

Aalto-yliopisto  
Insinöörیتieteiden korkeakoulu  
Rakennus- ja ympäristötekniikan koulutusohjelma

## **Rakennetekniikan rooli kalusteteollisuuden tuotekehityksessä**

Kandidaatintyö

22.4.2014

**Iina Leskinen**

---

**Tekijä** Iina Leskinen

---

**Työn nimi** Rakennetekniikan rooli kalusteteollisuuden tuotekehityksessä

---

**Koulutusohjelma** Rakennus- ja ympäristötekniikka

---

**Pääaine** Rakennetekniikka**Pääaineen koodi** R201-2

---

**Vastuopettaja** Leena Korkiala-Tanttu

---

**Työn ohjaaja(t)** Jarkko Niiranen

---

**Päivämäärä** 22.4.2014**Sivumäärä** 27**Kieli** Suomi

---

## Tiivistelmä

Tämä kandidaatintyö tutkii tietokoneavusteisen suunnittelun ja laskennan käyttöä huonekaluteollisuuden tuotekehityksessä. Tutkimuksesta on rajattu pois alan yritysten ja käytettyjen materiaalien analyysi, vaikka niitä on sivuttu muun tutkimuksen yhteydessä.

Tutkimus on toteutettu kirjallisuustutkimuksena, tutkitut materiaalit olivat pääasiassa tutkimuksia, artikkeleita ja opinnäytetöitä.

Tietokoneavusteinen suunnittelu ja parametrinen suunnittelu antavat edellytykset suunnitella monimuotoisia ja innovatiivisia muotoja. Tietokoneavusteinen laskenta ja numeerinen analyysi auttavat analysoimaan rakenteiden kestävyyttä ja optimoimaan rakenteita ja materiaalivalintoja. Numeerinen analyysi vähentää myös tarvetta prototyypin kokeelliselle testaukselle, mikä vähentää tuotekehitysprosessiin käytettyä aikaa ja mahdollisesti myös materiaalien tarvetta.

Tutkimuksessa havaittiin, että tuotannon kehittäminen ja nopeuttaminen ja tietokoneavusteisten menetelmien takaama laadunhallinta toimivat kilpailuetuina huonekalualan yrityksissä. Toisaalta tietokonesimulointi ei tule syrjäyttämään prototyyppien valmistusta ja testausta, koska tietokoneavusteisesti ei kuitenkaan voida mitata kaikkia testattavia ominaisuuksia, kuten esimerkiksi mielipiteitä ja pintamateriaalien toimintaa käytössä. Tietokoneavusteinen laskenta voi kuitenkin syrjäyttää prototyyppien käytön tuotteen mekaanisten ominaisuuksien ja kestävyuden määrittämiseksi.

---

**Avainsanat** CAD, tietokoneavusteinen laskenta, CAE, huonekaluteollisuus

---

# Sisällys

1	Johdanto .....	4
2	Suomalaisen huonekaluteollisuuden tuotekehitys.....	5
2.1	Tuotekehitys ja muotoilijan työprosessi .....	5
2.2	Tietokoneavusteinen suunnittelu .....	6
2.3	Tuotteen testaus .....	7
3	Rakennetekniikan näkökulma ja mahdollisuudet.....	9
3.1	Rakentamisen tietomallinnus .....	9
3.2	Parametrinen suunnittelu .....	10
3.2.1	Ongelmat.....	11
3.2.2	Edut.....	12
3.3	Rakenteiden numeerinen analyysi .....	13
3.3.1	Optimointi .....	18
4	Johtopäätöksiä .....	20
	Lähteet.....	22
	Standardit .....	23
	www-sivustot .....	23
	Kuvien lähteet .....	23
	Liite 1. Kalusteiden testattavat ominaisuudet .....	24
	Liite 2. Laemlaksulin bambutuolin rasituskoekokeiden tulokset.....	26

# 1 Johdanto

Rakentamisessa on kehitytty vuosien saatossa virheistä oppimisesta laskennalliseen suunnitteluun ja tekniseen varmuuteen. Tällä hetkellä rakentamisessa ollaan astumassa uuteen aikakauden tietomallintamisen muodossa (engl. Building Information Modeling, BIM). Kalusteteollisuudessa toimitaan yleensä edelleen vanhanaikaisesti valmistamalla ensin prototyyppi, ja sitä testaamalla varmistetaan tuotteen kestävyys (Haapalainen & Lindman 2011). Suomessa kalusteteollisuudella on kova tarve kasvaa ja kehittyä, sillä virallisten tilastojen mukaan investointipanostus kalustealalla tuotekehitykseen on vain 0,2 % liikevaihdosta (Lavikainen 2005).

Tämä kandidaatintyö tutkii mahdollisuutta ottaa kalusteteollisuudessa käyttöön tietokonesimulaatio ja sen osa-alueet, tietokoneavusteinen suunnittelu (engl. Computer Aided Design, CAD) ja tietokoneavusteinen laskenta (engl. Computer Aided Engineering, CAE). Tutkimuksen tavoitteena on selvittää tietokoneavusteisen suunnittelun ja laskennan tilanne kalusteteollisuuden tuotekehityksessä ja antaa suuntaa mahdollisille lisätutkimuksille. Tämä työ ei tutki uusia tapoja rakentaa ja valmistaa kalusteita tai niiden materiaalien analyysia. Myöskään huonekalualaa ja huonekalu yritysten toimintaa ei analysoida.

Tutkimus on toteutettu kirjallisuustutkimuksena perehtymällä eri lähteisiin, jotka käsittelevät huonekalu- sekä rakennusalaan ja tietokoneavusteista suunnittelua ja laskentaa. Tutkitut lähteet ovat pääasiassa alan tutkimuksia ja artikkeleita, mutta myös opinnäytetöitä käytettiin.

Työn edetessä havaittiin, ettei rakennetekniikan kehittäminen alalla todennäköisesti poista nykyisiä käytäntöjä.

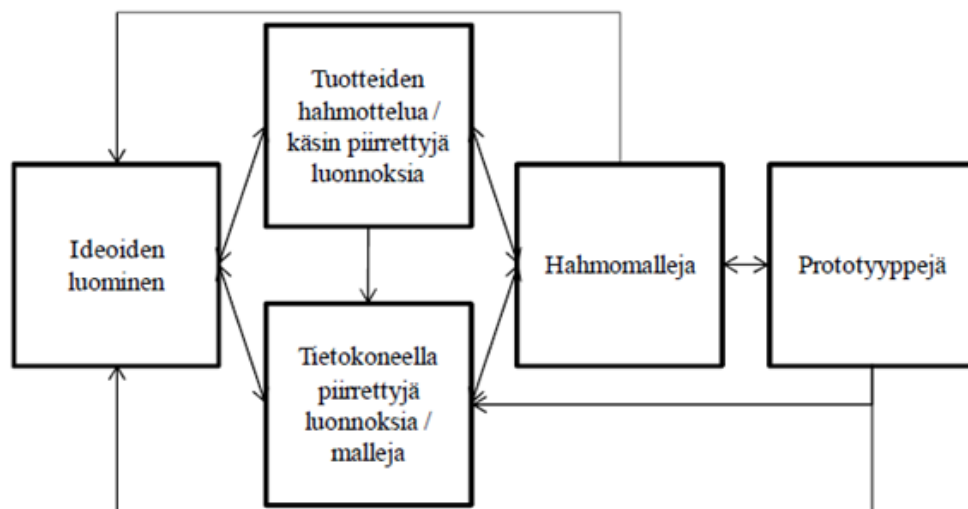
Tutkimuksen alussa on selvitetty huonekalualan tämänhetkistä tilannetta eri näkökulmista. Taustaluvussa käydään läpi muotoilijan työprosessi ja tietokonesimuloinnin tämänhetkinen käyttö sekä tuotteiden kokeellinen testaus, mikä on alan nykyinen käytäntö. Kolmannen luvun alussa viitataan rakennusalan tietomallintamiseen, ja loppu luvusta on jaettu tietokoneavusteiseen suunnitteluun ja laskentaan. Tietokoneavusteisessa suunnittelussa perehdytään arkkitehtien suosimaan parametriseen suunnitteluun ja sen käyttöön kalusteteollisuudessa. Tietokoneavusteisessa laskennassa perehdytään rakenteiden numeeriseen analyysiin ja sen käyttöön kalusteiden tuotekehityksessä. Esimerkkinä tietokoneavusteisesta laskennasta tutustutaan vuonna 2008 tehtyyn tutkimukseen, jossa sovelletaan numeerista analyysia bambusta valmistettavan tuolin suunnitteluvaiheessa.

## 2 Suomalaisen huonekaluteollisuuden tuotekehitys

Kalusteteollisuus on niin sanottua matalan teknologian alaa (low tech), koska kyseinen ala ei vaadi tai tavoittele jatkuvasti uutta teknologista tietoa tai taitoa (Haapalainen & Lindman 2011). Kalustealalla käytetään tyypillisesti vähän tietokoneavusteisia menetelmiä, kun verrataan rakennusalaan, missä ollaan astumassa uuteen tietomallintamisen aikakauteen, tai kone-tekniikkaan, missä tavoitellaan dynaamisempia muotoja ja suurempia kestävyyskäsitteitä. Näillä aloilla uutta teknologista tietoa ja taitoa tarvitaan paljon (high tech). Yleisesti ottaen alan koulutustaso on alhainen, ja vuonna 2008 tehdyistä alan rekrytoinneista yli 90 % koski toisen asteen koulutuksen suorittaneita. (Haapalainen & Lindman 2011.) Tässä luvussa tutustutaan nykyiseen tuotekehitysprosessiin ja nykyiseen testauskäytäntöön ja käydään läpi jo olemassa olevia tietoteknisiä mahdollisuuksia kahteen edellä mainittuun.

