan muotoja seuraten. Tällainen standardimainen lähestymistapa on helppo käyttää, mutta tuottaa jossain tapauksissa suhteellisen hitaita ja tehottomia työstöohjelmia. Lisäksi se asettaa rajoituksia koneistettavalle geometrialle ja saavutettavalle pinnanlaadulle.

Käytettävyydeltään PyCam on kohtuullinen, suurin puute on sen hitaus. Työstöratojen laskeminen vie kohtuuttoman paljon aikaa. Ohjelmasta on olemassa myös moni-ydinversio, jolla laskentaa voisi nopeuttaa. Version asentamisen on kuitenkin vaikeaa peruskäyttäjälle, joten sitä ei testattu. Ohjelmassa on myös Contour -asetus tehokkaampien pinnan muotoja seuraavien liikeratojen luomiseksi. Tämä ominaisuus osoittautui testeissä erittäin hitaaksi laskea sekä tuotti todella huonoja liikeratoja, joissa valtaosa ajasta kului turhiin pikaliikkeisiin. Testauksen perusteella PyCam soveltuu yrityskäyttöön huonosti. Sen tuottamat liikeradat ovat tehottomia ja hitaita laskea sekä rajoittavat mahdollisia koneistettavia geometrioita, esimerkiksi porauksia ei ohjelmalla voi tehdä. Ohjelman kehitys on aloitettu uudelleen 5 vuoden tauon jälkeen syksyllä 2017 versiolla 0.6. Mikäli kehitys jatkuu aktiivisena, PyCam saattaa tulevaisuudessa olla parempi ja soveltua myös yrityskäyttöön.

HeeksCNC on 3D CAM perustason ominaisuuksilla ja vaatimattomalla käytettävyydellä ("HeeksCNC," 2014). Ohjelman käyttöönotto vaatii runsaasti opettelua. Ohjelma tukee STEP ja IGES -tiedostomuotoja, mutta silti liikeratojen luontia varten tuodusta geometriasta pitää luoda erilliset reunaviivat. Ohjelmassa on tarjolla yksinkertaiset työkalut profiileille, taskuille ja porauksille. Lisäksi on mahdollisuus koneistaa 3D-pintoja siksak työstöradoilla. Ohjelma ei tue työstöterän viistoa syöttöä materiaaliin. Jälkikäsittelijälle on muutama valmis asetus, omia asetuksia voi luoda muokkaamalla asetustiedostoa. Testauksen perusteella ohjelma voi soveltua jossain määrin myös yrityskäyttöön, vaikkei siitä täysveriseksi CAM-ohjelmaksi olekaan. Ohjelman aktiivinen kehitys on loppunut.

FreeCadin Path-moduuli on testatuista ohjelmista lupaavin alku monipuoliseksi avoimen lähdekoodin 3D CAM-ohjelmaksi ("FreeCad," 2017). Se sisältää kohtuullisen monipuolisesti työkaluja etenkin 2.5D koneistukseen. Ohjelman käytettävyyden on kohotuullisella tasolla, lisäksi luoduille työstöradoille löytyy ohjelmasta simulointityökalu. Moduulin kehitys on vielä kesken ja se sisältääkin turhan paljon bugeja ja puutteita. Varsinkin 3D-koneistuksen työkalut ovat vielä hyvinkin vaatimattomat. Jälkikäsittelijässä on valmiit asetukset vain muutamille koneohjauksille. Omien asetusten luominen jälkikäsittelijälle vaatii käyttäjältä hiukan koodausosaamista.

Nykyisellään FreeCad soveltuu kohtuudella pienimuotoiseen yrityskäyttöön 2.5D koneistuksessa. Ohjelma on aktiivisessa kehityksessä, joten ainakin bugit korjautunevat tulevista versioista. Jo tutkimusaikana moduuli kehittyi merkittävästi, joten ominaisuuksien kehittyessä se voi tulevaisuudessa soveltua monipuolisemmin 3D-koneistukseen ja sitä kautta laajemmalti myös yrityskäyttöön.

