TEKNILLINEN KORKEAKOULU Insinööritieteiden ja arkkitehtuurin tiedekunta Koneenrakennustekniikan laitos

Sampsa Vili Antero Laakso

# Lastuavan työstön elementtimallintaminen –

# sovellukset ja käyttö

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoo 31.8.2009

Työn valvoja:

Professori Esko Niemi

Työn ohjaaja: Professori Esko Niemi

## TEKNILLINEN KORKEAKOULU

#### Diplomityön tiivistelmä

Tekijä: Työn nimi:	Sampsa Vili Antero Laakso Lastuavan työstön elementtimallintaminen – sovellukset ja käyttö	Sivumäärä
Päivämäärä:	31.8.2009	130
Tiedekunta: Laitos: Professuuri:	Insinööritieteiden ja arkkitehtuurin tiedekunta Koneenrakennustekniikan laitos Kon-15 Tuotantotekniikka	
Työn valvoja:	Professori Esko Niemi	
Työn ohjaaja:	Professori Esko Niemi	

Tässä diplomityössä käsitellään lastuavan työstön elementtimallintamista teollisuuden käyttötarpeiden kannalta. Teollisuudessa lastuava työstö on kallista, joten sen prosessiparametrien valinta on erittäin tärkeää tuotannon tehokkuuden kannalta. Oikeiden prosessiparametrien arvojen valinta vaatii prosessin tuntemista, joka saavutetaan nykyisin empiirisin keinoin. Lastuamiskokeet ovat kalliita, joten on mielekästä käyttää vaihtoehtoista keinoa tutkia prosessia, kuten simulointia.

Työssä esitellään tyypilliset lastuamismenetelmät - sorvaaminen, jyrsintä ja poraaminen elementtimenetelmän, kontinuumimekaniikan ja ratkaisumenetelmien perusteet ja muiden tutkijoiden julkaisuja aiheesta. Julkaisuosuudessa tutkimukset on jaoteltu lastuamisvoimia ja lämpötilaa tarkasteleviin tutkimuksiin, kitkaa ja kulumista tarkasteleviin, jäännösjännityksiä tarkasteleviin sekä materiaalimalleja tarkasteleviin tutkimuksiin.

Työn varsinainen tutkimusosuus käsittelee kahden kaupallisen lastuavan työstön simulointiin tarkoitetun ohjelmiston käytettävyyttä ja tarkkuutta. Tutkitut ohjelmistot ovat Advant Edge ja Deform. Työssä tehdään kolme simulaatiosarjaa, joiden tulokset varmennetaan lastuamiskokein. Simulaatiosarjat ovat sorvaamista, poraamista ja jäännösjännityksiä tarkastelevia kokeita.

Simulaatiotulosten ja koearvojen todetaan olevan kohtuullisen hyvässä konsensuksessa, vaikka simulaatiotulosten tarkkuudessa olisikin parannettavaa. Tuloksia voidaan parantaa käyttämällä simulointia ja lastuamiskokeita yhdessä, jolloin simulaatiot voidaan kalibroida lastuamiskokein. Todetaan, että tulevaisuuden kehitys niin laskennan, mallinnuksen kuin tietotekniikan osalta tulee nostamaan menetelmän tarkkuuden uudelle tasolle, jolloin lastuamiskokeita tarvitsee tehdä enää hyvin vähän, jos ollenkaan. On tärkeää että Suomen teollisuus panostaa menetelmän tutkimukseen ja soveltamiseen, sillä tulevaisuuden tehokkuusvaatimukset tulevat olemaan jatkuvasti suurempia, jolloin oma osaaminen prosessien optimoinnissa on erittäin suuri kilpailuetu.

Avainsanat: FEM, elementtimenetelmä, simulointi, Advant Edge, Deform, lastuaminen, sorvi, sorvaaminen, jyrsintä, poraaminen, jäännösjännitykset, tuotantotekniikka, materiaalimalli HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Abstract of Master's Thesis

Author: Title of the Thesis: Date:	Sampsa Vili Antero Laakso Finite Element Modeling of Cutting – applications and usability 31 August 2009	Number of pages: 130
Faculty: Department: Professorship:	Faculty of Engineering and Architecture Department of Engineering Design and Production Kon-15 Production Technology	
Supervisor:	Professor Esko Niemi	
Instructor:	Professor Esko Niemi	

In this Master's thesis finite element modeling of cutting processes is dealt with from the point of view of the demands of industry. In industrial production cutting processes involve high costs, which makes the choice of the right values for process parameters extremely important. The choice of the right process parameters requires thorough knowledge of the process, which is at present achieved mostly with empirical means. The cutting experiments are expensive, which increases the need for alternative methods to study the process, such as simulation.

In this study the typical cutting methods are presented briefly: turning, milling and drilling. In addition, the basics of the finite element method, continuum mechanics and numerical solution methods and other researchers' publications of the subject are presented in the research review. The studies have been divided into four parts: cutting forces and temperature, friction and tool wearing, residual stresses and material models.

The actual research section of this study deals with the usability and ability to predict the true values for the cutting phenomenon of two commercial cutting simulation software. The examined software are Advant Edge and Deform. In this research three simulation series of cutting experiments were made to verify the results. The simulation series were turning experiments, drilling experiments and tests examining residual stresses.

It was observed that the simulation results were moderately well congruent with the test values, but the accuracy of the simulation results could still worked on . The results can be improved by using the simulation and cutting experiments together, in which case the simulations are calibrated with cutting tests. It was observed that the development of calculation, modeling and information technology will improve the accuracy of the method to a level were only few cutting tests will have to be performed. It is vital that the Finnish industry invests in researching and adapting the method, because the demands for efficiency will be ever higher in the future, and self-supported know-how in the optimization of the processes will be a big competitive advantage.

Keywords: FEM, Finite Element Method, Simulation, Advant Edge, Deform, Cutting, Lathe, Milling, Grinding, Drilling, Residual Stresses, Production Technology, Material Model

# Sisällysluettelo:

S	ymboliluettelo:	6
E	sipuhe	10
1	Johdanto	11
	<ol> <li>Lastuamisen mallintamisen käyttökohteet</li> <li>Lastuamisen mallintamisen tutkimus</li> <li>Mallintaminen teollisuudessa</li> <li>Lastuamisen simulointisovelluksia</li> </ol>	12 12 13 13
2	Lastuaminen ja elementtimallintaminen	15
	<ul> <li>2.1 Lastuaminen</li></ul>	15 16 18 19 20 24 24 24 27 34 35 37 37 37 39
3	Lastuamisen mallinnuksen tutkimus	41
	<ul> <li>3.1 Lastuamisvoimat ja lämpötila</li> <li>3.2 Kitka ja kuluminen</li> <li>3.3 Jäännösjännitykset</li> <li>3.4 Materiaalimallit</li> </ul>	42 47 57 65
4	Kaupalliset lastuamisen simulointisovellutukset	
	<ul> <li>4.1 Advant Edge</li> <li>4.2 Deform</li> <li>4.3 Muut</li> </ul>	78 78 79
5	Lastuamissovellusten käyttö	80
	<ul><li>5.1 Advant Edge</li><li>5.2 Deform</li></ul>	81 84
6	Simulaatiot ja verifiointikokeet	87
	<ul> <li>6.1 Simulaatiot</li></ul>	
	0.2.5 Jaannosjannityssinnalaationaan tuiokset	

(	5.3 La	astuamiskokeet ja menetelmät	96
	6.3.1	Sorvauskokeet	96
	6.3.2	Voimanmittauslaitteiston ja lämpökameran kalibrointi	98
	6.3.3	Porauskokeet	99
	6.3.4	Jäännösjännityskokeet	100
(	6.4 K	okeiden tulokset	102
	6.4.1	Sorvauskokeiden tulokset	102
	6.4.2	Porauskokeiden tulokset	105
	6.4.3	Jäännösjännitysmittausten tulokset	107
(	6.5 Tu	ılosten vastaavuus	110
	6.5.1	Lastuamisvoimat	111
	6.5.2	Lastuamislämpötila	113
	6.5.3	Lastunmuoto	115
	6.5.4	Jäännösjännitykset	118
7	Luotet	tavuusanalyysi	119
8	Johtop	äätökset ja suositukset	122
9	Yhteer	iveto	124
Lähdeluettelo12		125	

# Symboliluettelo:

Symboli	Selite	
Sorvaaminen		
$F_{\mathrm{x}}$	Radiaalivoima	
$F_{y}, F_{c}$	Tangentiaalivoima, Päälastuamisvoima	
Fz	Syöttövoima	
b	Lastun leveys	
h	Lastun paksuus	
<i>k</i> <sub>c1.1</sub>	Ominaislastuamisvakio	
m	Lastunpaksuuden eksponentti	
Jyrsintä		
D	Työkalun halkaisija	
$f_{z}$	Hammassyöttö	
$a_{ m p}$	Lastuamissyvyys	
$h_1$	Lastuamispaksuus	
b	Lastun leveys	
κ	Teräkulma	
$v_{ m f}$	Syöttönopeus	
v <sub>c</sub>	Lastuamisnopeus	
$k_c$	Ominaislastuamisvoima	
e	Kontaktissa olevien hampaiden luku-	
	määrä	
Poraaminen		
Kr	Pääleikkuusärmän kulma	
D	Porattavan reiän halkaisija	

2	1 of avera ( and 1 of avera investigation of a
Fz	Syöttövoima
arOmega	Pyörimisnopeus
f	Syöttö
d	Alkureiän halkaisija
<i>n</i> , <i>m</i>	Ominaislastuamisvoimien muutospo-
	tensseja

Elementtimenetelmä

σ	Jännitykset (skalaari, vektori tai matrii-
	si)
$\widetilde{ abla}$	Differentiaalioperaattori
$\widetilde{ abla}^{_{T}}$	Differentiaalioperaattorin transpoosi
b	Voimat (skalaari, vektori tai matriisi)
ν, <i>δ</i> u	Satunnaisvektori, virtuaalinen siirtymä
t	Traktio
u	Siirtymät kappalekoordinaatistossa
a	Elementtikohtaiset siirtymät
Ν	Muotofunktiot
c	Satunnaismatriisi
$\xi,\eta,\zeta$	Elementtikoordinaatiston kantavektorit
В	Muotofunktioiden differentiaalin ly-
	henne
D	Konstitutiivinen matriisi
$S_h$ , $S_g$	Reunat
Κ	Jäykkyysmatriisi
$\mathbf{f}_{b}$	Reunavektori
$\mathbf{f}_1$	Kuormavektori
$\mathbf{f}_0$	Alkuvenymävektori
Kontinuumimekaniikka	
$\Omega_{_0}$	Kappaleen tila alussa
Ω	Kappaleen tila tarkasteluhetkellä
n <sub>sD</sub>	Systeemin dimensiot
SD	Malliavaruuden dimensiot
$\mathbf{e}_i$	Karteesisen koordinaatiston yksikkö-
	vektorit
X	Eulerin paikkakoordinaatti
X	Lagrangen paikkakoordinaatti
t	Aika
v	Nopeus

Α	Kiihtyvyys
$Dx = \frac{\delta v}{\delta x} = v_{,x}$	Osittaisderivaatta x muuttujan suhteen
$\mathbf{F}, \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{X}}$	Muodonmuutosgradientti
ρ	Tiheys
$\mathbf{w}^{\mathrm{int}}$	Sisäenergia
J	Jacobian matriisi
Р	Nimellisjännitys
q	Lämpövuo
ε	Venymä, muodonmuutos
æ	Venymänopeus, Muodonmuutosnopeus
Ε	Kimmokerroin
$\delta W, \delta W^{ ext{ int }}, \delta W^{ ext{ ext }}, \delta W^{ ext{ kijn }}$	Virtuaalinen työ, Sisäinen, Ulkoinen ja
	Kineettinen virtuaalinen työ
<b>f</b> <sup>int</sup>	Sisäiset voimat
$\mathbf{f}^{ext}$	Ulkoiset voimat
$\mathbf{f}^{kin}$	Massan hitausvoimat
Μ	Massamatriisi
$\mathbf{L}_{e}$	Kytkentämatriisi
$\delta P, \delta P^{ ext{int}}, \delta P^{ ext{ext}}, \delta P^{ ext{kin}}$	Virtuaalinen teho, Sisäinen, Ulkoinen ja
	Kineettinen Virtuaalinen teho
$\mathbf{f}_{e}^{tran}$	Siirtosolmuvoimat
$\Delta t^n$	Aika-askel
$eta$ , $\gamma$	Newmarkin yhtälöissä esiintyvät ker-
	toimet
r	Residuaalimatriisi
Julkaisujen merkintöjä	
Т	Terän kestoaika
V	Lastuamisnopeus
n ja C	Taylorin kulumisvakioita
$\frac{dW}{dL}$	Kulumistilavuus lastuamismatkan suh-

	teen
$\sigma_{t}$	Normaalijännitys
heta	Lastun pintalämpötila
$C_1$ ja $C_2$	Vakioita Usuin mallissa
$\frac{\partial w}{\partial t}$	Kulumistilavuus lastuamisajan suhteen
D	Materiaalivakio Takeyama-Muratan
	kulumisyhtälössä
Ε	Aktivaatioenergia
R	Kaasuvakio (Avogadron luvun ja
	Boltzmannin luvun tulo)
Т	Lokaali lämpötila Kelvineissä
${ au}_{\it fric}$	Kitkan aiheuttama leikkausjännitys
μ	Kitkakerroin
$\sigma_{_n}$	Normaalijännitys
$\overline{\sigma}$	Muodonmuutoslujuus
$A_r$	Todellinen kontaktipinta
$A_n$	Nimellinen kontaktipinta
В	Kitkapinta vakio
<b>∂</b> <sup>p</sup>	Plastinen muodonmuutosnopeus
$\phi$	Liukutason kulma
λ	Kitkakulma
γ	Rintakulma
1/ <i>n</i>	Muokkauslujittuvuuseksponentti
Lyhenteet	
CNC	Computerized Numerical Control
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
FEM	Finite Element Method
JC	Johnson-Cook
ALE	Arbitrary Lagrangian Eulerian

# Esipuhe

Diplomityö on teekkarin ensimmäinen tosikoetus ja viimeinen akateeminen saavutus ennen työelämään tai jatko-opintoihin siirtymistä. Jotkut kertovat diplomityön olleen helppo nakki, toisaalla kuulee työn olleen ylivoimaista puurtamista. Diplomityön tekeminen luultavasti kuvastaa henkilöä enemmän kuin yleensä ajatellaan. Toiset voivat huoletta tehdä juuri vaatimukset täyttävän työn, kun toiset eivät suostu palauttamaan työtä ennen kuin ovat varmoja, että pieninkin asia työssä on täydellinen. Monetko ajattelevat diplomityön kertovan heistä itsestään?