### 2.1 Tuotekehitys ja muotoilijan työprosessi

Valtaosa Suomen kalusteyrityksistä on pienyrityksiä, joiksi määritellään työntekijämäärän mukaan ne yritykset, joissa työskentelee vakituisesti alle 50 henkilöä (Tilastokeskus 2014). Puusepänteollisuuden liiton mukaan yli 75 % huonekaluteollisuuden yrityksiä toimipaikoista työllistää alle viisi henkilöä (vuonna 2004). Näissä yrityksissä muotoilija toimii oman osaamisensa ja kokemuksensa perusteella. Perusvaiheet muotoilijan työprosessissa ovat ideointi, luonnostelu, pienoismallien rakentaminen sekä prototyypin valmistaminen ja testaaminen. Vaiheissa eteneminen ei ole suoraviivaista, vaan vaiheista voidaan kulkea myös takaisinpäin ja hypätä jonkin vaiheen yli. Työprosessin eteneminen on kuvattu kuvassa 1. Jokaisella suunnittelijalla on oma tapansa edetä ideasta valmiiseen tuotteeseen. Tässä tutkimuksessa keskitytään tuotteen luonnostelu- ja mallintamiskäytäntöön sekä prototyypin testauskäytäntöön. (Haapalainen & Lindman 2011.)



Kuva 1. Muotoilijan työprosessin eteneminen huonekalusuunnittelussa (Haapalainen & Lindman 2011).

Suurin osa huonekalumuotoilijoista piirtää luonnoksensa käsin, osa jatkaa luonnoksen hahmottelua tietokoneohjelman avulla ja osa käyttää apunaan vain ja ainoastaan tietokoneohjelmia (Lavikainen 2005). Koska kalusteteollisuudessa tuotekehitys ei ole standardoitu, saattaa

piirtämisen aloittamisajankohta vaihdella hyvinkin paljon riippuen muotoilijasta. (Haapalainen & Lindman 2011.)

Monien muotoilijoiden mielestä tuotteen dimensioiden ja niiden suhteiden hahmottaminen on vaikeaa piirretystä kuvasta tai tietokonemallista, joten muotoilija luo pienoismallin, jonka dimensiot ovat suoraan verrannolliset suunnitteilla olevaan tuotteeseen. Muotoilija luo pienoismallin valitsemastaan materiaalista. Yleisesti tähän tarkoitukseen käytettyjä materiaaleja ovat muotoiluvaha ja pahvi. Pienoismalleja voidaan käyttää myös hahmottamaan erilaisia liitosmenetelmiä ja niiden toteuttamista. Kuten aiemmin todettiin, eteneminen suunnitteluprosessin vaiheesta toiseen ei ole lineaarista, mistä johtuen tässä vaiheessa voidaan vielä muuttaa piirrettyä luonnosta ja edelleen muovata pienoismallia. (Haapalainen & Lindman 2011.)

Kun suunnitelmasta ollaan jo varmoja, tilataan tuotteesta prototyyppi. Sen valmistaa yleensä puuseppä tai muu käsityöläinen, jolla on valmiudet prototyypin rakentamiseen. Prototyyppi valmistetaan tuotteen varsinaisesta materiaalista sen varsinaisessa koossa. Prototyypin valmistaminen antaa tärkeää tietoa varsinaisen tuotteen valmistusprosessista, jonka määrittäminen on myös muotoilijan vastuulla.

## 2.2 Tietokoneavusteinen suunnittelu

Vaikka monet suunnittelijat aloittavat luonnosvaiheensa käsin, tehdään varsinaiset luonnokset ja mallit tietokoneohjelmien avulla. Tietokoneavusteinen suunnittelu (engl. Computer Aided Design, CAD) antaa muotoilijalle mahdollisuuden luoda sekä kaksi- että kolmiulotteisen mallin ja tarkastella sitä ja sen materiaaleja. Nieminen (2009) kertoo Moduulisohva-projektissaan aloittaneensa luonnostelun käsin paperille. Valittuaan luonnoksista toimivimmat hän jatkoi suunnittelua tietokoneavusteisesti. Alkuvaiheen luonnoksissa haluttiin hahmottaa vain tuotteen yleispiirteinen luonne, ja niissä on kokeiltu paljon erilaisia mahdollisuuksia tuotteen muodoksi. Solidworks ja Rhinoceros -ohjelmien avulla luotiin tuotteen todellinen muoto. (Nieminen 2009.)

Tietokoneavusteisen suunnittelun ominaispiirteitä ovat mallin helppo muokattavuus, mittatarkkuus ja tietokantaluettelot. Niemisen (2009) projektissa myös tietokoneluonnoksia on tehty useita, ja niitä on vertailtu parhaan mahdollisen muodon löytämiseksi. Mallin muuttamisen helppoutta on hyödynnetty esimerkiksi kokeilemalla moduulisohvaan erilaisia käsinojia. Tietokoneavusteisen suunnittelun tuloksena rakentamisessa erikoissuunnittelua vaativat suunnitelmat voidaan aloittaa jo alustavien arkkitehtikuvien perusteella, ja tarvittavat muutokset voidaan tehdä koko malliin. Suunnitelmien mittatarkkuus helpottaa myös muutoksien tekemistä sekä yksityiskohtien suunnittelua. Tietokantaluettelot nopeuttavat niin ikään muutosten tekemistä, mutta ennen kaikkea ne nopeuttavat mallin luomista ja varmentavat yksityiskohtien olevan standardien mukaisia. Tietokantaluettelot sisältävät alakohtaisesti käytettyjä valmisosia ja komponentteja, kuten niveliä ja liittimiä.

Monet suunnitteluohjelmat ovat kuitenkin liian vaikeasti käytettäviä eikä suunnittelijoilla ole vaadittavaa koulutusta, jotta he voisivat saada niistä kaiken niiden tarjoaman hyödyn. Ohjelmien ja niiden lisenssien ollessa kalliita pienet yritykset eivät siirry tietokoneavusteiseen suunnitteluun, koska niiden tuoma taloudellinen hyöty on minimaalista suhteessa sijoitettuun pääomaan. (Joki-Korpela 2001). Lisäksi, koska tuotteiden tulee toteuttaa tiettyjä standardeja, jotka ovat toteutettavissa jo olemassa olevilla teknologisilla ratkaisuilla, ei nähdä tarvetta lisäkoulutukselle Lavikainen 2005).

## 2.3 Tuotteen testaus

Nykyisenä käytäntönä huonekalujen mekaanisten ominaisuuksien, kuten lujuuden, määrittämiseksi käytetään prototyypin tai jo valmiin tuotteen testaamista. Tuotteen testaamisella tarkoitetaan mekaanista rasituskoetta sekä tuotteen turvallisuus-, käytettävyys- ja ergonomista tutkimusta. Tämä tutkimus käsittelee rakenneteknistä suunnittelua ja tuotekehitystä, joten jatkossa keskitytään staattisiin ja dynaamisiin kuormituskokeisiin.

Mekaniikassa staattisilla rasituksilla tarkoitetaan kuormia, joiden suuruus tai suunta ei muutu ajan funktiona. Dynaamiset kuormitustapaukset sen sijaan ovat lyhytkestoisia sysäyksiä, värähtelyä tai pyörimistä, joilla suuruus, suunta tai molemmat muuttuvat.

Tuotteiden mekaaniset ominaisuudet on määritetty SFS-standardeissa. Myös kalusteille, joiden käyttötapa on yleisesti tunnettu, löytyy standardoidut testauskäytännöt. Esimerkiksi tuolin lujuuden määrittämiseen liittyvä koe on esitetty standardissa *SFS 4369: Huonekalut ja kalusteet. Tuolit. Lujuuden määrittäminen (1987)*. Standardissa *SFS 4969: Asumuksen kiintokalusteet, toiminnalliset ominaisuudet, testausmenetelmät ja vaatimukset (1983)* annetaan myös testausten tuloksiin liittyvät vaatimukset.

Taulukossa 1 (Liite 1: Kalusteiden testattavat ominaisuudet) on opetusviraston www-sivuston mukaiset testattavat ominaisuudet huonekalujen tuotekehityksessä. Tämän tutkimuksen kannalta olennaiset ominaisuudet on korostettu. Kuten taulukosta näkyy, tuotteiden kokeellinen testaus sisältää myös mielipiteisiin perustuvia ominaisuuksia, kuten mukavuus. 35 % (13 suoritettavaa testiä kaikista 37:stä) testattavista ominaisuuksista ei myöskään liity tuotteen lujuuteen tai rakennetekniikkaan, joten nämä ominaisuudet eivät ole olennaisia tämän tutkimuksen kannalta, mutta niihin palataan luvussa 4.

Huonekalujen mekaanisilla rasitustesteillä simuloidaan tuotteeseen kohdistuvaa todellista rasitusta hetkellisen käytön ja koko sen käyttöajan aikana. Kuten standardissa SFS 4369 kerrotaan, tuolia testataan painamalla sen istuin- ja selkäosia sekä mahdollisia käsinoja voimalla, jonka noin 100 kg painava henkilö aiheuttaa. Vakavuuskokeessa tuolia keikutetaan ja tarkastellaan sen raja-asentoja, kaatumishetkeä ja palautumista normaaliin asemaan. (Lahden ammattikorkeakoulu.)