4.2.2 Kaupalliset 3D CAM-ohjelmat

FreeMill osoittautui testauksessa todella vaatimattomaksi ("FreeMill," 2017). Se on kaupallisen valmistajan ilmaisversio, jonka ominaisuudet on karsittu yhteen työkaluun. Ohjelmassa on yksinkertainen, havainnollinen ja helppokäyttöinen käyttöliittymä, jolla tuodulle 3D-geometrialle voidaan luoda kappaleen pintaa seuraava siksak-liikerata. Luotu liikeyrata koneistaa koko poistettavan materiaalin yhdellä ajolla, joten ohjelma soveltuu vain kevyesti työstettävien materiaalien koneistukseen. Ohjelmalle onkin hankala kuvitella mitään järkevää käyttöä yritysmaailmassa.

MeshCam on vahvasti yksinkertaistettu CAM-ohjelma, joka on suunnattu amatöörikoneistajille ("MeshCAM," 2017). Sen käyttöliittymä on selkeä ja pelkistetyt oloinen. Ohjelmalla voi luoda automaattisesti 3D-työstöradat koko kappaleelle. Manuaalisesti ohjelmassa voi luoda 2.5D tasku- tai profiilikoneistuksen haluttuun piirteeseen, lisäksi ohjelmalla voi tehdä porauksia. Pääosin ohjelman käyttö on helppoa, mutta luotujen työstöratojen hallinta ja tallentaminen ei toiminut ohjelmassa loogisesti. Luotuja työstöratoja ei voinut aina muokata ja välillä uusien työstöratojen luominen hävitti kaikki edelliset. Ohjelman yksinkertaistamisessa onkin menty niin pitkälle, että minimalistinen ulkoasu hankaloittaa ohjelman käyttöä ja asetusten karsiminen rajoittaa ohjelman soveltuvuutta monimutkaisempiin koneistuksiin. Testauksen perusteella ohjelmassa voisi ominaisuuksien puolesta aineksia parempaan, mutta huono käyttöliittymä vaikeuttaa ominaisuuksien tehokasta hyödyntämistä. Ohjelmaa ei voi käytettävyyden puutteidensa vuoksi suositella yrityskäyttöön.

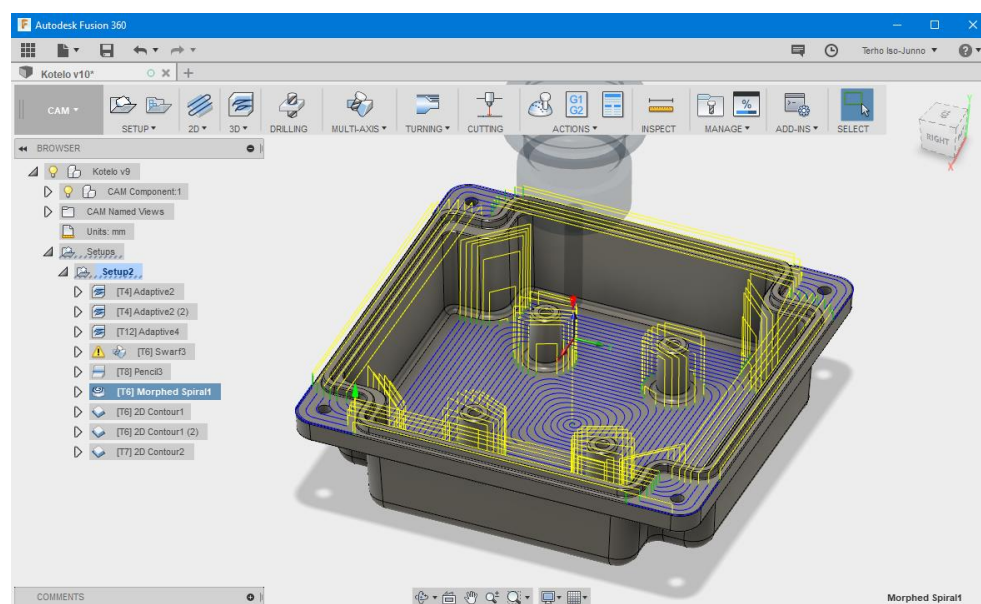
CamBam on vanhanaikainen, mutta kohtuudella toimiva 3D CAM ("CamBam," 2017). Ohjelmaan voi tuoda 3D-mallin RAW, 3DS tai STL -muodossa. Tuotua geometriaa ei voi suoraan käyttää liikeratojen luomiseen, vaan siitä täytyy luoda erilliset