Minulle työn tekeminen on ollut haastavaa, hauskaa, joskus äärimmäisen tuskastuttavaa, mutta lopulta erittäin antoisaa. Kulunut vuosi on ollut erityisesti oppimiskokemus. Yliopisto on ollut elämäni ensimmäinen koulu, jossa olen viihtynyt ja opiskelumotivaationi on ollut korkealla. Tästäkin syystä pyrin tekemään päättötyöni parhaan kykyni mukaisesti. Toivon että työ kuvastaa minua itseäni ja että työstä saa kuvan omistautuneesta kirjoittajasta. Hauskoja lukuhetkiä.

Nyt on aika konjakin...

Kiitokset Professori Esko Niemelle, Teknologiateollisuus ry:lle, johtaja Ilkka Niemelälle, Professori Hannu Hänniselle, Professori Antti Korhoselle, DI Timo Manniselle käyttöinsinööri Janne Peuraniemelle, laboratoriomestareille Seppo Nurmelle ja Ari Riihimäelle, sekä tutkimusapulainen Petri Ritamäelle.

Espoossa 31.8.2009

Sampsa Vili Antero Laakso

# 1 Johdanto

Tuotantotekniikan tutkimus keskittyy tuotannon tehostamiseen kehittämällä teknologiaa teollisuuden tarpeisiin. Suomessa teollisuus koostuu pääosin pienistä ja keskisuurista yrityksistä, joten tutkimuskapasiteetti on yliopistojen, korkeakoulujen ja tutkimusinstituuttien varassa. Tutkimustulosten saattaminen teollisuuden tietoon on tärkeää Suomen teollisuuden kilpailukyvyn parantamiseksi, erityisesti tulevaisuuden markkinoilla, joilla pienten maiden tuotantokapasiteetilla ei kilpailla halpatuotantomaiden kanssa, vaan osaaminen ja laatu ovat ainoat kilpailuedut. Suomen teollisuudesta suuri osa on metalliteollisuutta, jossa lastuavan työstön osuus kaikesta tuotannosta on merkittävä. Kustannustehokkaan tuotannon kannalta lastuavan työstön merkitys on sitäkin suurempi, sillä lastuavaan työstöön liittyvät kustannukset ovat korkeat. Näiden kustannusten minimoimiseksi lastuamistapahtuman on oltava optimaalinen. Terän kuluminen, tuotannon henkilöstö, tilavuokrat ja työstökone ovat kustannuksia aiheuttavia tekijöitä. Kokonaiskustannuksia voidaan alentaa vaikuttamalla niitä aiheuttaviin tekijöihin tai kasvattamalla tuotantonopeutta. Näiden saattaminen kustannustehokkuuden kannalta optimaaliseen tasapainoon vaatii osaltaan lastuavan työstötapahtuman tuntemusta. Suuria sarjoja tuotettaessa on mahdollista tehdä lastuamiskokeita valittaessa optimaalisia lastuamisparametreja, mutta nykyään kustannustehokkuusvaatimukset pätevät enenevissä määrin myös pieniä sarjoja valmistettaessa. Kalliiden lastuamiskokeiden hintaa ei voida jakaa tuotteiden hintaan kun tuotantomäärät ovat pieniä. Tällöin lastuamisparametrit on selvitettävä muilla keinoilla, joista yksi on elementtimallintaminen. Tämä diplomityö käsittelee lastuavan työstön mallintamista elementtimenetelmällä ja sen soveltamista sekä soveltuvuutta teollisuuden käyttöön. Teknologiateollisuus ry:n rahoittaman työn tarkoituksena on selvittää lastuavan työstön elementtimallintamisen soveltuvuus teollisuuden tarpeisiin. Työssä tutkitaan kahden kaupallisen mallinnusohjelmiston suoriutumista laadittujen lastuamisongelmien ratkaisijana ja arvioidaan ohjelmien käytettävyyttä ja sovelluskohteita, sekä suositellaan toimenpiteitä Suomen teollisuudelle tämän teknologian hyödyntämiseksi.

## 1.1 Lastuamisen mallintamisen käyttökohteet

Lastuamisen elementtimallintamisen tyypilliset tutkimuskohteet ovat lastuamisvoimat, lastuamislämpötilat, lastun ja terän välinen kitka, terän kuluminen, lastuttavaan kappaleeseen jäävät jäännösjännitykset, lastunmuoto ja materiaalien mallintaminen. Näiden tietojen hyödyntäminen on edellytys tehokkaan tuotannon saavuttamiseksi. Teollisuudessa menetelmätekniikka jää usein toissijaiseksi huolenaiheeksi. Näin syntyy tilanteita, joissa hankitaan väärät lastuavat työkalut, käytetään tehottomia lastuamisparametreja tai tuotteen laatu ei ole haluttu. Kaikkeen tähän puuttumalla tuotannon tehokkuus, laatu ja yleinen mielekkyys voidaan saada tasolle, joka on niin asiakkaan kuin yrityksen kannalta edullinen. Elementtimenetelmä itsessään on vanha tekniikka, vuonna 1943 tunnettu matemaatikko Courant käytti menetelmää julkaisussaan, mutta vasta viisikymmentäluvulla lentoteollisuus otti menetelmän käyttöön. Tuosta lähtien elementtimenetelmää on tutkittu matemaattisena menetelmänä, mutta lastuavan työstön simuloinnin tutkimus keskittyy itse lastuamismallin kehittämiseen eikä niinkään elementtimenetelmän tutkimukseen, erityisesti parempien materiaalimallien kehittäminen on vilkasta.

# 1.2 Lastuamisen mallintamisen tutkimus

Lastuamista on tutkittu jo teollistumisen aikakaudesta lähtien. Kokeellisia malleja ja lastuamistapahtuman mekaniikkaan liittyviin oletuksiin perustuvia analyyttisiä malleja sekä näitä yhdessä on luotu nykypäivään saakka. Kylmä fakta on, ettei yleispätevää mallia olla onnistuttu luomaan edelleenkään. Lastuamistapahtuma on monimutkainen, materiaaliominaisuuksista vahvasti riippuvainen ongelma. Erityisen hankalaksi lastuamisen tekee se, että siinä esiintyy niin virtausmekaniikan, murtumismekaniikan, kuin termodynamiikan ongelmia. Uusimmat ja tähän mennessä lupaavimmat mallit ovat numeerisesti ratkaistavia, yleispäteviin materiaalimalleihin perustuvia ratkaisijoita. Elementtimenetelmä on numeerinen ratkaisija, jolla voidaan laskea lastuamisongelmasta syntyviä ajasta riippuvia kytkettyjä epälineaarisia osittaisdifferentiaaliyhtälöitä. Tällaisella mallilla simuloitaessa ei tarvitse tehdä yksinkertaistavia oletuksia lastuamistapahtumasta, jolloin päästään huomattavasti suurempiin tarkkuuksiin kuin perinteisillä analyyttisillä malleilla. Elementtimenetelmällä simuloitaessa lastuamistapahtuma on mallinnettu kokonaisuudessaan, jolloin mallista saadaan tietoa lämpötiloista, lastunmuodosta, jänni-

tyksistä ja voimista. Lisäksi kaikki johdannaisilmiöiden suuruudet on selvitettävissä. Tämä työ aloittaa lastuavan työstön elementtimallinnuksen tutkimusprojektin Suomessa, tarkoituksena kartoittaa millaisia jatkotutkimuksia projektiin tulee sisällyttää ja tuottaa tietoa menetelmän nykytilasta teollisuuden käyttötarpeita silmälläpitäen.

## 1.3 Mallintaminen teollisuudessa

Teollisuudessa elementtimallintamisen tuomat hyödyt ovat ilmiselvät. Kustannustehokkaampi tuotanto, kehittyneet menetelmät ja hyvä laatu ovat kaikki mahdollisia saavuttaa puuttumalla tuotannon ongelmiin tai heikkouksiin. Vaikka Suomen teollisuuden tyypillisesti pienehköt sarjat ja vaatimattomat tutkimusresurssit eivät ole otollisin maaperä luoda pohjaa laajamittaiselle elementtimallintamisen hyödyntämiselle, voidaan menetelmää hyödyntää yhteistyön avulla. Yhdysvalloissa tutkimus tehdään yhteistyönä tutkimusinstanssien kanssa, jolloin yksittäisten yritysten panos jää pienemmäksi, joten myös pienemmät yritykset voivat nauttia menetelmän tuomista hyödyistä. Yhdysvalloissa menetelmää käytetään laajalti erityisesti lento- ja sotateollisuudessa. Myös lastuavan työstön työkaluja valmistavat yritykset käyttävät menetelmää uusien työkalujen suunnittelussa. Tämän työn tavoitteena on tuoda Suomen teollisuusyrityksille tietoa lastuamisen elementtimallintamisesta, jotta yritykset tiedostavat milloin menetelmää voidaan hyödyntää ja millaisia hyötyjä voidaan saavuttaa.

## 1.4 Lastuamisen simulointisovelluksia

Elementtiratkaisijoita on kymmeniä, ellei satoja. Usein ratkaisija on integroitu CAD-ohjelmistoon lisämoduuliksi. Toisaalta on paljon yleisratkaisijoita, joihin käyttäjä voi rakentaa haluamansa ongelman ja ratkaista sen. Yleisratkaisijoiden ja integroitujen ratkaisijoiden ongelma on niiden rajattu ongelmanratkaisukyky. Yleensä on määritelty tietty joukko erityyppisiä ongelmia; mekaniikan ongelmat, virtausmekaaniset ongelmat, lämmönjohtumisongelmat, sähkö- ja magneettikenttiin liittyvät ongelmat sekä muut tyypilliset insinööri-, tai tutkimustyöhön liittyvät fysikaaliset ongelmat. Lastuavan työstön mallintamisessa vaikeutena on ongelman laajuus. Yhden alan ratkaisija ei riitä lastuavan työstön mallintamiseksi, joten tutkijat ovat joutuneet rakentamaan kokonaan omia ratkaisijoita, muokkaamaan valmiita yleisratkaisijoita tai tekemään yksinkertaistettuja malleja ohjelmiston ehdoilla. Lastuavan työstön tutkimuksen myötä on kehittynyt kuitenkin kaksi lastuavaan työstöön erikoistunutta kaupallista elementtiratkaisijaa, Third Wave Systemsin Advant Edge ja Parametric Forming Technologiesin Deform. Tässä työssä keskitytään näiden ohjelmistojen tutkimiseen.

# 2 Lastuaminen ja elementtimallintaminen

Tässä luvussa käsitellään lastuavan työstön sekä elementtimenetelmän pääperiaatteet. Lastuamisesta esitellään kolme yleisintä työstömenetelmää sekä niihin liittyvät analyyttiset mallit. Elementtimenetelmän osalta käydään läpi muutama yksinkertainen elementtimalli, joiden avulla saadaan kuva elementtimenetelmän ratkaisurutiineista.

# 2.1 Lastuaminen

Lastuaminen on materiaalin irrottamista työkappaleesta kiilamaisella terällä. Lastuava työstö voi olla joko kohtisuoraa leikkaamista, viistoa leikkaamista, tai näiden välimaastossa. Kuva 1 esittää eri leikkausmalleja. Kohtisuoraa leikkautumista tapahtuu, kun teräsärmä on kohtisuorassa terän liikesuunnan kanssa. Osittain kohtisuora leikkaaminen tarkoittaa sitä, että osa teräsärmästä on kohtisuorassa terän liikesuunnan kanssa. [1, s. 75-]



Kuva 1. Kohtisuora ja viisto leikkaaminen, (a, b) kohtisuora leikkaaminen, (c) viisto leikkaaminen, (d) osittain kohtisuora leikkaaminen [2]

Lastuamissovelluksia ovat esimerkiksi sorvaaminen, jyrsintä ja poraaminen. Tässä työssä keskitytään vain näiden menetelmien esittelyyn, niiden ollessa tärkeimmät tarkasteltaessa lastuamisen mallintamista. Lastuava työstö on laajimmin käytetty konepajateollisuudessa esiintyvä työstömenetelmä. Eri tarkoituksiin suunniteltuja lastuavaa työstöä tekeviä työstökoneita on monia, joista tyypillisimmät ovat sorvi, jyrsinkone ja porakone. Kaikista mainitusta työstökoneista on käytössä niin manuaalisia kuin CNC-, eli tietokoneohjattuja (Computerized Numerical Control) koneitakin. Lastuamisen mallintamisen ymmärtämiseksi ei ole tarpeen tuntea kaikkia eri lastuamismenetelmiä, vaan ymmärtää lastunmuodostukseen vaikuttuvat tyypilliset ilmiöt liittyen kuhunkin lastuamismenetelmään. [3]

# 2.1.1 Sorvaaminen

Sorvaaminen tyypillisesti kuvaillaan lastuamisena, jossa työkappale liikkuu ja terä pysyy paikallaan. Työkappale on kiinnitetty kiinnitysistukalla karaan, joka pyörii akselinsa ympäri. Tämä on sorvin päälastuamisliike. Pitkät työkappaleet voidaan tukea kärkipylkällä. Terä on kiinnitetty teränpitimeen, joka sijaitsee teräkelkassa. Teräkelkka liikkuu johteilla karan pyörimisliikettä vastaa kohtisuorasti, tätä kutsutaan syöttöliikkeeksi. Kuva 2 esittää sorvin rakenteen. Terän tunkeutumissyvyyttä työkappaleeseen kutsutaan lastuamissyvyydeksi, jos lastuamissyvyyttä on tarpeen muuttaa työstön aikana, liikettä kutsutaan asetusliikkeeksi. Nämä kolme ovat tärkeimmät lastuamisparametrit; pyörimisnopeus, syöttönopeus ja lastuamissyvyys. Lisäksi lastunmuodostukseen vahvasti vaikuttavia tekijöitä ovat terägeometria (katso Kuva 3), lastuamisnesteen käyttö, lastuttava materiaali ja terämateriaali. [3]



Kuva 2. Kärkisorvin rakenne- (1) hallinta ja säätölaitteet, (2) kara ja kiinnitysistukka, (3) johteet, (4) teräkelkka ja teränpidin, (5) kärkipylkkä, (6) johtoruuvi, (7) vetokara (syöttökara) [3]



Kuva 3. Sorvauksen terägeometria [3]