Kuvat 2 ja 3. Huonekalutestausta esillä Vantaan Ikeassa.

Testauksen suorittaminen vaatii akkreditoitua huonekalutestauslaboratorion. Suomessa näitä laboratorioita on yksi, ja se sijaitsee Lahden ammattikorkeakoulun tiloissa. Ikea, joka on yksi pohjoismaiden suurimmista huonekaluketjuista, omistaa kaksi testauslaboratoriota, joista toinen sijaitsee Ruotsissa ja toinen Kiinassa. Ikean Vantaan myymälässä on lepotuoliosastolla nähtävissä tuolia rasitettavan hydraulisella testauskalustolla (Kuvat 2 ja 3). Vieressä on lappu, jossa kettoaan asiakkaille standardien mukaisesta testauskäytännöstä:

*”Kaikkien tuolien, nojatuolien ja sohvien kestävyys testataan sekä eurooppalaisten, että kansainvälisten standardien mukaisesti. Useat tuotteemme käyvät testit läpi monen kertaan.*

*Myös päälliset testataan. Niiden täytyy kestää kulutusta, auringon valoa ja toistuvaa pesua. Myös nukkaantumattomuuteen kiinnitetään huomiota.”*



### 3 Rakennetekniikan näkökulma ja mahdollisuudet

Tässä luvussa tutkitaan eri tietokonejärjestelmien käyttöä suunnitteluprosessin mallinnus- ja laskentavaiheissa. Kun tietokoneella toteutettua suunnittelua kutsutaan tietokoneavusteiseksi suunnitteluksi (CAD), niin vastaavasti tietokoneella tehtyä laskennallista analyysia kutsutaan tietokoneavusteiseksi laskennaksi (engl. Computer Aided Engineering, CAE). Tutkimus poikkeaa kalustesuunnittelusta ja sivuaa yleisemmin teollista suunnittelua ja etenkin rakentamista. Tällä hetkellä vallitsee kaksi eri koulukuntaa, joista toinen kehittää rakennusten tietomallintamista ja toinen parametrissa suunnittelua, joka on rakentamista huomattavan paljon yleisempää konesuunnittelussa, kuten autoteollisuudessa. Tosin arkkitehdeille parametrinen suunnittelu antaa paremmat edellytykset luovaan suunnitteluun.

#### 3.1 Rakentamisen tietomallinnus

Rakentamisessa on jo vuosia käytetty tietokoneavusteista suunnittelua, mutta nyt 2010-luvulla on rakennusala ottamassa käyttöön tietomallintamisen (engl. Building Information Modeling, BIM). Tietomallintaminen antaa valmiudet useampiin ulottuvuuksiin kuin tietokoneavusteinen suunnittelu, sillä 2D- ja 3D-mallien lisäksi tietomallintamiseen sisältyy muun muassa aikaan, resursseihin ja hankintoihin liittyvää informaatiota. Tietomallintaminen mahdollistaa myös eri alojen asiantuntijoiden saumattomamman yhteistyön koskien tiettyä projektia. Edellytyksenä tähän on se, että asiantuntijat käyttävät sellaisia suunnitteluohjelmia, jotka ovat keskenään yhteensopivia, eli käyttävät samaa ohjelmointikieltä.

Toisaalta, rakentamisen tietomallintaminen on johdattamassa suunnittelua niin sanotusti karkeisiin ja tavanomaisiin ratkaisuihin. Tämänhetkiset IFC-suunnitteluohjelmat (Industry Foundation Classes) eivät anna paljonkaan tilaa luovalle arkkitehtoniselle ajattelulle ja uusille innovaatioille. (Hubers 2010.) IFC on tietomallintamiseen liittyvän tiedonsiirron standardi, joka mahdollistaa 3D-geometrian ja parametrien siirtämisen suunnitteluohjelmista erilaisiin analyysi-, tuotanto- ja tuotetieto-ohjelmiin. Sen avulla ei voi siirtää piirustusmuotoista tietoa. (Eastman 2006.)

Ongelmana tämänhetkisessä tietokoneavusteisessa suunnittelussa ja IFC:n mahdollistamassa geometrian ja parametrien siirtämisessä on se, etteivät ne mahdollista mallien luontevaa muuttamista. Tällä hetkellä jo luotujen mallien korjaaminen ja muuttaminen pitää toteuttaa käymällä koko suunnittelupolku uudelleen läpi, mikä rajoittaa luovaa suunnittelua.

Suunnittelupolku alkaa yleensä pohjan (engl. layer) asetusten määrittämisestä. Pohjan asetukset sisältävät yksinkertaiset piirtämiseen liittyvät toiminnot: pohjan nimeäminen, mittasuhteen (engl. scale) valinta, piirrettävien muotojen väri sekä viivan muoto ja paksuus. Pohjan asetusten määrittämisen jälkeen pohjille luodaan niille kuuluvat geometriset mallit. Mallit ovat yksityiskohtaisia, ja niiden käsittely on tarkkaa, jotta kaikki liitokset ja tasot saadaan asetettua oikein suhteessa toisiinsa ja koko mallin yleiseen mittakaavaan. Valmiin mallin luomiseen kulunut aika on muutamasta päivästä muutamaaan kuukauteen riippuen hankkeen koosta. Kun valmiiseen tai lähes valmiiseen malliin halutaan tehdä muutos, täytyy mallin suunnittelupolku palata taaksepäin haluttuun kohtaan, käydä kaikki sen jälkeen tehdyt vaiheet uudelleen läpi ja tehdä niihin tarvittavat muutokset, jotta malli pitää edelleen paikkansa geometrisesti, fyysisesti ja ennen kaikkea rakennusteknisesti.

Arkkitehtien keskuudessa standardeista poikkeava suunnittelu on tällä hetkellä suosittua, koska sillä saadaan vaihtuvamuotoisia rakenteita. Kuvassa 4 oleva rakennelma moottoritien varrelta Hollannista on hyvä esimerkki standardista poikkeavasta arkkitehtuurista. (Hubers 2010.)



Kuva 4. Hessing Cockpit Utrecht, Hollanti (Hubers 2010).

### 3.2 Parametrinen suunnittelu

Parametrinen suunnittelu antaa edellytykset suunnittelun geometrian muuttamiseen, joten se on ratkaisu edellä mainittuun ongelmaan (Eastman 2006). Parametrinen suunnittelu on kehitettyä tietokoneavusteista suunnittelua (CAD), joka kehittyy kohti eri tavoitteita kuin tietomallintaminen (BIM). Parametrisen suunnittelun tavoitteena on luovan suunnitteluvaiheen kehittäminen, kun taas tietomallintamisen tavoite on eri alojen asiantuntijoiden yhteistyön parantaminen ja suunnittelupohjan yhtenäistäminen.

Parametrisessa suunnittelussa mallit luodaan parametrein, eli yksilöille määritetään tiettyjä ominaisuuksia, jotka kykenevät mukautumaan mallia muuttaessa. Kokonaisuutta kuvaava malli käyttää hyväkseen parametrien suhteita toisiinsa. Monedero (2000) käyttää esimerkkinä viivaa, josta tulee osa mallia, kun sille määritetään kaksi parametria: pituus ja suunta. Parametrisen suunnittelun etuna on se, että muuttujat antavat luvan muuttaa suunniteltua mallia viime hetkeen saakka.

Mallien muuttaminen mahdollistuu, koska määritetyt parametrit ovat verrannollisia keskenään. Verrannollisuudella tässä tarkoitetaan parametrien itseisarvojen suhdetta, esimerkiksi pituuksien suhdetta. Pidemmälle viedyssä parametrisessa suunnittelussa voidaan määrittää seinille ominaisuus olla aina kytkettynä toisiinsa. Täten, kun tehdään muutos yhteen seinään, mallinnusohjelma tekee tarvittavat muutokset myös kolmeen muuhun seinään.

Muutokset syntyvät ennalta määritettyjen rajoitteiden (engl. constraints) kautta. Rajoite on suhde, joka rajoittaa yksilön tai yksilöryhmän toimintaa, kuten viiva voi olla rajoitettu kaaren tangentiksi. Yleisesti voidaan ajatella, että rajoite on rakenteen fyysinen ominaisuus, joka on ymmärrettävissä niin kutsutulla maalaisjärjellä. Tästä hyvänä esimerkkinä on ymmärrys, että lattia on aina vaakatasossa ja ikkuna kuuluu seinään. Kalusteteollisuuden vastaava esimerkki on vaakatasossa oleva pöytälevy. Mallin rajoitteet ovat joko geometrisia tai fyysisiä eli insinöörirajoitteita. Tietokoneohjelmalla ei ole vastaavaa ymmärrystä kuin ihmisellä, joten sen ymmärrys täytyy luoda muilla keinoilla. Fyysisten rajoitteiden määrittämisen kaksi keinoa ovat matemaattisen kaavan käyttö ja ohjelmointi. Esimerkki kaavasta on

$$A = \frac{V}{h}, \quad (1)$$

missä  $A$  on tarkasteltavan alueen pinta-ala,  $V$  on tarkasteltavan alueen tilavuus ja  $h$  on tarkasteltavan alueen korkeus. Esimerkki ohjelmoitavasta koodista:

```
If D1+D2>D3:  
    then D1=10cm  
    else D1=20cm,
```

missä ensimmäisellä rivillä asetetaan ehto  $D1:n$  ja  $D2:n$  summalle, toisella rivillä määrätään arvo  $D1:lle$ , mikäli ensimmäisen rivin ehto toteutuu, ja kolmannella rivillä määrätään arvo  $D1:lle$ , mikäli ensimmäisen rivin ehto ei toteudu. Geometriset rajoitteet ovat muiden muassa yhdensuuntaisuus, kohtisuoruus, tangenti ja ympyröiden samankeskisyys. (Monedero 2000.)