piirteet ohjelmassa olevien työkalujen avulla. Ohjelmassa on kattavasti työkaluja 2.5D-koneistukseen, mutta vaatimattomasti 3D-liikeratojen luontiin. Ohjelman työkaluille löytyy runsaasti asetuksia, kunhan ottaa edistyneen käyttäjän asetukset käyttöön. Jälkikäsitteijästä löytyy valmiit koneasetukset muutamille yleisimmille ohjauksille, muiden asetuksia voi tarvittaessa helposti luoda. Ohjelman käyttö on lyhyen perehtymisen jälkeen kohtuullisen helppoa. Ohjelmassa voi lisätä malliin koneistuksessa kappaleita kiinni pitävät tuet, mutta luotuja liikeratoja ei voi simuloida. Kokonaisuutena CamBam on kohtuullinen ohjelma, ja se voi olla toimiva ratkaisu myös yrityskäytössä.

Vectric on seitsemästä eri ohjelmasta koostuva tuoteperhe, joka on suunniteltu ensisijaisesti visuaalisten kohteiden kuten kohokuvien, tekstien, kylttien, hahmojen ja esineiden koneistukseen ("Vectric," 2017). Eri tuotteilla on oma tarkoituksensa ja niillä on osittain päällekkäisiä ominaisuuksia. Peruseriaate ohjelmissa on, että ne tuottavat parametrisesti liikeradat koko koneistettavalle mallille. Pikaisen testauksen perusteella ne vaikuttavat soveltuvan hyvin yrityskäyttöön tarjoamiensa ominaisuuksien puitteissa.

Fusion360:n CAM-puoli on testatuista ohjelmista laajin ja monipuolisin ("Fusion 360," 2017). Sen käyttöliittymä on selkeä ja helppokäyttöinen. Ohjelma tukee adaptiivisia työstöratoja. Useammalla terällä koneistettaessa ohjelma tietää, mitä edelliset työkalut ovat koneistaneet ja osaa työstää seuraavissa vaiheissa vain jäljellä olevan materiaalin alueelta. Älykkäillä työstöradoilla esiintyi välillä turhia pikaliikkeitä, mutta pääosin radat olivat hyvin optimoituja. Luodut työstöradat voi myös simuloida ohjelmassa. Kuvassa 9 on Fusion 360:llä testigeometrialle luotu esimerkkityöstörata. Fusion 360 on testatuista ohjelmista ainoa, joka kykenee luomaan järkevästi työstöradat kyseiselle valuosan geometrialle.

Koneistuksen lisäksi ohjelma tukee myös sorvausta ja levymateriaalien poltto- tai laserleikkausta. Ultimate-lisenssillä Fusion 360:llä voi tehdä myös 5-akselista koneistusta. Valmiita jälkikäsitteijän asetuksia löytyy yli sadalle koneelle. Ohjelman käyttöön löytyy runsaasti ohjemateriaalia internetistä videomuodossa. Fusion 360 soveltuu monipuolisena ja kyvykkäänä ohjelmana hyvin yrityskäyttöön.



Kuva 9. Fusion 360:llä luotu spiraalimainen esimerkkityöstörata.

4.3 Yhteenveto CAM-ohjelmista

Tutkituista CAM-ohjelmista löytyi monen tasoisia ohjelmia. Parhaat soveltuvat hyvin monipuoliseen ja tehokkaaseen yrityskäyttöön. Hieman vaatimattomammat ohjelmat voivat toimia hyvin tietyllä kapealla osa-alueella sopivien geometrioiden työstämiseen. Tärkeintä onkin valita ohjelma oman tarpeen perusteella.

Positiivisimman vaikutuksen ohjelmista jättivät ECam, SheetCam ja Fusion360. Kaupallinen ECam on hyvä valinta 2.5D CAD/CAM-ohjelmaksi, jolla voi tehdä työstöratioja ilman erillistä CAD-ohjelmaa pelkkien piirustusten perusteella. Sen moderni ja havainnollinen käyttöliittymä mahdollistaa nopean koneistusohjelman tekemisen, lisäksi ohjelma tukee myös adaptiivisia työstöratioja sekä viistoja työkalun materiaaliin syöttöjä.