Lastuamisessa esiintyvät voimat eli lastuamisvoimat voidaan esittää suorakulmaisilla voimakomponenteilla, joita Kuva 4 esittää. Voimiin luetaan päälastuamisvoima  $F_y$ , joka on työkappaleen pyörimisliikkeen tangentin suuntainen, syöttövoima  $F_z$ , joka on syöttöliikkeen suuntainen, sekä radiaalivoima  $F_x$ , joka on työkappaleen säteen suuntainen. Päälastuamisvoima voidaan arvioida kaavan (1) mukaisesti (Kienzle & Victor 1952) [4], jossa *b* on lastun leveys, *h* on lastun paksuus,  $k_{c1.1}$  on ominaislastuamisvakio ja *m* on eksponentti yhtälöstä, joka määrittää ominaislastuamisvoiman riippuvuuden lastunpaksuudesta [5]. [3]



Kuva 4. Suorakulmaiset lastuamisvoimakomponentit [6]

$$F_{v} = F_{c} = b \cdot h^{1-m} \cdot k_{c1,1} \tag{1}$$

# 2.1.2 Otsajyrsintä

Jyrsintää on kahta perustyyppiä, otsajyrsintää ja lieriöjyrsintää. Otsajyrsinnässä työkalu pyörii työkappaleen työstettävän tason tai valmiin pinnan normaalin ympäri, lieriöjyrsinnässä työkalu pyörii tason normaalia tai valmista pintaa nähden kohtisuorassa. Jyrsintää voidaan tehdä työkalun pyörimisen ja syöttöliikkeen suunnista riippuen myötä- tai vastajyrsintänä. Myötäjyrsinnällä saavutetaan yleensä parempi pinnanlaatu, mutta vastajyrsintää on edullista käyttää, jos täytyy vaikuttaa lastuamisvoimaresultantin suuntaan. Kuva 5 esittää otsajyrsinnän periaatteen, jossa D on työkalun halkaisija,  $f_z$  on hammassyöttö,  $a_p$  lastuamissyvyys,  $h_1$  lastuamispaksuus, b on lastun leveys,  $\kappa$  teräkulma,  $v_f$  on syöttönopeus ja  $v_c$  on lastuamisnopeus. Hammaskohtainen lastuamisvoima saadaan kaavasta (2), jossa voima on yhtä suuri kuin lastun pinta-ala kertaa ominaislastuamisvoima  $k_c$ , josta saadaan kokonaislastuamisvoima kaava (3) kertomalla kontaktissa olevien hampaiden lukumäärällä e. [3]



Kuva 5. Otsajyrsinnän lastuamisgeometria ja suureet [3]

$$F_{\rm vm} = b \cdot h_m \cdot k_c \tag{2}$$

$$F_{v} = F_{vm} \cdot e \tag{3}$$

# 2.1.3 Poraaminen

Poraaminen määritellään lastuamiseksi, jossa työkalu pyörii ja syöttöliike on työkalun pituusakselin suuntaista. Poraamalla aikaan saadaan reikiä työkappaleeseen. Porakoneiden runkomalleja on monia, mutta poraamisen mekaniikka pysyy samana runkomallista riippumatta. Kuva 6 esittää poraamisen suureita, jossa  $\kappa_r$  on pääleikkuusärmän kulma, D porattavan reiän halkaisija,  $F_z$  syöttövoima ja  $\Omega$  on pyörimisnopeus. Tangentiaalivoima on yhtä lastuavaa särmää kohden kohdistuva leikkuuvoima. Syöttövoimalle ja tangentiaalivoimalle voidaan kirjoittaa esitykset (kaavat (4) ja (5)) Kienzle-Victor ominaislastuamisvoimayhtälön mukaisesti. Kaavoissa f on syöttö, d on mahdollisen alkureiän halkaisija, n ja m ovat ominaislastuamisvoimien muutospotensseja. [1][2][3]



Kuva 6. Poraamisen periaatekuva [2]

$$F_{Z} = D \cdot \left(\frac{f}{2} \cdot \sin \kappa\right)^{1-n} \cdot k_{cf1.1}$$
<sup>(4)</sup>

$$F^{T} = \frac{D-d}{2 \cdot \sin \kappa} \cdot \left(\frac{f}{2} \cdot \sin \kappa\right)^{1-m} \cdot k_{c1.1}$$
<sup>(5)</sup>

## 2.2 Elementtimenetelmä

Insinööritieteiden mekaniikan ongelmat kuvataan differentiaaliyhtälöillä, jotka usein muodostuvat niin monimutkaisiksi, että niiden ratkaiseminen analyyttisesti on hyvin vaikeaa, tai mahdotonta. Elementtimenetelmä on numeerinen ratkaisumenetelmä, jolla saadaan differentiaaliyhtälöiden ratkaisuista likiarvot. Elementtimenetelmässä ongelman tarkastelualue jaetaan pieniin osiin, elementteihin. Elementit koostuvat solmuista ja elementin reunoista. Solmuarvot oletetaan tunnetuiksi. Interpoloimalla solmuarvoja saadaan solmupisteiden väleille tulevat arvot. Elementistä toiseen jatkuvuus tapahtuu solmupisteiden kautta, jatkuvuus voi olla lineaarinen, kvadraattinen tai korkeampaa astetta oleva. Valittaessa elementtiä on tärkeää tietää jatkuuko itse ilmiö, vai sekä ilmiö että sen derivaatta, tai niiden lisäksi myös toinen derivaatta. Elementeistä koostuvaa systeemiä kutsutaan elementtiverkoksi, joka voi olla yksi-, kaksi-, tai kolmidimensioinen. Yksinkertaistaen elementtimenetelmä jakaa ongelman pieniin osiin joiden käyttäytyminen on laskettavissa. Kun elementtien määrä kasvaa, koko systeemin käyttäytyminen lähestyy systeemin todellista käyttäytymistä. Elementtimenetelmän muodostaminen aloitetaan kokoamalla ongelmaa kuvaavat perusyhtälöt, kuten liikeyhtälöt, tasapainoehdot, virtausyhtälöt tai muut fysikaalista ongelmaa kuvaavat yhtälöt, näitä kutsutaan vahvaksi muodoksi. Vahva muoto muutetaan heikoksi muodoksi. Tämä tehdään seuraavassa esimerkissä virtuaalisen työn periaatteen mukaisesti. Luodaan elementtimalli kolmidimensionaaliselle elastisuudelle [7, s. 292-299]. Tasapainoyhtälöt systeemille on esitetty kaavassa (6), jossa b on voimavektori ja  $\widetilde{\nabla}^{ \mathrm{\scriptscriptstyle T} } \boldsymbol{\sigma} \,$  on jännitykset kerrottuna differentiaalioperaattorilla. Tämä yhtälö asettaa voimat ja jännitykset tasapainoon tarkastelualueessa. Lisäksi tarvitaan reunaehdot. Reunaehdot ovat yhtälöitä, jotka kuvaavat systeemille asetettuja rajoitteita liikkeen, jännitysten, lämpövirtausten ja vastaavien systeemissä esiintyvien fysikaalisten muuttujien suhteen.

$$\widetilde{\nabla}^T \mathbf{\sigma} + \mathbf{b} = \mathbf{0} \tag{6}$$

Tarvitaan satunnainen vektori **v**, joka kuvaa ratkaisun alkuarvoa. Vektorista käytetään myös nimitystä virtuaalinen siirtymä, jota merkitään usein  $\delta \mathbf{u}$ . Kerrotaan yhtälöt (6) satunnaisvektorilla **v**, ja integroidaan tilavuuden ylitse. Sievennetään

käyttäen traktiota  $\mathbf{t}$ , joka kuvaa pintavoimia ja täyttää reunaehdot. Saadaan heikko muoto (7), josta käytetään nimitystä virtuaalisen työn periaate. Käytetään siirtymävektoria ilmaisemaan yksittäisten materiaalipisteiden siirtymät alkutilan ja tarkastelutilan välillä. Siirtymävektoria approksimoidaan kaavan (8) mukaisesti, kaavassa  $\mathbf{u}$  on siirtymät kappalekoordinaatistossa ja  $\mathbf{a}$  on elementtikohtaiset siirtymät. Virtuaalisia siirtymiä (9) kuvataan muotofunktioiden  $\mathbf{N}$  avulla. Virtuaalisten siirtymien gradientti (10) kuvataan satunnaismatriisin  $\mathbf{c}$  avulla.

$$\int_{V} (\widetilde{\nabla} \mathbf{v})^{T} \,\mathbf{\sigma} \, dV = \int_{S} \mathbf{v}^{T} \mathbf{t} \, dS + \int_{V} \mathbf{v}^{T} \mathbf{b} \, dV \tag{7}$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{N}\mathbf{a} \tag{8}$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{N}\mathbf{c} \tag{9}$$

$$\widetilde{\nabla} \mathbf{v} = \mathbf{B} \mathbf{c}, \text{ jossa } \mathbf{B} = \widetilde{\nabla} \mathbf{N}$$
<sup>(10)</sup>

Kun yllä olevat yhtälöt sijoitetaan virtuaalisen työn periaatteeseen, saadaan kaava (11).

$$\int_{V} \mathbf{B}^{T} \boldsymbol{\sigma} \, dV = \int_{S} \mathbf{N}^{T} \mathbf{t} \, dS + \int_{V} \mathbf{N}^{T} \mathbf{b} \, dV \tag{11}$$

Edellä mainitut muotofunktiot ovat elementtikohtaisia interpolaatiofunktioita, jotka saavat arvon yksi oman solmunsa kohdalla ja arvon nolla muiden solmujen kohdalla. Muotofunktioiden tarkoituksena on interpoloida solmuarvoja koko elementin ylitse. Muotofunktiot "jakavat" esimerkiksi solmusiirtymät koko elementin pituudelle. Muotofunktiot nelisolmuiselle tetraedrinmuotoiselle elementille (Kuva 7) esitetään kaavoissa (12),(13),(14) ja (15), joissa esiintyvät ksii, eeta ja zeeta ovat tetraedrin painopisteessä origon omaavan koordinaatiston akselit [8, s. 623-624].

$$N_1(\xi,\eta,\zeta) = \frac{1}{12}(3+8\xi-2\sqrt{2}\zeta)$$
(12)

$$N_{2}(\xi,\eta,\zeta) = \frac{1}{12}(3 - 4\xi - 4\sqrt{3}\eta - 2\sqrt{2}\zeta)$$
<sup>(13)</sup>

$$N_{3}(\xi,\eta,\zeta) = \frac{1}{12}(3 - 4\xi + 4\sqrt{3}\eta - 2\sqrt{2}\zeta)$$
<sup>(14)</sup>

$$N_4(\xi,\eta,\zeta) = \frac{1}{4}(1 + 2\sqrt{2}\zeta)$$
(15)



Kuva 7 Nelisolmuinen tetraedrielementti painopistekoordinaatistossa [8]

Venymät ovat siirtymien gradientti, johon sovellettaessa kaavaa (10) saadaan yhteys venymien ja virtuaalisten siirtymien välille. Materiaalin konstitutiivinen malli kertoo sen yhteyden venymien ja jännitysten välillä. Käytetään termoelastisen materiaalin konstitutiivista yhteyttä, joka saa muodon joka esitetään kaavassa (16). Tämä yhtälö asettaa siirtymille, jännityksille ja lämpötilalle yhteyden, jota materiaali noudattaa. Kaavassa esiintyvää matriisia **D** kutsutaan konstitutiiviseksi matriisiksi, jonka sisältö riippuu materiaalin ominaisuuksista. Sijoitetaan konstitutiivinen yhteys kaava (16) tasapainoyhtälöiden heikkoon muotoon kaavaan (11), jolloin saadaan haluttu elementtimenetelmän esitys (17). Reunaehdot esitetään kaavojen (18) ja (19) mukaisesti, jotka tarkoittavat traktion **t** arvojen olevan tunnettuja reunalla  $S_{g}$ .

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}\mathbf{B}\mathbf{a} - \mathbf{D}\boldsymbol{\varepsilon}_0 \tag{16}$$

$$\left(\int_{V} \mathbf{B}^{T} \mathbf{D} \mathbf{B} \, dV\right) \mathbf{a} = \int_{Sh} \mathbf{N}^{T} \mathbf{h} \, dS + \int_{Sg} \mathbf{N}^{T} \mathbf{t} \, dS + \int_{V} \mathbf{N}^{T} \mathbf{b} \, dV + \int_{V} \mathbf{B}^{T} \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}_{0} \, dV \tag{17}$$

$$\mathbf{t} = \mathbf{S}\mathbf{n} = \mathbf{h}, \text{ reunalla } S_h \tag{18}$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{g}$$
, reunalla  $S_g$  (19)

Kirjoitetaan yhtälö (17) uuteen muotoon (24) hyväksikäyttäen lyhenteitä jäykkyysmatriisi (20), reunavektori (21), kuormavektori (22) ja alkuvenymävektori (23). Käyttämällä lyhennettä (25) saadaan yhtälöstä (24) standardi elementtimenetelmän esitys (26). Tämä yhtälö ratkaistaan numeerisesti, jolloin ratkaisusta voidaan johtaa halutut suureet. Tässä ratkaisuksi saadaan siirtymät, joista voidaan johtaa jännitykset.

$$\mathbf{K} = \int_{V} \mathbf{B}^{T} \mathbf{D} \mathbf{B} \, dV \tag{20}$$

$$\mathbf{f}_{b} = \int_{Sh} \mathbf{N}^{T} \mathbf{h} dS + \int_{Sg} \mathbf{N}^{T} \mathbf{t} \, dS \tag{21}$$

$$\mathbf{f}_1 = \int_V \mathbf{N}^T \mathbf{b} \, dV \tag{22}$$

$$\mathbf{f}_0 = \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}_0 dV \tag{23}$$

$$\mathbf{K}\mathbf{a} = \mathbf{f}_{b} + \mathbf{f}_{1} + \mathbf{f}_{0} \tag{24}$$

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}_b + \mathbf{f}_1 + \mathbf{f}_0 \tag{25}$$

$$\mathbf{Ka} = \mathbf{f} \tag{26}$$

Elementtimenetelmä on hyvä työkalu rakenteiden lujuuslaskentaan, kun tarkastellaan ominaisuuksia ennen rakenteiden rikkoutumista. Koska tarkastelu rajoittuu elastiselle alueelle, tarvitaan vain elastinen materiaalimalli. Koska lastuamisessa esiintyy suuria muodonmuutoksia, murtumista ja suuria plastisen muodonmuutoksen arvoja, ei elastinen materiaalimalli riitä kuvaamaan ongelmaa. Tällöin on jatkettava tarkastelua epälineaarisen elementtimenetelmän keinoin. [7]