### 3.2.1 Ongelmat

Parametristen suunnitteluohjelmien käytössä on kaksi pääongelmaa: ensimmäinen johtuu parametrien rajoitteiden hallinnasta, mikä johtaa mallien pitkälle vietyyn ohjelmointiin. Tämä puolestaan aiheuttaa ongelman eri tietokonemallien yhdistämisessä.

Rajoitteiden oikean määrän löytäminen on vaikeaa, koska yllirajoittaminen johtaa mallin sisäisiin ristiriitaisuuksiin ja alirajoittaminen estää työskentelyn etenemisen, sillä jokin mallin muuttujista on ilman reunaehtoja. Samalla, kun mallintaminen halutaan tehdä mahdollisimman automaattiseksi, siitä tulee entistä monimutkaisempaa, ja käyttäjälle aiheutuu paljon lisää työtä. Yksittäisen objektin dimensioiden ja geometrisen sijainnin määrittämisen lisäksi käyttäjän täytyy määrittää sen suhde muihin mallin yksilöihin. (Monedero 2000.) Näin ollen malleista syntyy helpostikin liian vaikeasti hallittavia ohjelmia ja niiden käytettävyys heikkenee, ja yksittäisen suunnittelijan motivaatio ohjelman käyttämiseen vähenee, kun tämän täytyy olla ajan tasalla ohjelmoinnin kehityksessä. Harva suunnittelija on kiinnostunut kehittämään omia ohjelmointitaitojaan, ja kun suunnittelija ei ole käyttänyt ohjelmaa hetkeen tai joku toinen suunnittelija tai taho on luonut mallin, on sen jatkaminen ja muuttaminen vaikeaa. (Hubers 2010.)

Kun ohjelma ilmoittaa ristiriitaisuudesta tai muusta mallin luomiseen liittyvästä ongelmasta, on ilmoitus usein vaikeasti ymmärrettävä, ja sen ratkaiseminen vaatii jälleen edistynyttä ohjelmointitaitoa. Rajoitteiden lisääminen lisää ristiriitaisuuksia mallissa, joten joidenkin ohjelmien sisään on suunniteltu erillistä ongelmienratkaisuoohjelmaa. Täten hallittavien ohjelmien lukumäärä kasvaa ja niiden hallinta vaatii lisää taitoa, mikä vähentää muotoilijan motivaatiota ohjelman käyttöön.

Parametrin mallin käytettävyyttä voi helpottaa tallentamalla ohjelmointikoodin, kun luotu elementti on valmis. Elementeistä valitaan halutut parametrit muuttujiksi, joiden arvoa voidaan jälkikäteen muuttaa. Elementtikokonaisuuksien hallinnoiminen on mallissa yksinkertaisempaa kuin yksittäisten muuttujien. Koodin tallentamista voidaan jalostaa käyttämällä jotain ohjelmointikieltä, kuten AutoLispia. Ohjelmoinnin lisääntyminen ja hallittavien kokonaisuuksien monimuotoisuus lisää edelleen suunnittelijan motivaation vähenemistä. (Monedero 2000.)

Ohjelmoinnin ja sen vaatavuuden lisääntyminen pakottavat käyttämään jotain ohjelmointikieltä, mikä johtaa ongelmiin mallien yhdistämisessä. Kuten luvussa 3.1 todettiin, täytyy mallien käyttää samaa ohjelmointikieltä, jotta ne olisi mahdollista yhdistää, ja koska ohjelmoijat tule-

vat eri taustoista ja ohjelmia on lähdetty kehittämään eri tarkoitukseen, tulee ongelmia juuri ohjelmointikieleen liittyen. Hubersin (2010) mukaan olisi viisainta kehittää jokaista ohjelmaa sen nykyisissä puitteissa, eli sen nykyisellä kielellä ja muuttujilla, kuin opetella jonkin toisen ohjelman käytäntö. Näin edistys tapahtuisi nopeammin yksittäisissä ohjelmissa, ja siitä eteenpäin yleiseen käytäntöön olisi sulavampaa. Tällä hetkellä suurin ongelma-alue tuotekehityksessä on arkkitehdin luoman parametrin mallin yhdistäminen rakenteensa kanssa, koska IFC-pohjainen rakentamisen tietomallintaminen eroaa hyvin paljon parametrin suunnittelun pohjasta. (Hubers 2010.)

### 3.2.2 Edut

Vaikka parametrinen suunnittelu on vielä kehitysvaiheessa ja sen kehitykseen liittyy paljon ristiriitoja, on se silti hyvä suunta olemassa olevalle tietokoneavusteiselle suunnittelulle. Tietokoneavusteinen suunnittelu ja tietomallintaminen eivät kumpikaan tarjoa kunnollisia edellytyksiä luovalle suunnittelijalle, kuten arkkitehdille ja teolliselle muotoilijalle.

Parametrin suunnittelun kehitys on hyvin nähtävissä elektronisissa tuotteissa, kuten sähköhammasharjoissa. Kuvissa 5 ja 6 näkyy sähköhammasharjan muodon kehitys vuodesta 1961 vuoteen 2014.



Kuva 5. Sähköhammasharja vuodelta 1961.



Kuva 6. Sähköhammasharja vuodelta 2014.

Tällä hetkellä parametrinen suunnittelu on käytössä etenkin teknillisessä muotoilussa suurisäkin mittakaavoissa. Flying House Project –blogissa on mallinnettu uudenlaisia autoja, joista osalla on lento-ominaisuus. Kuvassa 7 näkyy Audin Shark –tulevaisuuden auto. (Flying House Project.)



Kuva 7. Audin Shark -tulevaisuuden auto (Flying House Project).

Arkkitehtuurissa parametrinen suunnittelu näkyy yhtä lailla virtaviivaisina muotoina. World of Archi julkaisee uudenlaisen arkkitehtuurin innovaatioita ja suunnitelmia. Kuvissa 8 ja 9 on mallinnettu modernia arkkitehtuuria Serbian Belgradissa ulko- ja sisäpuolelta.



Kuva 8. Modernia arkkitehtuuria Belgradissa (World of Archi).



Kuva 9. Modernia arkkitehtuuria sisäpuolelta Belgradissa (World of Archi).

Muodon kehitys sulavalinjaiseen suuntaan on juuri se, mitä arkkitehdit ja teolliset muotoilijat haluavat. Tulevaisuudessa kehitetyt parametriset suunnitteluohjelmat tulevat olemaan hyviä työkaluja kalusteteollisuudessa. Lisäksi parametrinen suunnittelu on ratkaisu luvussa 3.1 mainittuun ongelmaan koskien mallien muuttamista, joka on tärkeää kalusteteollisuudessa, kun tuotteen testauksen jälkeen siihen halutaan tehdä korjauksia.

### 3.3 Rakenteiden numeerinen analyysi

Rakentamisessa tietokoneet on otettu käyttöön 1950- ja 1960-lukujen aikana helpottamaan lujjuuden määrittämistä, ja nykyisin tietokoneavusteinen laskenta on osa rakenteiden tietomallinnusta. Piirtämistä jatkettiin käsin 1970-luvulle, jolloin siirryttiin myös tietokoneavusteiseen suunnitteluun. (Fuh et al. 2005.) Laskennallinen osuus on edelleen vähäistä huonekalujen suunnitteluprosessissa, ja siksi sitä ei ole muutettu tietokoneavusteiseksi. Tässä luvussa tutkitaan numeerisen analyysin mahdollisuutta kalusteteollisuudessa, ja esimerkkinä numeerisen analyysin käytöstä huonekalujen tuotekehityksessä tutustutaan Laemlaksulin bambutuolituotkimukseen (2008).

Tietokoneavusteisella laskennalla ja simuloinnilla voidaan mallintaa ja analysoida tuotteen staattista kuormankantokykyä sekä dynaamista toimintaa ja suorituskykyä (Ideal PLM).

Jo 1980-luvulla on tutkittu elementtimenetelmän (engl. Finite Element Method, FEM) käyttöä huonekalujen suunnittelussa. Elementtimenetelmällä halutaan määrittää tuotteeseen syntyviä paikallisia siirtymiä, kun kuorma on tunnettu. Tämä menetelmä toteutetaan periaatteeltaan samoin kuin tuotteiden kokeellinen testaus, josta on kerrottu luvussa 2.3, vaikkakin se suoritetaan tietokonesimulaationa tietokoneella luodulle mallille. Elementtimenetelmä on numeerinen menetelmä, jolla analysoidaan ulkoisten voimien (kuten voima ja lämpö) vaikutusta rakenteeseen. (Erdinler et al. 2011.) Matemaattisen analyysin toteuttaa yhtälö

$$\{K\} \{U\} = \{F\}, \quad (2)$$

missä  $\{K\}$  on jäykkyyismatriisi,  $\{U\}$  on muodonmuutosmatriisi ja  $\{F\}$  on ulkoisten voimien muodostama matriisi. Täten yhtälöstä (Kaava 2) voidaan ratkaista mahdolliset maksimaaliset voimat, jotka rakenne kestää, kun sen suurimmat mahdolliset siirtymät on tunnettu. Yleensä kuitenkin ulkoiset voimat ovat tunnettuja ja halutaan ratkaista syntyvät siirtymät, jotka saadaan yhtälöstä

$$\{U\} = \{K\}^{-1} \{F\}, \quad (3)$$

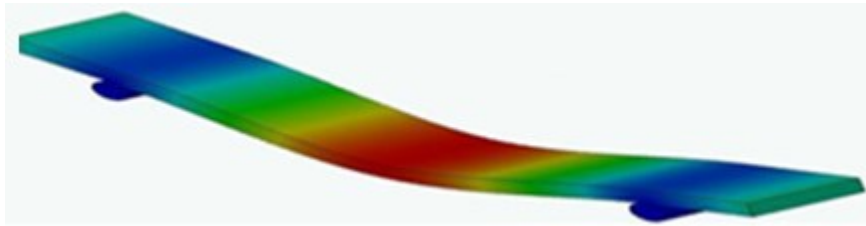
missä  $\{K\}^{-1}$  on jäykkyyismatriisin  $\{K\}$  käänteismatriisi. Siirtymistä voidaan laskea venymät ja venymistä jännitykset Hooken lain mukaan:

$$\sigma = E\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}, \quad (4)$$

missä  $\sigma$  on jännitys ja  $E$  on materiaalille tunnettu kimmokerroin.  $\varepsilon$  kuvaa suhteellista venymää, joka lasketaan jakamalla venymä  $\Delta L$  alkuperäisellä pituudella  $L$ . Venymät eri akselien suuntiin saadaan muodonmuutosmatriisista  $\{U\}$ .