SheetCam on kaupallinen levy materiaalien leikkaamiseen ja koneistukseen hyvin soveltuva ohjelma. Ohjelmaan on saatavilla useita laajennusmoduuleita erilaisia työstöjä varten. Se edustaa käyttöliittymältään vanhempaa sukupolvea, mutta on ominaisuuksiltaan ja käytettävyydeltään hyvällä tasolla.

Fusion360 CAM on testatuista ohjelmista ylivoimaisesti monipuolisin ominaisuuksiltaan. Ohjelma tukee 5-akselista koneistusta, sorvausta ja leikkausta. Sen käyttöliittymä on selkeä ja looginen ja ohjelma soveltuukin tehokkaaksi työkaluksi myös yrityskäyttöön.

5 Yhteenveto tutkimuksesta

Tutkimuksessa kartoitettiin kaupallisia ja avoimeen lähdekoodiin perustuvia edullisia CAD, FEM ja CAM -ohjelmia, joita voisi käyttää yrityksissä maksullisten ohjelmien sijasta. Ohjelmia etsittiin internetistä pääasiassa hakukoneilla, mutta erityisesti wikipediasta löytyvät listat tarjolla olevista ohjelmista osoittautuivat hyödyllisiksi. Mukaan otettavilta ohjelmilta vaadittiin, että niiden käyttö tulee olla sallittua kaupallisessa työssä, ja että ohjelman käyttöoikeuden tulee olla joko ilmainen tai lisenssihinnaltaan alle 1000 €. Lisäksi valitun ohjelman tuli olla ominaisuuksiltaan sellainen, että sen käyttö on kohtuudella opeteltavissa ilman erityisiä tietoteknisiä taitoja. Tutkimukseen löydettiin mukaan kattavasti ohjelmia, lisäksi löydettiin paljon erityisesti FEM-ohjelmien puolelta ohjelmia, jotka rajautuivat tutkimuksen ulkopuolelle. Mukaan otetut ohjelmat edustavat kohtuullisen tasaisesti sekä kaupallisia, että avoimenlähdekoodin ohjelmia.

Tutkituista ohjelmista löytyi monen tasoisia vaihtoehtoja. Osa ohjelmista oli ominaisuuksiltaan ja käytettävyydeltään niin vaatimattomia, ettei niiden käyttöä voi suositella. Keskimäärin ohjelmat olivat kuitenkin kelvollisia ja soveltuvat myös yrityskäyttöön. Kun tutkittuja ohjelmia vertaa alan kaupallisiin ja kalliimpiin yleisesti käytössä oleviin ohjelmiin, ovat tutkitut ohjelmat jäljessä sekä käytettävyydeltään että ominaisuuksiltaan. Niillä kuitenkin saa monesti tehtyä samat asiat, mutta se voi olla työläämpää ja hitaampaa.

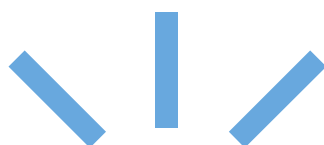
Tutkittujen ohjelmien soveltuminen yrityskäyttöön on tapauskohtaista. Pienelle ja aloittavalle yritykselle tai satunnaiseen ja rajattuun käyttöön isommassakin yrityksessä ne voivat tarjota edullisen ja toimivan ratkaisun. Varsinkin uutta yritystä aloitettaessa, kun kassavirtaa ei vielä ole, ne tarjoavat mahdollisuuden aloittaa työt ilman suuria sijoituksia ohjelmistoihin. Suuremmassa ja vaativammassa käytössä ja yrityksen pääasiallisena toimeentulon välineenä ne eivät kuitenkaan useimmiten ole kannattava vaihtoehto heikomman työn tehokkuuden vuoksi.

Kiitokset

Tutkimuksen toteuttanut Oulun yliopiston Tulevaisuuden tuotantoteknologioiden tutkimusryhmä FMT kiittää tutkimuksen mahdollistaneen Meripohjolan uudistuva metalli- ja konepajateollisuus -hankkeen päärahoittajaa Pohjois-Pohjanmaan Liittoa, jonka kautta hanke on saanut Euroopan aluekehitysrahaston (EAKR) rahoitusta. Kiitämme myös tutkimuksen taustalla olevan hankkeen muita rahoittajia, Raahen seudun yrityspalveluita, Ylivieskan seutukuntayhdistystä, BusinessOulua, Nivala-Haapajärven seutu NIHAKia, Lapin ammattikorkeakoulua, Oulun ammattikorkeakoulua ja Centria-ammattikorkeakoulua.