# 2.3 Epälineaarinen elementtimenetelmä

Epälineaarinen elementtimenetelmä on koettu vaikeaksi ja vähemmän tärkeäksi, kuin tavanomaisemmat elementtimenetelmän sovellukset. Tietokoneiden kehityksen myötä epälineaarisen analyysin osuus on kasvanut, ja sitä käytetään jo laajalti ohutlevytöiden simuloinnissa, pursotuksissa ja valamisessa. Epälineaarinen analyysi sisältää seuraavat vaiheet: [8, s. 1-]

- Mallin muodostaminen
- Perusyhtälöiden kokoaminen
- Perusyhtälöiden diskretointi
- Yhtälöiden ratkaisu
- Ratkaisujen tulkinta

Mallin muodostaminen ja perusyhtälöiden kokoaminen tehdään kontinuumimekaniikan pohjalta. Nykyään käytännön sovelluksissa perusyhtälöiden formulointi ja diskretointi on simulaatio-ohjelmistojen kehittäjien vastuulla, mutta on tärkeää, että myös ohjelmistojen käyttäjillä on perustiedot näistä simuloinnin vaiheista. Yhtälöt ratkaistaan numeerisilla menetelmillä, tyypillisesti Newton-Raphson menetelmällä. Ratkaisujen tulkinta on käyttösovelluskohtaista. [9, s. 215-]

# 2.3.1 Kontinuumimekaniikka

Epälineaarisen elementtimenetelmän ymmärtämiseksi on välttämätöntä tuntea kontinuumimekaniikan perusajatukset. Kontinuumimekaniikka käsittää kiinteiden aineiden ja nesteiden malleja, joiden ominaisuuksia kuvataan funktioilla, jotka ovat derivoituvia ja sisältävät rajoitetun määrän epäjatkuvuuskohtia. Määritetään kappaleen tila alussa ja tarkasteluhetkellä. Kappaleen tilaa alussa merkitään  $\Omega_0$ , tätä kutsutaan myös deformoitumattomaksi tilaksi. Kappaleen tilaa tarkasteluhet-kellä merkitään  $\Omega$ , tätä kutsutaan vastaavasti deformoituneeksi tilaksi. Kappaleen dimensioista riippuen  $\Omega$  voi merkitä pituutta, pinta-alaa, tai tilavuutta. Systeemin dimensioita merkitään  $n_{SD}$ , jossa *SD* ilmaisee malliavaruuden dimensiot. Eulerin ja Lagrangen koordinaatistot ovat kaksi erilaista tapaa ilmaista materiaalipisteen sijainti malliavaruudessa (Kuva 8).



Kuva 8. Eulerin ja Lagrangen koordinaatistoesitykset [8]

Eulerin ja Lagrangen menetelmät eroavat koordinaattien esitysten, verkon esitysten ja muodonmuutoksen, tai muiden materiaalivasteiden esitysten kannalta analogisesti. Kuva 9 esittää menetelmien erot verkon esityksen osalta. Lagrangen esityksessä elementtiverkko deformoituu materiaalin mukana ja Eulerin esityksessä materiaali deformoituu verkon sisällä. Eulerin menetelmä kuvaa muutosta paikallaan pysyvästä koordinaatistosta (27). Lagrangen menetelmä kuvaa muutosta verraten tarkasteluhetken arvoja alkuperäisiin arvoihin. Lagrangen koordinaateilla materiaalipisteen sijainti, eli paikkavektori ilmoitetaan deformoitumattomassa tilassa (28). Eulerin koordinaatit kuvaavat materiaalipisteen paikkaa tarkasteluhetkellä.



Kuva 9. Eulerin ja Lagrangen verkkojen esitykset deformoitumattomassa ja deformoituneessa tilassa [8]

Yhtälöissä (27) ja (28)  $\mathbf{e}_i$  kuvaavat karteesisen koordinaatiston yksikkövektoreja. Kappaleen liike kuvataan Eulerin koordinaatteina Lagrangen koordinaattien ja ajan funktiona (29). Materiaalipisteen siirtymät kuvataan alkuperäisen ja nykyisen paikkavektorin erotuksena (30). Nopeus (31) ja kiihtyvyys (32) johdetaan siirtymistä.

$$\mathbf{X} = \sum_{i=1}^{n_{SD}} X_i \mathbf{e}_i$$
(27)

$$\mathbf{x} = \sum_{i=1}^{n_{SD}} x_i \mathbf{e}_i \tag{28}$$

$$\mathbf{x} = \boldsymbol{\phi}(\mathbf{X}, t) \tag{29}$$

$$\mathbf{u}(\mathbf{X},t) = \boldsymbol{\phi}(\mathbf{X},t) - \mathbf{X} \tag{30}$$

$$\mathbf{v}(\mathbf{X},t) = \mathbf{u} \tag{31}$$

$$\mathbf{a}(\mathbf{X},t) = \mathbf{\hat{u}} = \mathbf{\hat{v}} \tag{32}$$

Eulerin koordinaateilla ilmaistuna kiihtyvyys (materiaalin nopeuden aikaderivaatta) saa muodon joka esitetään kaavassa (33). Yhtälö muodostetaan asettamalla liikettä kuvaava yhteys (29) nopeuden lausekkeeseen (31) ja käyttämällä ketjuderivointisääntöä. Materiaalin aikaderivointi voidaan tehdä muillekin funktioille jotka riippuvat Eulerin koordinaateista ja ajasta.

$$\frac{D\mathbf{v}(\mathbf{x},t)}{Dt} = \frac{\partial \mathbf{v}(\mathbf{x},t)}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v}, \quad \text{jossa } \nabla \mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_{x,x} & v_{y,x} \\ v_{x,y} & v_{y,y} \end{bmatrix}$$
(33)

Deformaatio- eli muodonmuutosgradientti (34) on kontinuumimekaniikassa tärkeä muodonmuutoksen esitys. Muodonmuutosgradientti on liikkeen Jakobian matriisi. Muodonmuutosgradientti ilmaisee materiaalipisteen venymän tarkasteluhetkellä verraten materiaalipisteen paikkaa deformoitumattomassa tilassa olevan materiaalipisteen paikkaan.

$$\mathbf{F} = \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{X}} = (\nabla_0 \phi)^T \tag{34}$$

Suoraviivaisen liikkeen lisäksi on tarkasteltava pyörimistä akselien ympäri. Tätä varten käytetään rotaatiomatriisia. Pyörimisliike tuo yhtälöihin mukaan kulmano-

peuden ja kulmakiihtyvyyden. Kontinuumimekaniikassa venymän ilmaisemiseksi käytetään useita mahdollisia esityksiä, kuten esimerkiksi Greenin venymätensori **E** ja muodonmuutosnopeustensori **D**. Jännityksen ilmaisemiseksi on myös useita eri esityksiä, joista mainittakoon Cauchyn jännitys, nimellisjännitys ja Piola-Kirchhoff jännitystensori. Säilymisyhtälöt, massan häviämättömyys, liikemäärän säilyvyys, energian häviämättömyys ja liikemäärän momentin säilyvyys ovat kontinuumimekaniikan perusyhtälöjä, joista käytetään myös nimitystä tasapainoyhtä-löt. Nämä esitetään usein osittaisdifferentiaaliyhtälöinä. Eulerin menetelmän mukaiset tasapainoyhtälöt; massan häviämättömyys (35), liikemäärän tase (36), liikemäärän momentin tase (37) ja energian häviämättömyys (38).

$$\mathbf{\mathbf{b}} + \rho v_{i,i} = 0 \tag{35}$$

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = \nabla \cdot \mathbf{\sigma} + \rho \mathbf{b}$$
<sup>(36)</sup>

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}^{\mathrm{T}} \tag{37}$$

$$\rho \frac{D \mathbf{w}^{\text{int}}}{Dt} = \mathbf{D} : \boldsymbol{\sigma} - \nabla \cdot \mathbf{q} + \rho s$$
<sup>(38)</sup>

Lagrangen menetelmän mukaiset tasapainoyhtälöt; massan häviämättömyys (39), liikemäärän tase (40), liikemäärän momentin tase (41) ja energian häviämättömyys (42) kirjoitetaan seuraavasti. [8, s. 75-]

$$\boldsymbol{\rho}\mathbf{J} = \boldsymbol{\rho}_0 \tag{39}$$

$$\rho_0 \frac{\partial \mathbf{v}(\mathbf{X}, t)}{\partial t} = \nabla_0 \cdot \mathbf{P} + \rho_0 \mathbf{b}$$
<sup>(40)</sup>

$$\mathbf{F} \cdot \mathbf{P} = \mathbf{P}^T \cdot \mathbf{F}^T \tag{41}$$

$$\rho_0 \mathbf{\hat{w}}^{\text{int}} = \rho_0 \frac{\partial w^{\text{int}}(\mathbf{X}, t)}{\partial t}$$
(42)

## 2.3.2 Lagrangen ja Eulerin menetelmien muodostaminen

Mallin luominen aloitetaan valitsemalla käytettävä formulointi. Kootaan formuloinnille tyypilliset perusyhtälöt, joista muodostetaan heikko muoto virtuaalisen työn, tai virtuaalisen tehon periaatteella. Näistä saaduille solmuvoimien lausekkeille tehdään elementtiapproksimaatiot jotka voidaan ratkaista numeerisesti. Seuraavassa käydään läpi yksiulotteiset Lagrangen sekä Eulerin formuloinnit, joiden muodostamiset menevät analogisesti vastaavien useampiulotteisten mallien muodostamisten kanssa.

#### Yksiulotteinen täydellinen Lagrangen menetelmä

Kappaleen liike kuvataan Lagrangen koordinaattien ja ajan funktiona (43).

$$x = \phi(X, t), \quad X \in [X_a, X_b]$$
<sup>(43)</sup>

Alkutilanteessa  $t = 0 \rightarrow X = \phi(X,0)$ . Siirtymä (44) esitetään alkutilanteen ja seurantahetken koordinaattien erotuksena. Venymä (45) saadaan derivoimalla siirtymistä. Jännitys *P* (46) esitetään nimellisjännityksenä, jossa *T* on deformoitumattomaan (referenssitilassa olevaan) alaan vaikuttava voima.

$$u(X,t) = \phi(X,t) - X \tag{44}$$

$$\varepsilon(X,t) = \frac{\partial u(X,t)}{\partial X}$$
<sup>(45)</sup>

$$P = \frac{T}{A_0} \tag{46}$$

Liikemäärän tase esitetään siirtymien funktiona (47). Syntyvä yhtälö on riippuvainen materiaalin konstitutiivisesta yhteydestä. Konstitutiivinen yhteys (48) ilmaisee materiaalin jännityksen ja venymän, tai niiden nopeuksien suhteen. Konstitutiivisen yhteyden yleinen esitys on yhtälö, jossa jännitys on esitetty muodonmuutoshistorian funktiona, joka voi riippua muuttujasta F (muodonmuutosgradientti), tai muista tekijöistä kuten usein lämpötilasta, tai esimerkiksi materiaalin huokoisuudesta. Liikemäärän tase saa yleisen muodon. Lineaariselle elastiselle materiaalille konstitutiivinen yhteys on Hooken-laki (49).

$$P(X,t) = S^{PF}(F(X,t), \mathbf{R}(X,t)...), \quad t \le t$$
<sup>(47)</sup>

$$[A_0 P(u_X, \mathbf{u}_X, \dots)]_X + \rho_0 A_0 b = \rho_0 A_0 \mathbf{u}$$
<sup>(48)</sup>

$$\sigma = E\varepsilon \tag{49}$$

Reunaehdot ovat kappaleen määrättyjä ominaisuuksia, kuten estetyt siirtymät, lämmön johtuminen kappaleesta ympäristöön ja muut tilannekohtaiset ehdot. Alkuehdot ovat hetkellä t = 0 kappaleen tilaa; nopeutta, alkujännityksiä, lämpötilaa tai muuta vastaavaa kuvaavia ehtoja. Elementtimenetelmää ei voida soveltaa suoraan liikemäärän taseen yhtälöön, joten se on kirjoitettava heikkoon muotoon. Heikko muoto (50) on virtuaalisen työn periaatteen mukaan kirjoitetut liikemäärän taseen yhtälö ja reunaehdot. Heikko muoto saadaan integroimalla liikemäärän taseen ja muodostetun testifunktion  $\delta u(X)$  tulo tarkasteltavan alueen yli ja soveltamalla analyysin peruslausetta. Yhtälö jaetaan osiin, joista kukin esittää tiettyä virtuaalista energiaa; ulkoinen virtuaalinen työ (51), sisäinen virtuaalinen työ (52) sekä liikkeen tekemä virtuaalinen työ (53). Virtuaalisen työn periaate esitetään kaavassa (54).

$$\int_{Xa}^{Xb} [\delta u_{,X} A_0 P - \delta u(\rho_0 A_0 b - \rho_0 A_0 \mathcal{U})] dX - (\delta u A_0 \overline{t}_x^0) \Big|_{\Gamma t} = 0$$
<sup>(50)</sup>

$$\delta W^{ext} = \int_{X_a}^{X_b} \delta u \rho_0 b A_0 dX + (\delta u A_0 \overline{t}_x^0) \Big|_{\Gamma t}$$
<sup>(51)</sup>

$$\delta W^{\text{int}} = \int_{Xa}^{Xb} \delta u_{,X} P A_0 dX = \int_{Xa}^{Xb} \delta F P A_0 dX$$
<sup>(52)</sup>

$$\delta W^{kin} = \int_{X_a}^{X_b} \delta u \rho_0 A_0 \psi dX$$
<sup>(53)</sup>

$$\delta W(\delta u, u) \equiv \delta W^{\text{int}} - \delta W^{ext} + \delta W^{kin} = 0$$
<sup>(54)</sup>

Tarkasteltava alue  $[X_a, X_b]$  jaetaan elementteihin  $e \in [n_1, n_e]$  jotka koostuvat solmuista  $X_I, I \in [1, n_N]$ . Elementtikohtaiset solmut merkitään  $X_I^e, I \in [1, m]$ , jossa *m* on solmujen lukumäärä yhdessä elementissä. Yhden elementin alue on  $\Omega_e, [X_1^e, X_m^e]$ . Tyypillinen lastuamisen mallintamisessa käytetty elementti on muodoltaan tetraedri, jonka määrää neljä kulmissa sijaitsevaa solmua. Elementti kuvaa tarkasteltavan systeemin osa-aluetta solmuille laskettujen arvojen pohjalta. Kaksisolmuinen sauvaelementti kertoisi sauvan keskiosan siirtymän lineaarisesti päitten solmujen siirtymien suhteen. Muodostetaan yritefunktio (55), jossa  $N_I(X)$  ovat muotofunktioita ja  $u_I(t)$  ovat solmusiirtymiä. Yritefunktiosta saadaan virtuaaliset siirtymät (56). Solmuvoimille ja virtuaalisille energioille löytyy yhteydet (57)-(59), joissa  $\delta \mathbf{u}^T = [\delta u_1 \quad \delta u_2 \quad \dots \quad \delta u_{n_N}], \quad \mathbf{f}^T = [f_1 \quad f_2 \quad \dots \quad f_{n_N}]$  ja  $\mathbf{f}^{\text{int}}$  ovat sisäisiä voimia, kuten jännitykset materiaalissa,  $\mathbf{f}^{ext}$  ulkoisia voimia ja  $\mathbf{f}^{kin}$  massan hitausvoimia.