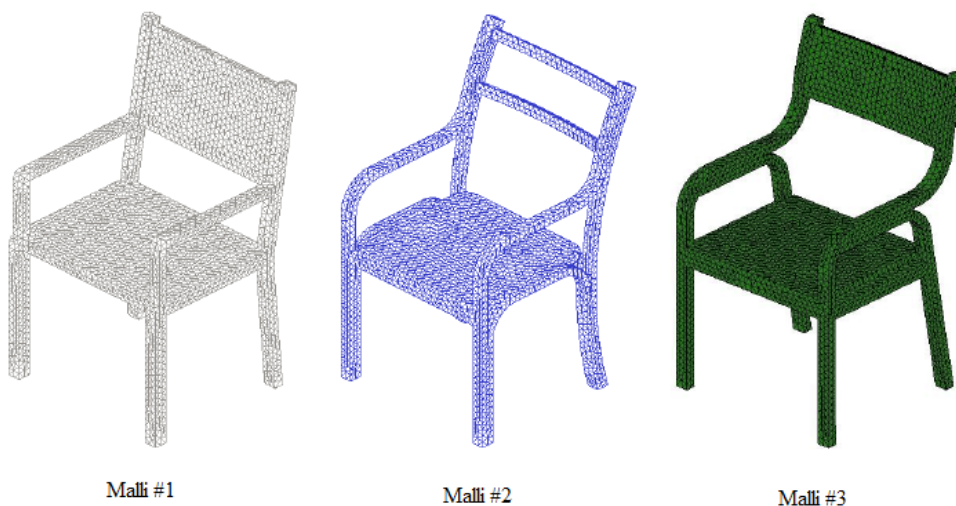
Etenkin puisten kappaleiden mekaaninen analyysi on tärkeää, koska puun ominaisuudet poikkeavat toisistaan paljon eri suunnissa (Erdinler et al. 2011). Esimerkiksi puisen sahatavaran kestävyys vedolle syyn suunnassa on noin 30-kertainen lujuusluokissa C18 ja C24 ja 45-kertainen luokassa C30 verrattuna siihen, kun puuta vedetään kohtisuorassa syytä vastaan. Syyn suuntainen puristuskestävyys on kahdeksankertainen verrattuna syytä vastaan kohtisuoraan puristuskestävyyteen edellä mainituissa lujuusluokissa. (Eurokoodi 5.)

Tietokoneavusteisesti laskeminen sisältää seitsemän vaihetta: mallin piirtäminen, materiaalien ja rajoitteiden määrittäminen, kuormitusten lisäys, elementtiverkon luominen kappaleelle, staattisen analyysin aloitus ja varmuuskertoimien vaikutuksen määrittäminen. Kuvassa 10 on yksinkertainen päätyalueelta tuettu ja tasaisesti kuormitettu kirjahylly. Käytännössä laskentaohjelma tulostaa kuvan mukaisen tuloksen, missä eri värein kuvatut alueet on helppo ymmärtää erisuuruuksiksi rasituksiksi. Rasitus hyllyn keskellä on suurin ja siihen on valittu väriksi punainen, joka yleensä mielletään varoittamaan vaarasta. Tuilla rasitus on minimaalista, joten kyseisen alueen rasitukset on kuvattu neutraalilla sinisellä. (Erdinler et al. 2011.)



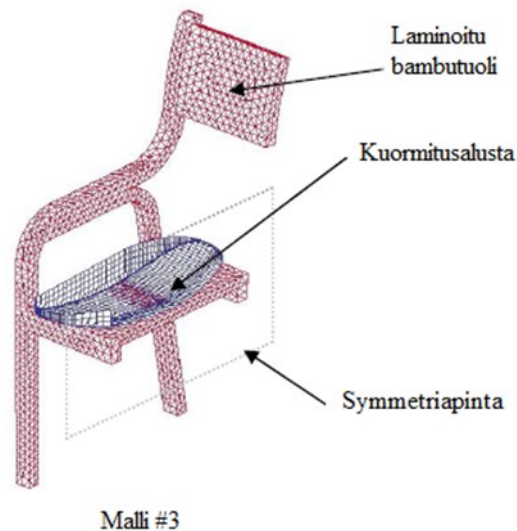
Kuva 10. Tasaisesti kuormitetun kirjahyllyn rasitukset (Erdinler et al. 2011.)

Laemlaksul (2008) on tutkinut elementtimenetelmän ja tietokoneavusteisen laskennan käyttöä bambutuolin suunnittelussa. Hän on luonut kolme erilaista mahdollista muotoa bambusta rakennettavalle tuolille (Kuva 11.) ja suorittanut niille staattisen, dynaamisen ja pudotusrasituskokeen tietokoneohjelman avulla. Materiaalina bambu vastaa lujaa puuta, joten Laemlaksulin tutkimusta voidaan käyttää hyväksi tässä tutkimuksessa. Mallien luomisessa ei ollut mitään tietokoneavusteisesta suunnittelusta poikkeavaa. Tietokoneavusteinen laskenta on samankaltainen analyysi kuin kokeellisesti testattavilla prototyypeillä, koska lisättävien rasitusvoimien suuruudet ja kestoajat ovat samaa suuruusluokkaa. Rasitettavat mallin osat ovat myös samat kuin prototyyppejä testattaessa.

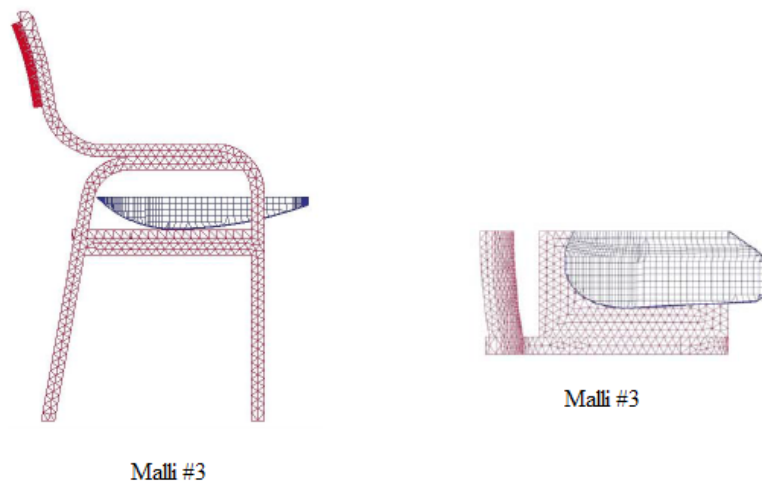


Kuva 11. Laemlaksulin (2008) kolme erilaista bambutuolimallia.

Koska tuolit ovat symmetrisiä, niistä on mallinnettu vain toinen symmetriapinnan rajoittama puoli. Staattisen ja dynaamisen kuormitustapauksen kuormitusasetelmat ovat samat, eroavaisuutena kuormitustapauksilla on kuorman suuruus ja sen vaikutusaika. Lisäksi kuormitusalueet eri tuolimalleilla ovat samanlaiset, ja ne ovat tässä tutkimuksessa mallissa #3.



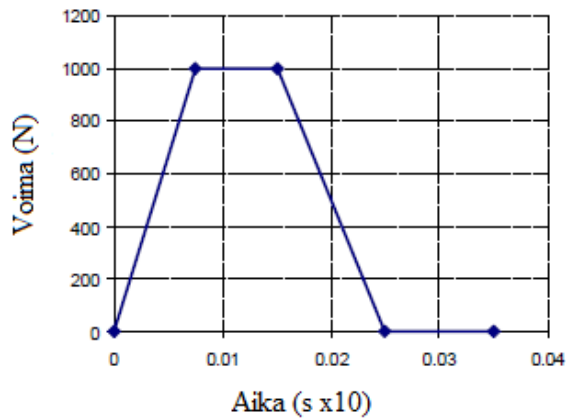
Kuva 12. Mallin #3 staattisen ja dynaamisen rasituskokeen asetelma (Laemlaksul 2008).