Lähdeluettelo

- Blender. (2017). Retrieved from <https://www.blender.org/>
- Brl-cad. (2016). Retrieved from <https://brlcad.org/>
- CamBam. (2017). Retrieved from <http://www.cambam.info/>
- CAMotics. (2015). Retrieved from <http://camotics.org/>
- Comparison of computer-aided design editors. (2017). Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_computer-aided_design_editors
- Cone layout. (2007). Retrieved from <https://www.conelayout.com/>
- Creo elements/direct modeling express. (2014). Retrieved from <https://www.ptc.com/en/products/cad/elements-direct/modeling/express>
- DesignSpark mechanical. (2015). Retrieved from <https://www.rs-online.com/designspark/mechanical-software>
- Digital pipe fitter. (2017). Retrieved from <http://digitalpipefitter.com/>
- DraftSight. (2017). Retrieved from <https://www.3ds.com/products-services/draftsight-cad-software/free-download/>
- Dxf2gcode. (2017). Retrieved from <https://sourceforge.net/projects/dxf2gcode/>
- ECam. (2017). Retrieved from <http://www.e-cam.it/>
- Elmer FEM. (2017). Retrieved from <http://elmerfem.org/>
- FreeCad. (2017). Retrieved from <https://www.freecadweb.org/>
- FreeCad sheet metal. (2015). Retrieved from https://www.freecadweb.org/wiki/Sandbox:Sheet_Metal
- FreeMill. (2017). Retrieved from <https://mecsoft.com/freemill/>
- Fusion 360. (2017). Retrieved from <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>
- gCAD3D. (2017). Retrieved from <http://www.gcad3d.org/>
- HeeksCNC. (2014). Retrieved from <https://sites.google.com/site/heelscad/>
- LibreCAD. (2016). Retrieved from <http://librecad.org>
- List of 3D modeling software. (2017). Retrieved from https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=List_of_3D_modeling_software&oldid=815078524
- List of finite element software packages. (2017). Retrieved from https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=List_of_finite_element_software_packages&oldid=816523255
- MakerCAM. (2013). Retrieved from <http://www.makercam.com/>
- Mesh unfold. (2012). Retrieved from http://www.revcad.com/Sheet5/Products/SL50/Mesh_Unfolder/mesh_unfolder.html
- MeshCAM. (2017). Retrieved from <http://www.grzsoftware.com/>
- NanoCad. (2013). Retrieved from <https://nanocad.com/>
- OpenSCAD. (2015). Retrieved from <http://www.openscad.org/>
- Plate 'n' sheet. (2013). Retrieved from <http://www.plate-n-sheet.com/>
- PyCAM. (2012). Retrieved from <http://pycam.sourceforge.net/>
- Qcad. (2017). Retrieved from <http://qcad.org>
- Sheet lightning pro. (2011). Retrieved from <http://www.revcad.com>
- SheetCam. (2016). Retrieved from <https://www.sheetcam.com/>
- Simple2D CAD/CAM. (2010). Retrieved from <http://simple2dcadcam.sourceforge.net/>
- SimScale. (2017). Retrieved from <https://www.simscale.com/>
- Solid edge 2D drafting. (2016). Retrieved from https://www.plm.automation.siemens.com/plmapp/education/solid-edge/en_us/free-software/free-2d-cad
- SolveSpace. (2016). Retrieved from <http://solvespace.com>
- Vectric. (2017). Retrieved from <http://www.vectric.com/>
- Z88aurora. (2017). Retrieved from <https://en.z88.de/z88aurora/>



**KERTTU SAALASTI
INSTITUUTTI**

**OULUN
YLIOPISTO**

**Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020**



Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

POHJOIS-POHJANMAA
Council of Oulu Region



MERIPOHJOLA
UUDISTUVA METALLI- JA KONEPAJATEOLLISUUS



OULUN YLIOPISTO
KERTTU SAALASTI INSTITUUTTI
FMT