$$u(X,t) = \sum_{I=1}^{n_N} N_I(X) u_I(t)$$
(55)

$$\delta u(X) = \sum_{I=1}^{n_N} N_I(X) \delta u_I$$
<sup>(56)</sup>

$$\delta W^{\rm int} = \delta \mathbf{u}^T \mathbf{f}^{\rm int} \tag{57}$$

$$\delta W^{ext} = \delta \mathbf{u}^T \mathbf{f}^{ext} \tag{58}$$

$$\delta W^{kin} = \delta \mathbf{u}^T \mathbf{f}^{kin} \tag{59}$$

Johdetaan solmuvoimien lausekkeet (60) ja (61) käyttäen virtuaalisen työn lauseketta ja edellä mainittuja yhteyksiä soveltaen elementtiapproksimaatiota.

$$f_I^{\text{int}} = \int_{Xa}^{Xb} N_{I,X} P A_0 dX$$
<sup>(60)</sup>

$$f_{I}^{ext} = \int_{Xa}^{Xb} \rho_0 N_I b A_0 dX + (N_I A_0 \bar{t}_x) \Big|_{\Gamma t}$$
(61)

Massan hitausvoiman lausekkeen esittämiseksi käytetään usein massamatriisia (62). Massan hitausvoiman lausekkeeksi saadaan yhtälö (63) massamatriisia käyttämällä.

$$\mathbf{M} = \int_{X_a}^{X_b} \rho_0 \mathbf{N}^T \mathbf{N} A_0 dX$$
<sup>(62)</sup>

$$\mathbf{f}^{kin} = \mathbf{M}\mathbf{a}, \, \mathrm{kun} \, \mathbf{a}_{I} \equiv a_{I} \tag{63}$$

Mallin elementtiyhtälöt (64) saadaan edellisistä hyödyntämällä virtuaalisen työn periaatetta, jotka kirjoitettuna matriisimuotoon on esitetty kaavassa (65).

$$\sum_{I=1}^{n_N} \delta u_I (f_I^{\text{int}} - f_I^{ext} + f_I^{kin}) = 0$$
(64)

$$\mathbf{Ma} = \mathbf{f}^{ext} - \mathbf{f}^{\text{int}} \tag{65}$$

Edellä olevat yhtälöt on kirjoitettu globaalien muotofunktioiden pohjalta. Usein tarvitaan tarkastelua lokaalisti, kuten solmuvoimia ja solmusiirtymiä elementtimenetelmää hyödyntävillä ohjelmilla laskettaessa. Solmusiirtymien lokaalin ja globaalin notaation välillä on yhteys  $\mathbf{u}_e = \mathbf{L}_e \mathbf{u}$ , jossa  $\mathbf{L}_e$  on kytkentämatriisi (connectivity matrix). [8, s. 20-]

# Yksiulotteinen päivitetty Lagrangen menetelmä

Päivitetyssä Lagrangen formuloinnissa yhtälöt kuvataan tarkasteluhetken suhteen. Jännitys esitetään Cauchyn jännityksenä, joka on voiman vaikutus jo deformoituneeseen alaan. Lagrangen formulointia johdettaessa muuttujia joudutaan välillä esittämään Eulerin koordinaatistossa. Tätä varten on yksinkertainen muunnoskaava (66). Muodonmuutos ilmaistaan muodonmuutosnopeutena (strain rate) kaavan (67) mukaisesti.

$$X = \phi^{-1}(x,t) \equiv X(x,t) \tag{66}$$

$$D_x = \frac{\partial v}{\partial x} \tag{67}$$

Liikemäärän taseen yhtälö (68) eroaa täydellisen Lagrangen formuloinnin vastaavasta sen sisältäessä derivaattoja Eulerin koordinaattien suhteen. Myös jännitysten esitysten eroavaisuus tulee huomioida. Liikemäärän tase esitetään nopeuden ja jännityksen suhteen. Heikko muoto (69) eli virtuaalisen tehon periaate saadaan kertomalla liikemäärän taseen yhtälö muodostetulla testifunktiolla  $\delta v(X)$  ja integroimalla tarkastelualueen yli. Lauseke voidaan jakaa sisäisen (69), ulkoisen (70) ja kineettisen (71) virtuaalisen tehon lausekkeisiin. Lausekkeille pätee yhtälö (72).

$$\int_{Xa}^{Xb} [\delta v_{,x} A \sigma - \delta v (\rho A b - \rho A \frac{Dv}{Dt})] dx - (\delta v A \bar{t}_x) \Big|_{\Gamma t} = 0$$
<sup>(68)</sup>

$$\delta P^{\rm int} = \int_{\Omega} \delta D_x \sigma d\Omega \tag{69}$$

$$\delta P^{ext} = \int_{\Omega} \delta v \rho b d\Omega + (\delta v A \bar{t}_x) \Big|_{\Gamma t}$$
<sup>(70)</sup>

$$\delta P^{kin} = \int_{\Omega} \delta v \rho \psi d\Omega \tag{71}$$

$$\delta P = \delta P^{\text{int}} - \delta P^{\text{ext}} + \delta P^{\text{kin}} = 0 \tag{72}$$

Tarkasteltava alue jaetaan elementteihin  $\Omega_e$ . Elementtikohtaista nopeuskenttää approksimoidaan yhtälöllä (73). Elementtimenetelmän laskutoimitukset suoritetaan usein käyttäen elementtikoordinaatteja  $\xi$ . Elementtikoordinaateille voidaan kirjoittaa yhteys Eulerin tai Lagrangen koordinaatteihin usein hyväksikäyttäen muotofunktioita. Yleiselle yksidimensioiselle elementille yhteys on esitetty kaavassa (74).

$$v(X,t) = \sum_{I=1}^{m} N_I(X) v_I(t) = \mathbf{N}(X) \mathbf{v}(t)$$
<sup>(73)</sup>

$$x(\xi, t) = \mathbf{N}(\xi)\mathbf{x}^{e}(t)$$
<sup>(74)</sup>

Muodonmuutosnopeus (75) ilmaistaan solmunopeuksien avulla käyttäen hyväksi **B**-matriisia. Solmuvoimat (76) ja (77) saadaan virtuaalisen tehon lausekkeista. Massan hitausvoima (78) esitetään massamatriisia (79) hyväksikäyttäen, kuten täydellisessä Lagrangen formuloinnissa. Liikemäärän taseen lauseke voidaan kirjoittaa matriisimuotoon (80). Yhtälöissä esiintyvät osittaisderivaatat on esitetty alaindekseillä pilkku – muuttuja. [8, s. 49-]

$$D_{x} = v_{,x} = \mathbf{B}\mathbf{v}^{e} = \sum_{I=1}^{m} B_{I}v_{I}^{e}, \text{ jossa}$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{N}_{,x}$$
(75)

$$\mathbf{f}_{e}^{\text{int}} = \int_{\Omega^{e}} \mathbf{B}^{T} \boldsymbol{\sigma} d\Omega = \int_{\xi_{1}}^{\xi_{m}} \mathbf{N}_{,\xi}^{T} \boldsymbol{\sigma} A d\xi$$
<sup>(76)</sup>

$$\mathbf{f}_{e}^{ext} = \int_{\Omega^{e}} \mathbf{N}^{T} \rho b d\Omega + (\mathbf{N}^{T} A \bar{t}_{x}) \Big|_{\Gamma_{t}^{e}}$$
<sup>(77)</sup>

$$\mathbf{f}_{e}^{kin} = \mathbf{M}^{e} \mathbf{\psi}^{e} \tag{78}$$

$$\mathbf{M}^{e} = \int_{\Omega^{e}} \rho \mathbf{N}^{T} \mathbf{N} d\Omega$$
<sup>(79)</sup>

$$\mathbf{M}\mathbf{\hat{w}} + \mathbf{f}^{\text{int}} = \mathbf{f}^{ext} \tag{80}$$

# Yksiulotteinen Eulerin menetelmä

Eulerin formuloinnissa solmut on kiinnitetty avaruuteen ja muuttujat ovat Eulerin koordinaattien ja ajan funktioita. Jännitys ilmaistaan Cauchyn jännityksenä. Muodonmuutos esitetään muodonmuutosnopeutena. Liike esitetään nopeutena. Eulerin formuloinnissa heikko muoto käsittää kolme yhtälöä, liikemäärän taseen, massan häviämättömyyden ja konstitutiivisen yhteyden. Heikko muoto on samanlainen kuin päivitetyssä Lagrangen formuloinnissa, mutta tarkastelualue on kiinnitetty avaruuteen ja materiaalin aikaderivaatat esitetään Eulerin koordinaattien avulla. Virtuaalisen tehon periaate pätee myös Eulerin menetelmässä. Virtuaaliset tehot saadaan testifunktioiden ja heikon muodon yhtälöiden avulla. Tarvitaan yhteys elementtikoordinaattien ja Eulerin koordinaattien välille. Tämä yhteys on ajan suhteen vakio, toisin kuin päivitetyssä Lagrangen menetelmässä. Koe ja yritefunktiot on vastaava kuin päivitetyssä Lagrangen menetelmässä, paitsi että massan hitausvoiman lauseke (81) poikkeaa edellisestä. Hitausvoiman lausekkeessa esiintyy massamatriisi (82) ja siirtosolmuvoimat (83). [8, s. 64-]

$$\mathbf{f}^{kin} = \mathbf{M}_e \mathbf{\hat{v}}_e + \mathbf{f}_e^{tran} \tag{81}$$

$$\mathbf{M}_{e} = \int_{\Omega^{e}} \boldsymbol{\rho} \mathbf{N}^{T} \mathbf{N} A dX \tag{82}$$

$$\mathbf{f}_{e}^{tran} = \int_{\Omega^{e}} \mathbf{N}^{T} \rho v_{,x} v A dx$$
(83)

## 2.3.3 Konstitutiiviset yhteydet

Konstitutiiviset yhteydet ovat matemaattisia kuvauksia materiaalien muodonmuutoskäyttäytymisestä jännitysten alaisena. Konstitutiivisia yhteyksiä ovat myös materiaaliominaisuuksien yhteys lämpötilaan, tai muut kahden suureen yhteydet. Materiaalien tyypilliset jännitys-venymä käyttäytymiset on nimetty elastisplastisuudeksi, viskoplastisuudeksi, virumiseksi ja viskoelastisuudeksi. Tyypillinen lujuusopissa käytettävä konstitutiivinen yhteys on Hooken-laki (49), joka ilmaisee materiaalin käyttäytymisen elastisella alueella. Materiaalin käyttäytyminen muuttuu elastisesta plastiseksi tietyn venymän arvon jälkeen. Materiaali voi myös lujittua plastisen muodonmuutoksen alussa. Tätä kutsutaan muokkauslujittumiseksi. Muokkauslujittumiselle on kehitetty useita matemaattisia malleja. Materiaalin plastisen käyttäytymisen alkamisen tunnistamiseksi on kehitetty vaurio- ja alkumyötöehtoja. Yleinen vaurio-, tai alkumyötöehto ilmenee funktiona, joka riippuu jännityksen arvoista ja täyttyy kun funktio saa arvon nolla. Eräs tavallinen myötöehto on von Misesin myötöehto (84). Von Misesin myötöehdossa esiintyy avaruuskoordinaatiston akselien suuntaiset jännitykset ja alempi myötöraja. Lastuavan työstön mallintamiseksi käytetään usein Johnson-Cook materiaalimallia.

$$\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]} - \sigma_{y0} = 0$$
(84)

Elastis-plastinen konstitutiivinen yhteys muodostetaan kirjoittamalla elastinen palautuva muodonmuutos ja plastinen palautumaton muodonmuutos muodonmuutosnopeutena. Myötöehtö kertöö millöin plastinen käyttäytyminen alkaa. Plastisen virtauksen ja muodonmuutoksen välille kirjoitetaan yhteys, josta saadaan palautumattoman muodonmuutoksen osuus kokonaismuodonmuutokseen. Lisäksi tarvitaan ehdöt jotka kertövät materiaalin muokkautumisen vaikutukset materiaalien ominaisuuksiin ja siten palautuen muokkautumiseen, kuten esimerkiksi muokkauslujittuvuus, tai lämpenemisen vaikutus kovuuteen. Matemaattisen mallintamisen kannalta on hankalaa, että elastis-plastinen käyttäytyminen on riippuvainen muodonmuutoshistoriasta. [8, s.215-][10]

## 2.3.4 Ratkaisumenetelmät

Elementtimenetelmällä diskretoidut riippuvat yhtälöt ratkaistaan numeerisia ratkaisumenetelmiä käyttäen. Ajasta riippuvat yhtälöt ratkaistaan numeerisia aikaintegrointimenelmiä käyttäen, joita ovat implisiittinen ja eksplisiittinen aikaintegrointi. Implisiittinen ja eksplisiittinen aikaintegrointi eroavat toisistaan siten, että eksplisiittinen aikaintegrointi ratkaisee suoraan kiihtyvyydet hyväksikäyttäen oletusta, että massamatriisi on diagonaalinen, implisiittinen menetelmä ratkaisee yhtälöjoukon iteroimalla. Seuraavassa läpikäydään molempien aikaintegrointimenetelmien perusteet.[11, s. 91-][7, s. 91-]

# Eksplisiittinen aikaintegrointi

Sovelletaan menetelmää Lagrangen elementtiverkkoon. Asetetaan simulaation kesto aikavälille  $0 \le t \le t_E$  ja jaetaan se aika-askeliin  $\Delta t^n$ ,  $n \in [1, n_{TS}]$ , jossa  $n_{TS}$  on aika-askelten lukumäärä. Yläindeksillä n viitataan aika-askeleen järjestysnumeroon. Määritetään aikainkrementti  $\Delta t^n = t^{n+1/2} - t^{n-1/2}$ . Kun tunnetaan että siirtymille pätee  $\mathbf{d}^n = \mathbf{d}(t^n)$ , niin nopeuden (85) ja kiihtyvyyden (86) esitykset saadaan derivaatan määritelmästä. Kiihtyvyyden lauseke ilmaistuna siirtymien suhteen saa muodon (87), joka on tunnettu cdf-muoto (central difference formula) funktion toiselle derivaatalle. Esitetään liikeyhtälöt (88) siirtymien ja ajan funktioina. Yhtä-löt ovat osittain diskreettejä, koska ne ovat diskretoitu paikan, muttei ajan suhteen.