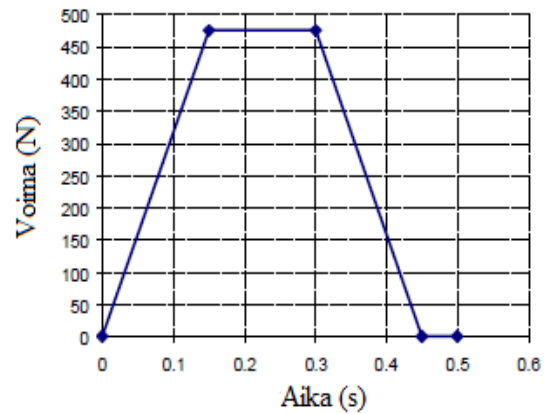
Kuvat 13 ja 14. Kuormitustapaus kuvattuna sivulta ja ylhäältä (Laemlaksul 2008).

Kuvissa 12, 13 ja 14 on havainnollistettu kuormitusalueen koko, muoto ja sijainti tuolilla staattisessa ja dynaamisessa rasituskokeessa. Staattisessa testissä kuormitusalueen kokonaisvoima, jolla se vaikuttaa tuoliin, on 2000 N eli symmetrisesti puolikasta tuolia kuormitetaan 1000 N:n voimalla. Staattisen rasituksen kesto on 0,25 s. Dynaamisessa rasituksessa kuorman suuruus puolikkaalle tuolille on 475 N, eli koko tuolille 950 N. Dynaamisen rasituksen kesto on 0,50 sekuntia. Staattista ja dynaamista rasituskoea on kuvattu kuvissa 15 ja 16, joista nähdään ajan kulku koko kuormituksen aikana.





Kuva 15. Lisätty voima staattisessa kuormitustapauksessa (Laemlaksul 2008).

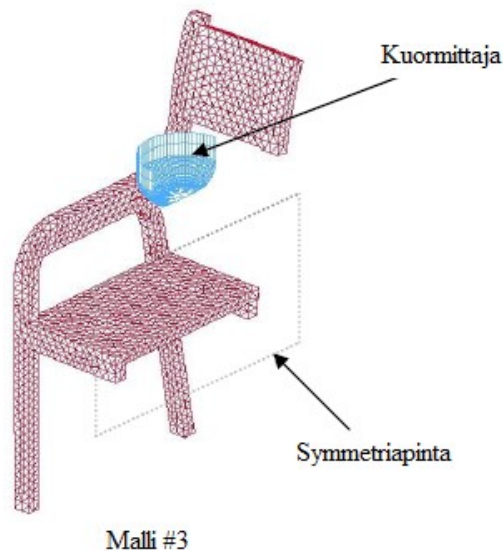


Kuva 16. Lisätty voima dynaamisessa kuormitustapauksessa (Laemlaksul 2008).

Vastaavasti pudotuskokeessa kuormitustilanne on tuolimallille #3 kuvan 17 mukainen. Kuormittaja on pyöreän muotoinen, painoltaan 25 kg ja asetettuna 300 mm:n korkeudelle tuolin istuinosan keskikohdasta. Pudotettaessa kuormittajan nopeudeksi tulee painovoimasta johtuen

$$v = \sqrt{2gh}, \quad (5)$$

missä  $v$  on nopeus,  $g$  on putoamiskiikkyvyys maanpinnan läheisyydessä ja  $h$  on putoamiskorkeus. Koska  $g$ :n arvo on vakio ja se on noin  $9,81 \text{ m/s}^2$  ja  $h$ :n arvo on tunnettu, saadaan nopeudelle arvo  $2,426 \text{ m/s}$  eli  $2426 \text{ mm/s}$ .



Kuva 17. Mallin #3 pudotuskokeen asetelma (Laemlaksul 2008).

Elementtimenetelmää hyödyntävä laskentaohjelma antaa analyysin tulokset sekä taulukko- muodossa että havainnollistavina kuvina. Laemlaksul on käyttänyt tutkimuksessaan tulostettavista kuvista suurimpia syntyneitä paineita ja siirtymiä kuvaavat tulokset. Liitteessä 2

(Laemlaksulin bambutuolin rasisutskokeiden tulokset) olevissa kuvasarjoissa 18, 19, 20, 21, 22 ja 23 kuvaavat syntyneitä paineita ja siirtymiä kaikissa tuoleissa rasisutskokeiden jälkeen. Kuvat 18 ja 19 liittyvät staattiseen rasisutukseen, kuvat 20 ja 21 dynaamiseen rasisutukseen ja 22 ja 23 pudotusrasisutukseen. Värit havainnollistavat suhteellisesti syntyneitä rasisutuksia: punainen kuvaa suurimpia paineita tai siirtymiä ja sininen pienimpiä. Erot tuloksissa johtuvat tuolien osien erilaisista kiinnityksistä. (Laemlaksul 2008.)

Laemlaksulin (2008) bambutuolitutkimus osoittaa, että elementtimenetelmän soveltaminen kalusteteollisuuteen on mahdollista ja tietokoneohjelma tulostaa selkeät tulokset.

Erdinler et al. (2011) toteavat, että elementtimenetelmän käyttö on lisännyt tietokoneavusteisen suunnittelun ja tietokoneavusteisen laskennan vuorovaikutusta ja vastaavasti vähentänyt tuotteiden kokeellista testausta. Tietokoneavusteisesta laskennasta on tullut suunnittelun ja valmistuksen sekä ensimmäinen että viimeinen vaihe. Testausta tarvitaan kuitenkin edelleen muiden ominaisuuksien määrittämisessä. Elementtimenetelmällä saadaan kohtuullisia tuloksia kolmiulotteisesti simuloidun tuotteen muodosta ja lujuudesta, joten parhaat mahdolliset arvot tuotteen muodolle ja lujuudelle on kannattavaa määrittää tietokoneavusteisella laskennalla.

### 3.3.1 Optimointi

Numeerisen analyysin huomattavin etu on tuotteen valmistuksen optimointi, kun valmistettavan tuotteen elementtien ja materiaalien analysointi poistaa epävarmuutta tuotteen kehityksestä. Tässä optimoinnilla tarkoitetaan edellisessä luvussa mainittua kannattavimpien muotojen ja lujuusarvojen määrittämistä. Kun suunnittelu ja laskenta tehdään tietokoneavusteisesti, voidaan myös valmistus toteuttaa tietokoneavusteisesti. Tietokoneavusteinen valmistus (engl. Computer Aided Manufacturing, CAM) optimoi tuotteen valmistusprosessia muun muassa vähentämällä hukkaa ja nopeuttamalla tuotekehitysprosessia. Tietokoneavusteinen suunnittelu, laskenta ja valmistus optimoivat tuotteen kehitystä siten, että mahdolliset virheet mallissa huomataan ja ne voidaan korjata aikaa tuhlaamatta. Tietokonesimulaation avulla tehdyissä havainnoissa säästytään myös mahdollisen prototyypin valmistukselta, joten aikaa ja materiaalikustannuksia säästyy. (Erdinler et al. 2011). Vaikkakin viimeisestä mallista tehdään prosessin lopuksi prototyyppi, jota myös testataan, säästytään luvussa 2.1 mainitulta epälineaariselta etenemiseltä muotoilijan työprosessissa ja ylimääräisten prototyyppien valmistukseen käytettävät materiaalikustannukset säästyvät.

Tietokoneavusteisesti luotu malli syötetään tietokoneavusteiseen valmistusohjelmaan, joka ohjaa CNC-konetta (Computerized Numerical Control), nykyisin voidaan käyttää myös nimeä NC-koneet (Numerical Control). Nämä koneet ohjaavat esimerkiksi laserleikkurin tekniikkaa, ja tuloksena syntyy täysin suunnitellun kaltainen tuote. Usein CNC-koneita käytetään sarjatuotannossa puisten ja metallisten osien, kuten liittimien, valmistuksessa. CNC-koneet takaavat tarkan tuloksen tuotannossa, joten materiaalien hukka on minimaalista (Nieminen 2009).

Erdinler et al. (2011) esittää, että teknologian kehityksen myötä matemaattiset optimointitekniikat yhdessä modernin tuotantotekniikan kanssa ovat nopeasti vakiinnuttamassa asemaansa tekniikan aloilla. Tästä johtuen yritysten tulisi käyttää tietokoneavusteista laskentaa ja valmistusta ja hyödyntää niiden tarjoamaa optimointitekniikkaa pysyäkseen mukana yritysten välisessä kilpailussa. Lavikainen (2005) painottaa myös, että yritysten tulee kehittyä, mikäli haluavat menestyä kilpailussa. Teknologian ja internetin kehitys on tehnyt markkinoista maailmanlaajuisia, joten yritysten on kehitettävä tuotteidensa laatua tai hintaa.

Tuotteen kustannuksia voidaan vähentää nopeuttamalla tuotekehitysprosessia sekä vähentämällä materiaalikustannuksia. Lisääntynyt varmuus tuotteen laadusta edesauttaa tuotteen myyntiä ja minimoi tulevaisuuden uhkia, joten saadaan sekä välittömiä että tulevaisuuden tuottoja. (Lavikainen 2005.) Kun tuotekehitysprosessissa hyödynnetään tietokoneavusteista suunnittelua ja laskentaa sekä valmistusta, saadaan varmuus tuotteen tarkkuudesta ja varmoja arvioita sen laadusta (Scheurer & Stehling 2010). Tämä kandidaatintyö osoittaa, kuinka tietokoneavusteinen suunnittelu ja sitä kautta tietokoneavusteinen laskenta ovat hyviä työkaluja, kun halutaan kehittää tuote nopeammin ja pienemmillä materiaalikustannuksilla.

## 4 Johtopäätöksiä

Tässä kandidaatintyössä tutkittiin tietokoneavusteisen suunnittelun ja laskennan käyttöä kalusteteollisuuden tuotekehityksessä. Teknologian kehityksestä johtuen markkinat ovat nykyisin maailmanlaajuisia, mikä johtaa yritysten välisen kilpailun tiukkenemiseen (Lavikainen 2005). Tietokoneavusteisen suunnittelun ja erityisesti parametrin suunnittelun todettiin toimivan hyvin huonekalujen suunnittelussa, koska se takaa nopeamman tuotekehitysprosessin kahdella tavalla. Nopeuttamalla tuotekehitysprosessia lyhennetään tuotteen tuottamiseen käytettyä aikaa ja tuote saadaan markkinoille aikaisemmin, ja ajan säästäminen toimii mahdollisena etuna yrityksen liiketoiminnassa.

Yksi tapa lyhentää tuotekehitykseen käytettyä aikaa on tietokoneavusteisesti tehdyn mallin muuttamisen nopeus. Käsin tehdyssä luonnoksessa joudutaan usein piirtämään koko malli uudestaan, kun parametrisilla suunnitteluohjelmilla tehty yksittäinen muutos toteuttaa kaikki tarvittavat muutokset koko malliin. Toinen tapa ajanlyhentämiseen on vähentää prototyyppien lukumäärää ja käyttöä, mikä säästää ajan lisäksi myös materiaalikustannuksia.

Laatu ja laadunhallinta ovat tärkeitä suomalaisen muotoilun maineen kannalta (Lavikainen 2005). Huonekaluteollisuudessa laatu tarkoittaa tuotteen kestävyyttä, jonka analyysi on täten tärkeä osa tuotekehitystä. Tietokoneavusteisella laskennalla saadaan varmuus tuotteen käytäytymisestä ja kestävyydestä sekä lyhyt- että pitkäkestoisissa rasituksissa. Edellä mainittuja ominaisuuksia voidaan määrittää myös testaamalla tuotteita kokeellisesti, mikä vaatii tuotteen täydellisen prototyypin valmistamista.

Testaukseen on monia syitä, mutta monien ominaisuuksien koestamista vaaditaan jo laissa. Esimerkiksi tuotteelle on asetettu turvavaatimukset, kuten huonekalun päällyskankaan tulenkestävyyden vaatimukset. Turvavaatimusten mukaan tuote ei saa aiheuttaa vaaraa kuluttajan terveydelle tai omaisuudelle. Myös sisäänostajat vaativat todennusta tuotteiden teknisistä ominaisuuksista, joihin kuuluu lujuuden ja vakavuuden lisäksi pintamateriaalien toiminta käytössä. Huonekalujen kaikki testattavat ominaisuudet on luoteltu taulukossa 1 (Liite 1: Kalusteiden testattavat ominaisuudet). Lujuusominaisuuksien todentaminen onnistuu täydellisesti tietokoneavusteisella laskennalla, mutta turvavaatimusten, ergonomisuuden ja pintamateriaalien kulutuskeston todentaminen on vaikeampaa. Suomessa tehtävissä huonekalujen kokeellisissa testauksissa suoritetaan myös mielipidekyselyjä, joiden tuloksia ei voida selvittää tietokonesimulaation avulla.

Tutkimuksen lopputuloksena havaittiin, että vaikka tietokonesimulaatio on ainoa käytetty mallinnuskeino rakentamisessa, se ei tule syrjäyttämään kokeellista testausta kalusteteollisuudessa. Tietokoneavusteisella suunnittelulla on paljon potentiaalia vaikuttaa huonekalujen tuotekehitykseen ja alan yritysten toimintasuunnitelmiin, kuitenkin tietokoneavusteisen laskennan osuus ei ole yhtä merkittävä. Tietokoneavusteista laskentaa hyödynnetään jo nyt, mutta se ei kata kaikkia testattavia ominaisuuksia, joten prototyypin valmistamiselta testauskäyttöön ja mielipidekyselyihin tuskin vältetään vaikka laskentaohjelmat kehittyisivät tulevaisuudessa.

Tämä tutkimus osoittaa tietokoneavusteisen suunnittelun ja laskennan olevan kannattavaa yrityksille. Tietokoneavusteinen suunnittelu lyhentää tuotekehitysprosessiin käytettyä aikaa, koska mahdolliset muutokset luonnoksiin voidaan tehdä nopeasti ja erilaisia muotovaihtoehtoja voidaan tarkastella helposti. Erilaisten pienoismallien ja mahdollisten prototyyppien tarve vähenee, kun kaikki liitokset ja materiaalit saadaan kuvattua tietokoneohjelmalla luotuun mal-

liin. Tietokoneavusteinen laskenta on tehokas käytäntö laadunhallinnan kannalta. Yritysten välisen kilpailun kannalta aika ja laatu ovat merkittävimpiä tuoton saamiseksi (Lavikainen 2005). Kumpikin tietokoneavusteinen käytäntö vähentää myös materiaalihukkaa tai optimoi eri materiaalien käyttöä ja niiden kustannuksia, mikä on välitön tuotto yritykselle.

Yksi mahdollinen jatkotutkimus rakennetekniikan hyödyntämisessä kalusteteollisuuden tuotekehityksessä on itse tietokoneavusteisten ohjelmien tutkiminen ja kehittäminen. Kuten luvussa 3.2.1 todettiin, nykyiset ohjelmat ovat liian vaikeakäyttöisiä ja niiden käyttäminen vaatii ohjelmoinnin erikoisosaamista, joten tietokoneavusteisten ohjelmien käyttöaste on matala. Olisi mielenkiintoista tutkia käytettävyyden parantamista ja mahdollisesti eri mallinnuspohjien kuten tietomallintamisen (BIM) ja tietokoneavusteisen suunnittelun (CAD) yhdistämistä. Toinen mahdollinen jatkotutkimus liittyy myös käytettävyyteen, mutta sen tutkimuskohteena on huonekalualan opetustoimi. Eli mikä on tällä hetkellä rakennetekniikan opetuksen aste alalla, olisiko sitä mahdollista opettaa enemmän ja millaista opetusta ohjelmien hallinnassa olisi mahdollista toteuttaa.

Tämä kandidaatintyö tutki kattavasti tietokoneavusteisen suunnittelun ja parametrisen suunnittelun ja tietokoneavusteisen laskennan ja numeerisen analyysin käyttöä kalusteteollisuuden tuotekehityksessä yhdistäen ne nykyisiin käytäntöihin.

## Lähteet

Eastman, C. 2006. *IFC Overview*. Georgia Tech julkaisu. 8 s.

Erdinler, E. S. & Kizilkaya, K. & Koç, K. H. & Korkut, D. S. 2011. *The use of finite element method in furniture industry*. African journal of business management. Vol. 5:3. S. 855–865. ISSN 1993-8233.

Fuh, J. Y. H. & Li, W. D. & Lu, W. F. & Wong, Y. S. 2005. *Collaborative computer-aided design – research and development status*. Computer Aided Design. Vol. 37. S. 931–940. ISSN 0010-4485.

Haapalainen, P. & Lindman, M. 2011. *Kokeellisen tuotekehityksen soveltuvuus huonekalualalle*. Vaasan yliopiston julkaisu. 61 s.

Hubers, J. C. 2010. *IFC based BIM or parametric design?* Julkaisu. Nottinghamin yliopisto. 6 s.

Joki-Korpela, R. 2001. *Tietokoneavusteinen suunnittelu / AutoCAD*. Seminaarijulkaisu. Joensuu yliopisto, tietojenkäsittelytieteen laitos.

Laemlaksul, V. 2008. *Innovative Design of Laminated Bamboo Furniture Using Finite Element Method*. International Journal of Mathematics and Computers in Simulation. Vol. 2:3. S. 274–284.

Lavikainen, P. 2005. *Teknisten tuoteominaisuuksien todentaminen suomalaisessa huonekaluteollisuudessa*. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, tuotantotalouden osasto. Lahti. 79 s.

Monedero, J. 2000. *Parametric design: a review and some experiences*. Automation in Construction. Vol. 9:4. S. 369–377. DOI 10.1016/S0926-5805(99)00020-5. ISSN 0926-5805.

Nieminen, A. 2009. *Moduulisohvan suunnittelu ja toteuttaminen*. Opinnäytetyö. Lahden ammattikorkeakoulu, puutekniikan osasto. Lahti. 64 s.

Scheurer, F. & Stehling, H. 2010. *Lost in parameter space?* Architectural Design. Special Issue: Mathematics of Space. Vol. 81:4. S. 70–79. DOI 10.1002/ad.1271. ISBN 9780470689806.

## Standardit

EN 1995 Eurokoodi 5: Puurakenteiden suunnittelu

SFS 4369. 1987. Huonekalut ja kalusteet. Tuolit. Lujuuden määrittäminen. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 5 s.

SFS 4969. 1983. Asunnon kiintokalusteet, toiminnalliset ominaisuudet, testausmenetelmät ja vaatimukset. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 6 s.