$$\mathbf{v}^{n+\frac{1}{2}} = \left(\frac{\mathbf{d}^{n+\frac{1}{2}} - \mathbf{d}^{n}}{t^{n+1} - t^{n}}\right)$$
(85)

$$\mathbf{a}^{n} = \mathbf{a}^{n} = \left(\frac{\mathbf{v}^{n+\frac{1}{2}} - \mathbf{v}^{n-\frac{1}{2}}}{t^{n+\frac{1}{2}} - t^{n-\frac{1}{2}}}\right)$$
(86)

$$\mathbf{a}^{n} = \mathbf{\mathbf{a}}^{n} = \frac{1}{\left(\Delta t^{n}\right)^{2}} \left(\mathbf{d}^{n+1} - 2\mathbf{d}^{n} + \mathbf{d}^{n-1}\right)$$
<sup>(87)</sup>

$$\mathbf{Ma}^{n} = \mathbf{f}^{ext}(\mathbf{d}^{n}, t^{n}) - \mathbf{f}^{int}(\mathbf{d}^{n}, t^{n})$$
<sup>(88)</sup>

$$\mathbf{a}^n = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{f}^n \tag{89}$$

$$\mathbf{v}^{n+\frac{1}{2}} = \mathbf{v}^{n-\frac{1}{2}} + \Delta t^n \mathbf{M}^{-1} \mathbf{f}^n \tag{90}$$

Kertomalla yhtälö (88) massamatriisin käänteismatriisilla puolittain, ja sijoittamalla tulo (89) kiihtyvyyden lausekkeeseen (86), saadaan yhtälöt (90), joilla lasketaan solmusiirtymiä ja solmunopeuksia. Jokaisella aika-askelella *n* siirtymät **d**<sup>*n*</sup> tunnetaan. Solmuvoimat voidaan laskea jännitys-venymä-yhteydestä. Tällöin yhtälöstä saadaan **v**<sup>*n*+½</sup>, jonka avulla saadaan ratkaistua **d**<sup>*n*+1</sup>, sijoittamalla se nopeuden yhtälöön. Tätä toistetaan kunnes saavutaan aika-askeleeseen *n*<sub>TS</sub>. Laskenta onnistuu helposti ilman, että täytyisi ratkaista mitään yhtälöitä, olettaen että massamatriisi on diagonaalinen. Massamatriisin diagonaalisuus saavutetaan oletuksella että massa on keskittynyt solmupisteisiin [7, s.91-]. Toisaalta, jotta tulokset ovat todellisuutta kuvaavia, täytyy aika-askeleen olla pieni, koska laskennassa esiintyvän pienen virheen osuus kasvaa suhteessa aika-askeleen pituuteen. Tällöin puhutaan kriittisestä aika-askeleesta. Jos käytetään aika-askelta, joka ylittää kriittisen aika-askelen, eksplisiittinen ratkaisu kasvaa rajoittamattomasti.[8, s. 310-][10, s. 509-516]

# Implisiittinen aikaintegrointi

Diskretoitu liikemäärän taseen yhtälö kirjoitetaan aika-askeleen n+1 suhteen (91). Matriisia  $\mathbf{r}(\mathbf{d}^{n+1}, t^{n+1})$  kutsutaan residuaaliksi. Newmarkin  $\beta$ -yhtälöt (92) ja (93) ovat eräs yleinen aikaintegrointimenetelmä. Kun Newmarkin yhtälöissä esiintyvä  $\beta$  on nolla ja $\gamma$  on puoli, niin menetelmä on sama kuin eksplisiittinen aikaintegrointi. Implisiittisessä aikaintegroinnissa asetetaan  $\beta \neq 0$ . Kiihtyvyydet  $\mathbf{d}^{n+1}$  saadaan kirjoittamalla (94) Newmarkin yhtälöistä.

$$\mathbf{r}(\mathbf{d}^{n+1}, t^{n+1}) = \mathbf{M}\mathbf{a}^{n+1} + \mathbf{f}^{\text{int}}(\mathbf{d}^{n+1}, t^{n+1}) - \mathbf{f}^{ext}(\mathbf{d}^{n+1}, t^{n+1}) = 0$$
<sup>(91)</sup>

$$\mathbf{d}^{n+1} = \mathbf{d}^n + \Delta t \mathbf{\dot{d}}^n + \frac{\Delta t^2}{2} [(1 - 2\beta)\mathbf{\ddot{d}}^n + 2\beta \mathbf{\ddot{d}}^{n+1}]$$
<sup>(92)</sup>

$$\mathbf{\hat{d}}^{n+1} = \mathbf{\hat{d}}^n + \Delta t [(1-\gamma)\mathbf{\hat{d}}^n + \gamma \mathbf{\hat{d}}^{n+1}]$$
<sup>(93)</sup>

$$\mathbf{\hat{d}}^{n+1} = \frac{1}{\beta \Delta t^2} (\mathbf{d}^{n+1} - \mathbf{d}^n - \Delta t \mathbf{\hat{d}}^n - \frac{\Delta t^2}{2} (1 - 2\beta) \mathbf{\hat{d}}^n)$$
<sup>(94)</sup>
Kun kiihtyvyydet sijoitetaan liikemäärän taseen yhtälöön, saadaan joukko epälineaarisia algebrallisia yhtälöitä (95) solmusiirtymien  $\mathbf{d}^{n+1}$  suhteen.

$$\mathbf{r} = \frac{1}{\beta \Delta t^2} \mathbf{M} (\mathbf{d}^{n+1} - \mathbf{d}^n - \Delta t \mathbf{d}^n - \frac{\Delta t^2}{2} (1 - 2\beta) \mathbf{d}^n)$$

$$-\mathbf{f}^{ext} (\mathbf{d}^{n+1}, t^{n+1}) + \mathbf{f}^{int} (\mathbf{d}^{n+1}, t^{n+1}) = 0$$
(95)

Tämän yhtälöjoukon ratkaisemiseksi käytetään usein Newton-Raphson iterointimenetelmää (Newtonin menetelmä). [8, s. 317-][10, s. 509-516]

#### 2.4 Lastuamisen FE-mallit

Lastuamisessa esiintyy suuria siirtymiä sekä plastisuutta, jotka ovat epälineaarisia ilmiöitä mallintamisen kannalta. Lineaarista analyysiä tehtäessä poikkeumat voivat olla suuria, tai myötöraja voidaan ylittää vaikuttamatta laskenta-aikaan, jos epälineaarisuus ilmentyy lokaalisti alueilla, jotka eivät vaikuta tarkasteltavan alueen kanssa. Tällöin epälineaarinen käyttäytyminen voidaan jättää huomiotta. Lastuamisessa epälineaarisuus on niin hallitseva, että lineaarista analyysiä ei voida käyttää. Siirryttäessä epälineaariseen analyysiin, malliin tulee uusia tekijöitä, kuten materiaalien jännitys-venymäkäyrät, lineaarisissa tapauksissa Hooken-laki, joissa materiaalin käyttäytyminen on jatkettu elastiselta alueelta plastiselle alueelle. Elementtimenetelmä on luonnollinen valinta tehtäessä epälineaarista analyysiä, joskin siinäkin esiintyy ongelmia esimerkiksi lastunmuodostuksen mallintamisessa. Lastuamisen mallintamiseksi on useita elementtimenetelmän sovelluksia, joista tärkeimmät esitellään tässä luvussa.[12][13][9, s. 215, 233-][2, s. 200-][8, s. 19-74]

# 2.4.1 Eulerin ja Lagrangen tekniikat

Lähtökohtana lastuamisen mallintamiselle käytetään tyypillisesti Eulerin tai Lagrangen tekniikkoja. Elementtimenetelmän perusajatus on jakaa jatkuva kappale osiin - elementteihin joiden käyttäytyminen tunnetaan ja tämä voidaan tehdä näillä tekniikoilla. Lagrangen tekniikoissa seurataan erillisiä materiaalipisteitä. Elementit on sidottu deformoituvaan kappaleeseen ja ne seuraavat materiaalivirtaa. Lagrangen tekniikkaa käytettäessä seurataan yksittäisten elementtien nopeutta ajan funktiona. Tällä menetelmällä ei saavuteta suurta tarkkuutta teräsärmän ympärillä eikä toissijaisella leikkausvyöhykkeellä elementtiverkon vääristymien vuoksi. Eulerin menetelmä seuraa tilavuuksia materiaalipartikkelien sijaan. Eulerin mallissa elementit kiinnitetään koordinaatistoon ja materiaalin annetaan virrata elementtiverkon kautta. Elementtiverkko ei deformoidu materiaalin mukana. Nopeutta seurataan elementtien funktiona. Materiaalivirran nopeutta elementissä "A" verrataan saman materiaalivirran nopeuteen elementissä "B". Eulerin menetelmissä elementtiverkon vääristymät eivät haittaa laskentaa, mutta menetelmä vaatii vapaita pintoja seuraavia algoritmeja ja oletuksia kuten tasainen lastunpaksuus, joten sen käyttökelpoisuus lastuamisen tutkimuksessa on rajallinen.

Suurimpia ongelmia Eulerin menetelmässä on kuinka seurata materiaalin ominaisuuksien siirtymistä materiaalivirran mukana. Koska materiaaliominaisuudet voivat muuttua materiaalin sisällä paikasta riippuen, mutta materiaaliominaisuudet esitetään stationaarisen verkon avulla, pitäisi verkkoa päivittää siten että materiaaliominaisuudet seuraavat verkossa materiaalin mukana. Tämä ei onnistu yksinkertaisesti Eulerin menetelmällä. Nykyään käytetään lähinnä Lagrangen menetelmiä lastuamisen mallintamiseksi. Suurnopeuskoneistuksessa esiintyvät suuret muodonmuutosnopeudet ja rajoittamattomat plastiset virtaukset aiheuttavat ongelmia Lagrangen menetelmää käyttäville koodeille, joissa on pysyvä elementtiverkko. Ongelmia on pyritty ratkaisemaan käyttäen elementtejä, jotka suoriutuvat suuristakin vääristymistä. Lagrangen menetelmissä käytetään jatkuvaa, tai adaptiivista elementtiverkon uudistamista (continuous / adaptive remeshing), uudelleenverkottamista verkon vääristymien korjaamiseksi. Tällä tavalla meneteltäessä Lagrangen menetelmällä voidaan simuloida suuria vapaita plastisia virtauksia. Näiden simulointiin on kehitetty myös yhdistelmä Eulerin ja Lagrangen menetelmistä, ALEmenetelmä (Arbitrary Lagrangian Eulerian). Seuraavassa luettelossa on listattu eri variaatioita edellä mainituista menetelmistä;[8, s. 19-74]

- Täydellinen Lagrangen formulointi
- Päivitetty Lagrangen formulointi
- Eulerin formulointi
- ALE-formulointi

Täydellisen ja päivitetyn Lagrangen formulointien erot ovat vahvan muodon esityksessä. Päivitetyssä muodossa koordinaatit esitetään avaruuskoordinaatteina Eulerin menetelmän tapaan, kun täydellisessä Lagrangen formuloinnissa koordinaatit ovat kappalekoordinaatteja. Täydellisessä Lagrangen formuloinnissa yhtälöt on kirjoitettu alkutilanteen suhteen, kun päivitetyssä formuloinnissa ne on kirjoitettu tarkasteluhetken suhteen. Lagrangen eri formuloinnit ovat saman mallin kaksi eri esitystä, jotka ovat muunnettavissa toistensa esityskantaan. Esimerkiksi mallien avulla lasketut sisäiset ja ulkoiset voimat ovat samat, joten esityskannan valinta voidaan tehdä sen mukaan, mikä on edullisinta tietyn ongelman esittämiseksi. On tärkeää huomauttaa, että täydellisessä Lagrangen formuloinnissa jännityksen ilmaisemiseksi käytetään nimellisjännitystä, jossa voiman vaikutus huomioidaan deformoitumattomaan materiaaliin sen sijaan että käytettäisiin fysikaalisesti oikeaoppista Cauchyn jännitystä, jossa voima vaikuttaa deformoituneeseen materiaaliin. Nimellisjännitys ja fysikaalinen jännitys ovat suoraan verrannollisia deformation määrään. Eulerin formuloinnissa solmujen sijainti on sidottu avaruuteen. Muuttujat ovat Eulerin koordinaattien ja ajan funktioita. Jännitys ilmaistaan fysikaalisena jännityksenä. Eulerin esityksessä liikettä ei voida ilmaista minkään referenssikoordinaatiston suhteen, koska elementtiverkko ei muutu.

Arbitraarinen Lagrangen ja Eulerin menetelmä yhdistää molempia menetelmiä ennalta määräämättömällä tavalla käyttäjän valinnan mukaisesti. Tällöin voidaan mallintaa suuria muodonmuutoksia vaikka systeemissä esiintyy dynaamisia reunoja ja vuorovaikutuksia. Menetelmässä sekä materiaalipisteen että verkon siirtymät on esitettävä. Materiaalin liike esitetään Lagrangen koordinaatteina. ALEmenetelmässä tarvitaan toinen koordinaatisto, joka kertoo elementtiverkon liikkeen. ALE-menetelmässä on siis yhteensä kolme koordinaatistoa: referenssikoordinaatisto (ALE), materiaalikoordinaatisto (Lagrange) ja avaruuskoordinaatisto (Euler).[9, s. 215, 233-][2, s. 200-][8, s. 19-74][12][13]

## 2.4.2 Perusyhtälöiden diskretointi ja ratkaiseminen

Lastuamisessa esiintyvät fysikaaliset ilmiöt kuvataan tasapainoyhtälöillä, jotka kirjoitetaan virtuaalisen työn periaatteella heikkoon muotoon, josta diskretoidaan elementtimenetelmän standardiesitys. Heikon muodon muodostamiseksi käytetään

jotain edellä mainituista formuloinneista, joskin kaikki kaupalliset lastuamisen mallintamiseen tehdyt sovellukset käyttävät Lagrangen formulointia. Yhtälö saa jo useasti mainitun muodon, joka on esitetty kaavassa (65). Saatu yhtälö ratkaistaan eksplisiittistä, tai implisiittistä aikaintegrointimenetelmää käyttäen. Ratkaistusta yhtälöstä voidaan johtaa halutut suureet, kuten venymät, jännitykset, lämpötilat ja voimat. Lukuarvoista luodaan graafinen esitys tietokoneen näytölle joko 2d-, tai 3d-kuvana. [2, s. 200-]

# **3** Lastuamisen mallinnuksen tutkimus

Lastuamista on tutkittu kokeellisin keinoin jo yli 100 vuotta ilman, että on pystytty luomaan yleispätevää mallia, joka selittäisi kaikki lastuamisessa tapahtuvat ilmiöt. Lastuamisen tutkimus on viimeaikoina alkanut siirtymään kokeellisista menetelmistä jatkuvasti enenevissä määrin tietokonesimuloinniksi. Jaroslav Mackerle Linköpingin Teknillisestä Instituutista on koonnut nimekeluettelon lastuamisen tutkimusta koskevista artikkeleista ja tutkimusraporteista [14][15]. Julkaisuja kerätty on vuosilta 1976–2002. Mackerlen mukaan tällä aikavälillä on julkaistu lähes yhdeksänsataa artikkelia lastuamisen mallintamisesta elementtimenetelmällä.