## www-sivustot

Flying House Project. [Viitattu 9.4.2014]. Saatavissa:  
<http://flyinghouseproject.blogspot.fi/2013/01/flying-cars-lead-to-flying-houses.html>

Ideal PLM. [Viitattu 5.4.2014]. Saatavissa: <http://www.ideal.fi/fi>

Ikea. Demokraattinen suunnittelu. [Viitattu 21.2.2014]. Saatavissa:  
[http://www.ikea.com/ms/fi\\_FI/this-is-ikea/democratic-design/index.html?icid=fi%3Eic%3Efooter%3Ekonserni%3Edemocratic\\_design](http://www.ikea.com/ms/fi_FI/this-is-ikea/democratic-design/index.html?icid=fi%3Eic%3Efooter%3Ekonserni%3Edemocratic_design)

Lahden ammattikorkeakoulu. Huonekalutestaus. [Viitattu 21.2.2014]. Saatavissa:  
<http://www.lamk.fi/tekniikka/palvelut/testauspalvelut/huonekalutestaus/Sivut/default.aspx>

Opetusvirasto. Huonekaluteollisuus. Testattavat ominaisuudet. [Viitattu 1.3.2014]. Saatavissa:  
<http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/puutuoteteollisuus/huonekaluteollisuus/valmistus/>

Tilastokeskus. Pk-yritykset. [Viitattu 15.2.2014]. Saatavissa:  
[http://www.stat.fi/meta/kas/pienet\\_ja\\_keski.html](http://www.stat.fi/meta/kas/pienet_ja_keski.html)

World of Archi. [Viitattu 9.4.2014]. Saatavissa:  
<http://www.worldofarchi.com/2013/03/modern-architecture-by-zaha-hadid.html>

## Kuvien lähteet

Kuva 5. Sähköhammasharja vuodelta 1961. [Viitattu 14.3.2014]. Saatavissa:  
<http://elisabagein2010.blogspot.fi/2010/10/research.html>

Kuva 6. Sähköhammasharja vuodelta 2014. [Viitattu 14.3.2014]. Saatavissa:  
<http://www.upgrademag.com/web/worlds-first-smart-toothbrush-unveiled-ces-2014/>

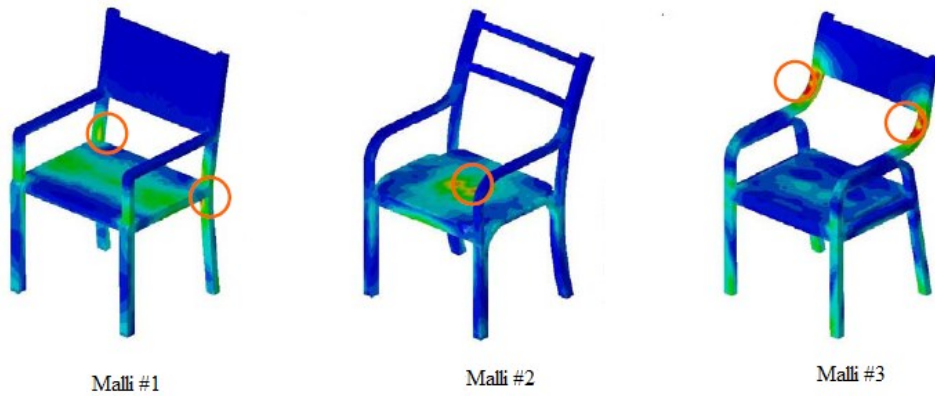
## Liite 1. Kalusteiden testattavat ominaisuudet

Kalusteiden testaus	
	Testattava ominaisuus
Huonekalujen pinnat	Nesteiden kestävyys Tahraavien aineiden kestävyys Valon ja ilmaston kestävyys Ilmaston muutosten kestävyys Mekaanisten vahinkojen kestävyys Lämmön kestävyys
Hyllystöt ja kaapit	<b>Lujuus</b> Rungon lujuus <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kuorman kantokyky</li> <li>• Laatikon lujuus</li> <li>• Ovien, laskulaudan ja helojen lujuus</li> </ul> <b>Vakavuus</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vakavuus hyllystöä kuormitettaessa</li> <li>• Vakavuus laatikoita kuormitettaessa</li> <li>• Vakavuus ovia kuormitettaessa</li> <li>• Vakavuus lastulevyjä kuormitettaessa</li> </ul> <b>Rungon jäykkyys</b>
Vuoteet	<b>Lujuus</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vuoteen pohjan lujuus</li> <li>• Rungon päädyn ja jalkojen lujuus</li> <li>• Rungon kuorman kantokyky</li> </ul> <b>Vakavuus</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vakavuus päätä kuormitettaessa</li> <li>• Vakavuus sivuilta kuormitettaessa</li> </ul> Vuoteen kestävyys Vuoteen mukavuus <ul style="list-style-type: none"> <li>• Jousto-ominaisuudet</li> <li>• Lämpö ja kosteus</li> </ul>
Istuimet	<b>Lujuus</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rungon lujuus ja tuolit</li> <li>• Rungon lujuus, nojatuolit ja istuimet</li> </ul> <b>Vakavuus</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vakavuus kuormitettaessa istuimia</li> <li>• Vakavuus kuormitettaessa selkänojaa</li> <li>• Vakavuus kuormitettaessa käsinojaa</li> </ul> Istuinten kestävyys Mukavuus Jousto-ominaisuudet Lämpö ja kosteus

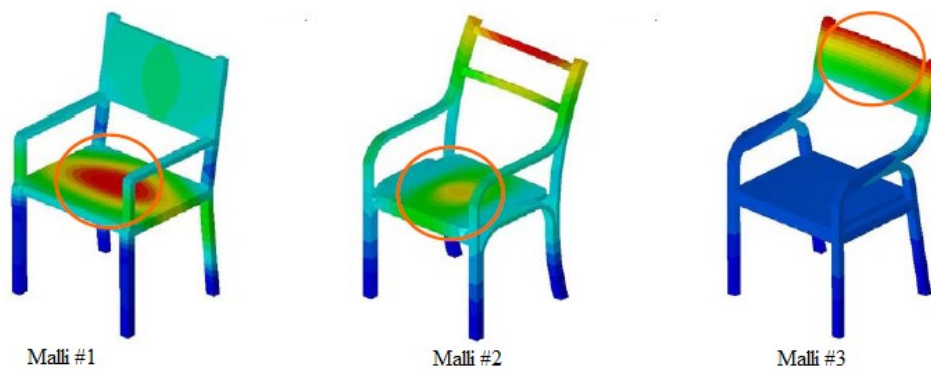


Pöydät	Lujuus
	<ul style="list-style-type: none"><li>• Rungon lujuus</li></ul>
	Kuorman kestävyys
	Vakavuus kuormitettaessa pöytälevyä
	Jäykkyys
<ul style="list-style-type: none"><li>• Jäykkyys kuormitettaessa pöytälevyä</li><li>• Jäykkyys sivulta kuormitettuna</li></ul>	

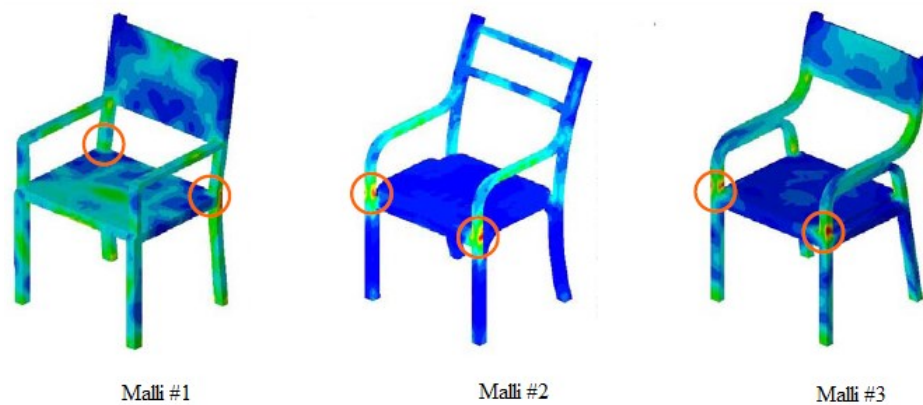
## Liite 2. Laemlaksulin bambutuolin rasituskokeiden tulokset



Kuva 18. Staattisen rasituksen aiheuttamat paineet (Laemlaksul 2008).



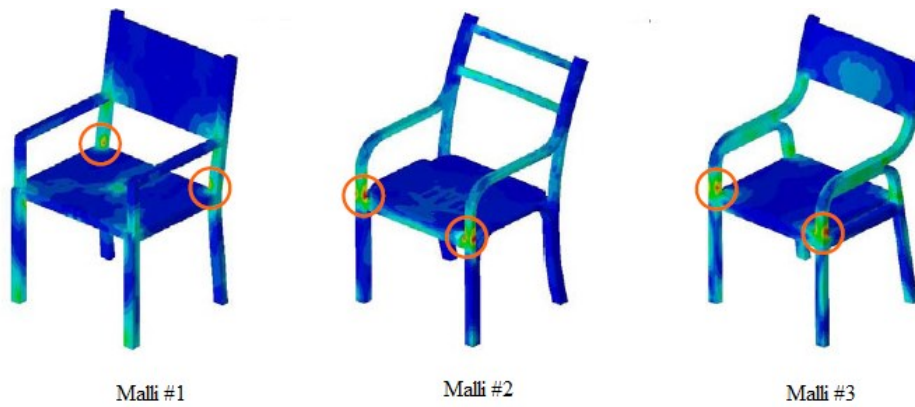
Kuva 19. Staattisen rasituksen aiheuttamat siirtymät (Laemlaksul 2008).



Kuva 20. Dynaamisen rasituksen aiheuttamat paineet (Laemlaksul 2008).



Kuva 21. Dynaamisen rasituksen aiheuttamat siirtymät (Laemlaksul 2008).



Kuva 22. Pudotusrasituksen aiheuttamat paineet (Laemlaksul 2008).



Kuva 23. Pudotusrasituksen aiheuttamat siirtymät (Laemlaksul 2008).