Eräs viitatuimpia julkaisuja lastuamisen elementtimenetelmän saralta on tohtori Troy Marusichin ja professori Michael Ortizin julkaisu "Modelling and Simulation of High-Speed Machining" [13]. Tohtori Marusich on ollut myös kehittämässä Advant Edge FEM-ohjelmistoa, ja on Third Wave Systems FEM-ohjelmistotalon tekninen johtaja. Julkaisussa käsitellään Lagrangen formuloinnin mukaisesti luotua elementtiratkaisijaa, jossa elementtien vääristymät on ratkaistu jatkuvalla uudelleen verkottamisella. Ratkaisijan aikaintegrointi on toteutettu eksplisiittisesti. Ratkaisija on luotu ortogonaalista lastuamistapausta varten. Artikkelissa tuodaan esiin myös eksplisiittisen aikaintegroinnin etuja implisiittiseen aikaintegrointiin nähden; vaikka eksplisiittisen dynaamisen ongelman aika-askeleen enimmäispituuden määrää ratkaisun stabiilius, on menetelmä suoraviivaisempi ja karkeampi, joten se soveltuu paremmin monimutkaisiin kontaktiongelmiin. Erityisesti kolmidimensioanaalisissa ongelmissa implisiittisten ratkaisijoiden systeemimatriisit ovat niin suuria, etteivät ne mahdu prosessorin välimuistiin. Eksplisiittisten ratkaisijoiden etu on myös hyvä soveltuvuus käytettäessä useampaa prosessoriydintä. Lastunkatkeamisen mallintamisessa on käytetty murtumismekaniikasta tuttua murtumissitkeyden määrittävää materiaaliparametria  $K_{IC}$ . [13]

Mainitun ja muutaman muun avainjulkaisun myötä on alkanut ilmestyä enemmän tutkimuksia elementtimalleista lastuamissovellutuksiin, suurimman osan tutkimuksista keskittyessä lastuamisen elementtimenetelmän teoriapohjan ja fysiikan mallintamisen kehittämiseen. Teollisuuteen tehtyjä tutkimuksia menetelmää soveltaen on ilmestynyt joitain, mutta suurin osa alan soveltavasta tutkimuksesta tehdään FEM -palveluja tarjoavissa yrityksissä, tulosten jäädessä suljettujen ovien taakse. Alan tärkeimpiä tutkimuskohteita ovat lastuamisvoimat, lastuamislämpötila, kitka- ja kulumisominaisuudet, jäännösjännitykset ja koneistetun kappaleen laatu sekä materiaalimallit ja virtausparametrit.

#### 3.1 Lastuamisvoimat ja lämpötila

Lastuamisvoimat ovat lastuamistutkimuksen tyypillisin ja helpoiten mitattava tutkimuskohde. Lastuamisvoimien ennustamiseksi on luotu myös analyyttisiä malleja, joilla tavallisesti saavutetaan hyvä robusti arvio lastuamisvoimien suuruudesta, ja itse laskenta on hyvin helppoa. Elementtimenetelmällä laskettaessa lastuamisvoimien arvot voidaan arvioida hyvin tarkasti silloin, kun muutkin osatekijät simulaatiomallissa ovat kohdallaan. Näin lastuamisvoimia voidaan käyttää simulaatiomallin tuloksien arviointiin verraten lastuamisvoimien arvoja joko analyyttisiin tuloksiin tai kokeellisesti saatuihin tuloksiin. Toinen etu elementtimenetelmää käytettäessä on jatkuva mallintaminen Siinä missä analyyttiset mallit antavat yhden lukuarvon lastuamisvoimille, elementtimenetelmällä voidaan laskea voima lastuamisajan funktiona.

Lastuavien työkalujen valmistajille mielenkiintoisimpia aiheita ovat varmasti terägeometrian vaikutukset lastuamisvoimiin ja lämpötilaan, sekä terän kuluminen. Terägeometrioiden vaikutuksesta lastuamisvoimiin kirjoittavat Taylan Altan et al. heidän vuonna 2004 julkaisemassaan tutkimuksessa. Lastuava särmä on tyypillisesti hiottu johonkin kolmesta geometriasta; terävä särmä, viistetty särmä tai kaareva särmä. Se millainen hionta lastuavassa työkalussa on, vaikuttaa muodonmuutosvyöhykkeiden muotoon, lastuamisvoimiin, sekä lämpötilojen ja jännitysten jakaumiin työkalussa ja työkappaleessa. Erityisesti kun koneistettavan kappaleen laatu on tärkeä, terägeometrian vaikutukset ovat korostuneessa asemassa. Julkaisussa käydään läpi aiempia yrityksiä mallintaa terägeometrian vaikutuksia elementtimenetelmällä, joiden ongelmana on ollut ennalta määrätty lastunirtoamislinja, josta johtuen tulokset eivät ole olleet luotettavia. Kun käytetään adaptiivista uudelleenverkottamista, lastuvirta vastaa paremmin todellista tapausta erityisesti terän särmän läheisyydessä, ja näin terägeometrian vaikutuksia voidaan tutkia luotettavammin. Kaarevaksi hiotulla teräsärmällä suoritettujen kokeiden ja simulaatioiden tulokset esitetään seuraavassa kuvassa (Kuva 10). [16]



Kuva 10. Lastuamisvoimat kaarevalla teräsärmän geometrialla [16]

Kuvasta voidaan lukea kuinka lastuamisvoima kasvaa teräsärmän kaarevuussäteen kasvaessa. Virheen todetaan olevan 5-13 % välillä. Tutkimuksessa arvellaan lastuamisvoimien virheen syyksi liian suurta elementtikokoa teräsärmän läheisyydessä, adaptiivisen uudelleenverkottamisen aiheuttamaa numeerista virhettä, sekä sitä, että materiaalin virtausparametrit on hankittu eri olosuhteissa kuin mitkä lastuttaessa vallitsee, ja että kitkamalli on liian yksinkertainen lastuamisongelmassa vallitsevaan kosketustilanteeseen. Kuva 11 esittää lastuamislämpötilojen arvoja simulaatioissa. Tutkimuksessa todetaan lastuamislämpötilan nousun olevan suoraan verrannollinen plastisen muodonmuutoksen määrään, joka on verrannollinen työkalun särmän kaarevuussäteen suuruuteen. Viistetyllä työkalulla suoritetut simulaatiot antoivat tulokseksi noin 1700 N siinä missä kaarevalla hionnalla varustetulla terällä ollaan 1400 N paikkeilla. Lastuamislämpötilat ovat samaa luokkaa noin 600 °C kuin kaarevalla särmällä lastuttaessa. Kaarevalla särmällä on siis pidempi elinikä lastuamisvoimien ollessa pienemmät verrattuna viistettyyn särmään. Työssä todetaan elementtimallintamisen olevan työkalu, jolla voidaan tutkia ilmiöitä, joita ei pystytä tutkimaan kokeellisesti. Elementtimenetelmällä voidaan ratkaista suureita lastuamisesta siten, että terän kuluminen voitaisiin laskea. [16] Tähän aiheeseen ja liittyvään tutkimukseen paneudutaan seuraavan otsikon alla.



Kuva 11. Teräsärmän kaarevuussäteen vaikutus lastuamislämpötilaan [16]

John S. Strenkowski et al. ovat tehneet samankaltaisen tutkimuksen vuonna 2002. Työssään he käyttivät Usuin, Hirotan ja Masukon kehittämää kolmiulotteista analyyttistä mallia lastuamisesta [17][18], jonka laskenta tehtiin Eulerin formuloinnilla toteutetulla elementtiratkaisijalla. Tavoitteena oli tutkia lastuamisvoimien muuttumista terän kärjen säteen eli nirkonsäteen muuttuessa. Mallilla saavutettiin hyvä vastaavuus koearvojen suhteen, joka nähdään myös seuraavasta kuvasta (Kuva 12). Tuloksista voidaan nähdä trendi, missä päälastuamisvoima pysyy lähes vakiona terän kärjen säteen muuttuessa, mutta syöttö- ja radiaalivoimat muuttuvat vastakkaisiin suuntiin noin 100 N nirkonsäteen kasvaessa 1 millimetrin. [19]



Kuva 12. Työkalun kärjen säteen ja lastuamisvoimien yhteys [19]

Karpat, Özel, Sockman ja Shaffer [20] ovat tehneet lisää tutkimusta teräsärmän hionnan vaikutuksista lastuamisvoimiin, lämpötilaan ja kulumiseen simuloimalla lastuamisongelmia. Kun lastunpaksuuden suhde työkalun särmän säteeseen nähden pienenee, lastuamisen tehokkuus heikkenee. Työssä esitetään vaihtuvasäteinen teräsärmän hionta, jolla vähennetään kyntöefektiä, jolloin lastuamislämpötila laskee ja työkalun tehokkuus paranee. Työssä käytettiin Deform 3D ohjelmistoa simulaatioiden laskemiseksi. Kuva 13 esittää lastuamisvoimien arvot, joissa ei ole suurta eroa koearvojen suhteen. Myös simulaatioiden ja kokeiden arvot ovat kohtuullisella tarkkuudella oikein. Lastuamislämpötila oli 750 °C luokkaa, vakiosäteistä särmää käytettäessä pienimmillään 719 °C. Lopputuloksena työssä todetaan vaihtuvalla särmän hionnan säteellä saavutettavan pieni etu vakiosäteiseen tai viistettyyn särmään nähden. [20]



Kuva 13. Lastuamisvoimien arvoja simulaatiosta ja lastuamiskokeista [14]

Uhlmann, Graf von deg Schulenburg ja Zettier ovat tehneet tutkimusta Inconel 718:n koneistamisesta simuloimalla sorvausprosessia elementtimenetelmällä. Erityisen mielenkiintoiseksi julkaisun tekee se, että työssä on käytetty yleistä Abaqus-elementtiratkaisijaa, jonka "alustaminen" epälineaarisen ajasta riippuvan kytketyn probleeman ratkaisemiseksi on työlästä. Lisäksi Deform 2D ohjelmistoa käytetään simulaatioiden ratkaisemiseksi. Suurin ero ohjelmistoilla on, että Abaquksella käytetään lastun irtoamiskriteeriä, missä Deformilla adaptiivista uudelleenverkottamista. Työssä käytetään myöhemmin luvussa 3.4 esiteltävää Johnson-Cook materiaalimallia molemmilla ohjelmistoilla. Työssä tehtiin sekä 2D että 3D lastuamissimulaatioita. Abaquksella tehtiin molemmat, 2D- ja 3D-simulaatiot ja Deformilla 2D-simulaatiot. Työssä saadut tulokset esitetään seuraavassa kuvassa (Kuva 14). Ominaislastuamisvoimien maksimiarvoiksi simulaatiossa saatiin 4000  $\pm$  500 N/mm<sup>2</sup>. Voimien yli 10 % virhe ei ole epätavallinen, mutta parempaan tulokseen voidaan päästä. Abaquksella simuloitaessa suurin virhelähde lienee lastun irtoamiskriteeri, joka antaa teräsärmän läheisyydessä täysin virheellisiä tuloksia. Erinomainen tulos on kuitenkin ominaislastuamisvoimien muutos lastuamisnopeuden muuttuessa. Abaquksella ja koearvoista on nähtävissä ominaislastuamisvoimien nousu ja myöhemmin vakiintuminen kun lastuamisnopeus ylittää 600-800 m/min. Deformilla tätä nousua ei ole huomattavissa. Työssä todetaan 3Dsimulaatioon lisätyn terägeometrian aiheuttaneen vaikeuksia, joiden korjaamiseksi tarvittaisiin lisää mallinnustyötä. [21]



Kuva 14. Lastuamisvoimat simulaatioista ja lastuamiskokeista [21]

Lastuamislämpötilan tutkimus on usein ollut toissijaista, lastuamisvoimien tai terän kulumisen yhteydessä simulaatioista hankittua tietoa. Vaikein seikka lastuamislämpötilojen tutkimuksessa on sen mittaaminen. Aikaisemmin parhaaseen tulokseen on päästy k-termoelementtejä käyttäen kipinätyöstämällä termoelementti teräpalan sisään lastuavan särmän läheisyyteen. Tällöinkin saadaan "yleinen" käsitys teräpalassa vallitsevasta lämpötilasta. Myöskään luotettavaa lämpötila-

käyrää ajan funktiona ei voida laatia termoelementin viiveen takia. Nykyisin IR (infra red) tekniikan kehityttyä lämpökamerojen ja IR-sensoreiden ja lämpömittarien muodossa, voidaan mitata tarkempia lastuamislämpötiloja ja luoda jopa lämpötilajakauma lastuamisrajapinnalta. Tämän työn kokeellisessa osuudessa (kappale 6.3) on tehty lastuamiskokeita, joissa lastuamislämpötilaa on mitattu lämpökameralla. Aiheesta on kirjoitettu myös konferenssijulkaisussa "Thermographic Temperature Measurement on the Tool and the Workpiece during Milling", jonka kirjoittajat Graf von der Schulenburg ja Uhlmann ovat tehneet tutkimusta myös elementtimallinnuksen parissa. Työssä pohditaan jyrsinnän lämpötilan mittaamista. Koska työkalu on monimutkaisessa liikkeessä, ei lämpökameraa ole mahdollista kuljettaa teräsärmän mukana. Näin ollen lämpötilaa on mitattava stationaarisesti työkappaleesta, jolloin lastuttavan materiaalin emissiokerroin on määritettävä. Kokeet on tehty vaakakaraisella koneistuskeskuksella. Lämpökameraa pysyy paikallaan työkalun syöttöliikkeen suhteen, mutta työkalun pyörimisliike on vapaa kameran suhteen. Lastuttava materiaali on rakenneteräs S235JR. Työkappale liikkuu lämpökamerakuvassa vertikaalisuunnassa. Kirjoittajat toteavat näin saatujen tulosten olevan kvalitatiivisia, eikä niitä voi yksistään käyttää lastuamislämpötilan arvoina. [22]

### 3.2 Kitka ja kuluminen

Kitka, kuluminen ja voitelu, tribologian keskeisimmät tutkimuskohteet ovat lastuavassa työstössä myös olennaisia ilmiöitä. Kitka vaikuttaa suoraan lastuamisvoimiin ja lämpötilaan, sekä johdannaisesti lastuamisen aikana esiintyviin jännityksiin. Suora vaikutus kitkalla on myös kulumiseen, joka on eräs tärkeimpiä tutkimuskohteita lastuavan työstön mallintamisessa. Lastuavassa työstössä kulumismekanismit ovat adheesio, abraasio, diffuusio ja elektrokemiallinen kuluminen. Näiden ja työkalumateriaalin mekaanisten ominaisuuksien vaikutus työkalun kestoikään voidaan mallintaa hyväksikäyttäen analyyttisiä malleja. [23]

E. Usui Tokion Denki Yliopistosta on kehittänyt kulumismallin, joka on laajalti käytössä lastuavan työstön mallinnuksessa, ja jota voidaan hyödyntää niin analyyttisesti kuin elementtimenetelmälläkin. Työstönaikainen kuluminen perustuu kosketusalan jännityksiin ja lämpötilaan. Usuin mallissa kulumisnopeudelle, kosketuspinnan jännityksille ja lämpötilalle on luotu yhteys. Mallissa jännitykseen ja lämpötilaan liittyvät kriittiset parametrit on mahdollista määrittää myös lastuamiskokein ilman erityislaitteistoa. Usuin 1984 julkaistussa artikkelissa on luotu analyyttinen malli kuoppa- ja viistekulumiselle. Kuva 15 esittää eri kulumismuotoja. Viistekuluminen on aina läsnä tehtäessä lastuavaa työstöä, viistekulumista tapahtuu kaikilla kulumismekanismeilla. Kuoppakulumista tapahtuu adheesion, abraasion ja diffuusion yhteisvaikutuksesta. [24][ 25]



Kuva 15. Eri kulumismuodot [3]

F.W. Taylor huomasi 1901 julkaisemassaan artikkelissa "On the art of metal cutting" jo klassiseksi muodostuneen yhteyden kulumisen ja lastuamisnopeuden välille. Taylorin kestoaikasuorassa (kaava (96)) T on terän kestoaika, V on lastuamisnopeus sekä n ja C ovat vakioita. [25][26]

$$VT^n = C \tag{96}$$

Vaikka Taylorin malli toimii hyvin käytännössä, se ei kerro itse kulumisesta mitään. Usuin malli taas on luotu kulumisnopeuden, normaalijännityksen ja lämpötilan välille, joten mallista saadaan irti myös eri kulumistekijöiden vaikutukset kulumisnopeuteen. Usuin vuonna '84 esittämä malli on esitetty kaavassa (97), jossa dW/dL on kulumistilavuus lastuttua matkaa kohden,  $\sigma_t$  on normaalijännitys kosketuspinnalla ja  $\theta$  on lastun pintalämpötila.  $C_1$  ja  $C_2$  ovat vakioita kun lastuamisparametrit pysyvät tiettyjen arvojen sisällä.

$$\frac{dW}{\sigma_t dL} = C_1 \exp(-\frac{C_2}{\theta})$$
<sup>(97)</sup>

Käytettäessä Usuin mallia kaavan (97) vakiot on määritettävä lastuamiskokein, ja lastunlämpötila, kosketuspinnan jännitys on laskettava analyyttisin kaavoin. Tänä päivänä Usuin kulumismallia hyödynnetään laajalti mallinnettaessa lastuavaa työstöä elementtimenetelmällä. Elementtimenetelmää käytettäessä vakiot saadaan suoraan mallista ja analyyttistä laskentaa ei tarvitse suorittaa. Mallista saadaan myös jännityksen ja lämpötilan arvot. Näin ollen Usuin mallilla saavutetaan hyvä tarkkuus, ja malli soveltuu käytettäväksi elementtimenetelmällä mainiosti. [24][25]

Xie, et al. Karlsruhen Yliopistosta [27] ovat tehneet kulumissimulaatioita ja kokeita käyttäen Usuin mallia vastaavaa kulumisyhtälöä. Työssään herrat käyttivät Abaqusta tehden 2D simulaatiota sorvaamisesta. Vuonna 2005 julkaistussa työssä käytetty elementtimalli on nykymittapuulla alkeellinen varsinkin verrattaessa kaupallisiin lastuamiskoodeihin. Alkeellisuudesta huolimatta tulokset olivat uskottavia ja tulokset vastasivat mitattuja koearvoja, mutta 20 sekunnin lastuamisen jälkeen simuloitu kuluminen on aivan liian pientä. Julkaisussa arvioitiin mainitun ilmiön syitä; eri lähteistä poimittujen materiaalien kulumisominaisuuksien yhteensopimattomuus, yksinkertaistettu kitkamalli ja kitkakerroin, materiaalimalli on tehty toiselle materiaalille ja huono verkotuskontrolli terä-lastu rajapinnalla. Kuva 16 esittää kulumisen etenemisen simulaatiossa lastuamisen eri vaiheissa. [27]



Kuva 16. Terän kulumisprofiilit a) 0 s. b) 5 s. c) 46 s. [27]

Teränkulumista on simuloitu useiden tutkimusten voimin käyttäen 2Dortogonaalista lastuamismallia. Attanasio, Ceretti, Rizzuti, Umbrello ja Micari kirjoittavat vuonna 2008 julkaisemassaan tutkimuksessa 2D-simulaatioista opittujen kulumismallien soveltamisesta 3D-simulaatioihin. Tutkimuksessa käytettiin lähtökohtana muokattua Takeyama-Muratan kulumisyhtälöä kaava (98). Yhtälössä D on materiaalivakio, E aktivaatioenergia, R on kaasuvakio (Avogadron luvun ja Boltzmannin luvun tulo) T on lokaali lämpötila Kelvineissä. [28]

$$\frac{\partial w}{\partial t} = D \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$
<sup>(98)</sup>

Työssä simuloitiin kulumiskuopan ja kulumisviisteen muodostumista Deform 3D ohjelmistolla. Suoritetuista simulaatioista saadut tulokset vastaavat hyvällä tarkkuudella mitattuja tuloksia. Seuraavat kuvat (Kuva 17 ja Kuva 18) esittävät työssä saatuja tuloksia. [28]



Kuva 17. Viistekulumisen arvot simuloituna ja kokeellisesti [28]



Kuva 18. Kuoppakulumisen arvot simuloituna ja kokeellisesti [28]

Thomas Childs kirjoittaa 2006 julkaisemassaan artikkelissa kitkan mallintamisesta lastuamisprobleemassa [29]. Koska lastuavassa työstössä on suurten kosketusjännitysten myötä suuret kitkavoimien arvot, on kitka ollut jo useiden vuosikymmenten ajan tutkijoiden mielenkiinnon kohteena. Elementtimenetelmää käytettäessä lastuavan työstön sovelletuin kitkalaki (kaava (99)) on Usuin ja Shirakashin käsialaa. Kaavassa (99) $\tau_{fric}$  on kitkan aiheuttama leikkausjännitys,  $\mu$  kitkakerroin,  $\sigma_n$  normaalijännitys ja  $\overline{\sigma}$  lastuttavan materiaalin muodonmuutoslujuus. Finnien ja Shawnin esittämä alkuperäinen muoto empiirisesti saadusta kitkamallista esitetään kaavassa (100) [30]. Kaavassa esiintyy  $A_r$  ja  $A_n$  jotka ovat todellinen kontaktipinta ja nimellinen kontaktipinta sekä vakio B ja nimellisjännitys  $\sigma_n$ .

$$\tau_{fric} = \mu \sigma_n \quad \text{kun} \quad \mu \sigma_n < \frac{\overline{\sigma}}{\sqrt{3}}$$

$$\tau_{fric} = \frac{\overline{\sigma}}{\sqrt{3}} \quad \text{kun} \quad \mu \sigma_n \ge \frac{\overline{\sigma}}{\sqrt{3}}$$

$$\frac{A_r}{A_n} = 1 - e^{-B\sigma_n}$$
(100)

Julkaisussaan Childs esittää parannusehdotuksia nykyiseen kitkamalliin ja tutkii lastuamisen kontaktiprobleemaa syvällisemmin. Ongelma nykyisessä kitkamallissa on, että alkuperäisessä muodossaan kaavassa (100) esiintyy vakio *B* joka on riippuvainen kosketuspintojen materiaalien elastis-plastisista ominaisuuksista. Lastuamisen mallinnuksessa tehdään oletus, että *B* pysyy samana koko terä-lastu kosketuspinnan alueella vaikka todellisuudessa näin ei ole. Plastisessa kosketuksessa kitkan aiheuttama jännitys ei ole Coulombin kitkalain mukaisesti suoraan verrannollinen normaalijännitykseen. Näin ollen terän kärjen ja lastun alkukohdan kosketuksessa (jossa vallitsee plastinen kosketus) tyypillisesti käytetty kitkamalli ei päde.

Childs esittää uutta mallia kitkakertoimelle, jossa kitkakertoimen arvo  $\mu$  kasvaa plastisen muodonmuutosnopeuden  $\overline{\mathscr{A}}^{p}$  kasvaessa (kaava (101)). Kaavassa *a* on vakio, jonka arvo on luokkaa lastunpaksuus jaettuna lastuamisnopeudella. Tällaisella kaavalla kitkamalli pätee koko terä-lastu kosketuspinnan alueella. Tyypilli-

sesti lastuamisen mallintamisessa ilmenevä lastuamisvoimien korostunut suuruus voi hyvinkin olla kytköksissä kitkamallin epätarkkuuksiin. [29]

$$\mu = \mu_0 (1 + a \overline{\mathbf{a}}^p) \tag{101}$$

Arrazola, Ugarte ja Domínguez pohtivat kitkan tunnistamista lastuamisprosessissa elementtimenetelmää käyttäen. Lastuavaa työstöä mallinnettaessa tarvittavat työstömateriaalin virtausparametrit hankitaan "Split-Hopkinson" koejärjestelyllä, (jolla tutkitaan materiaalien dynaamista jännitys-venymävastetta), jossa on lämmityslaite, jolla materiaalin lämpötila saadaan lastuamistilanteen tasalle noin 500-1000 °C. Myös Pin-On disc kokeilla hankittuja kitkan arvoja käytetään. Ongelmana ovat lastuamisessa ilmenevät suuret voimat ja lastuttavan materiaalin korkea plastisen muodonmuutoksen aste. Näin ollen koejärjestelyillä hankitut parametrit eivät vastaa täysin parametreja lastuamisessa. Arrazolan et al. julkaisun tavoitteena on painottaa terä-lastu kosketuspinnalla esiintyvien materiaaliteknisten ja mekaanisten ilmiöiden merkitystä lastuamisprosessiin, ja esittää uusi kitkanmallinnusmenetelmä, joka kuten Thomas Childsinkin esittämä malli, huomioisi lastuavan särmän läheisyydessä vallitsevat erityisolosuhteet. [31]

Tyypillisesti suurimmat epätarkkuudet lastuamisessa esiintyvät syötön suuntaisessa lastuamisvoimassa ja terä-lastu kosketuspinnan pituudessa. Erityisesti pienillä syötön arvoilla hankausilmiöt vaikuttavat lastuamiseen, joten niiden mallintaminen oikein on virheen kannalta hyvin tärkeää. Koska Coulombin kitkalaki ei päde täysin siinä muodossaan, missä se tyypillisesti esitetään, käytetään keskimääräisen kitkakertoimen määrittämiseksi Albrechtin menetelmää. Ideana on esittää lastuamisvoimakomponentit  $F_f$  ja  $F_c$  toisten lastuamisvoimakomponenttien P:n ja Q:n avulla. P on voima, joka aiheutuu ainoastaan teräsärmän läheisyydessä tapahtuvista hankausilmiöistä ja Q on puhtaasti lastuamisesta aiheutuva voima. Kuva 19 esittää mainitut lastuamisvoimakomponentit havainnollisesti. [31]



Kuva 19. Lastuamisvoimakomponentit Q ja P [31]

Myös nämä voimat voidaan jakaa lastuamispinnan tangentin ja normaalin suuntaisiin komponentteihin, jolloin päästään kaavaan (102), joka on myös Coulombin kitkan määritelmä. Näin tehtäessä todetaan myös, että ainoastaan voima Q on tarpeellinen kitkakertoimen määrittämiseksi. Kaavassa esiintyvät voimakomponentit voidaan määrittää kuvaajan avulla, jossa lastuamisvoimat  $F_f$  ja  $F_c$  on esitetty toistensa funktiona kuten Kuva 20 esittää. Kuvaajan lineaarisen alueen kulmakertoimen argustangentti vastaa kulmaa  $\eta$ . Kulma  $\gamma$  on lastuamisparametri, joten se tunnetaan. Koska lineaarisella alueella ainoastaan voima Q on merkittävä tekijä, voidaan se korvata kulmien summan tangentilla, kuten kaavassa (103) on tehty. [31]

$$\mu_A = \left(\frac{Q_T}{Q_N}\right) \tag{102}$$

$$\mu_{A} = \tan(\eta + \gamma) = \tan(\arctan\left(\frac{dF_{f}}{dFc}\right)_{ZONE:A} + \gamma)$$
<sup>(103)</sup>



Kuva 20. Lastuamisvoimakomponentit toistensa funktiona [31]

Käytettäessä edellä esitettyä menetelmää kitkakertoimen määrittämiseksi on tehtävä lastuamiskokeita, joista tulee määrittää päälastuamisvoima sekä syöttövoima ja terän ja lastun kosketusalan pituus. Työssä tehtyjen kokeiden perusteella kitkakertoimen arvoksi saatiin 0,251 0,228 ja 0,227 jossa taulukkoarvo vastaavalle materiaaliparille on 0,230, joten menetelmä näyttäisi antavan uskottavia tuloksia. Vaikeutena menetelmässä on määrittää kriittinen syötön arvo, jonka jälkeen lastuamisvoimakuvaaja alkaa edetä lineaarisesti. Työssä pyrittiin toistamaan kokeet elementtimenetelmällä, ja näin todentamaan teorian toimivuutta simulaatioissa. Simulaatioista laskettu kitkakerroin antaa saman tuloksen kuin syötteenä simulaation parametreiksi annettu kitkan arvo. On huomioitava että tämä ei ole mitenkään itsestään selvää, sillä Albrechtin menetelmää ei ole ohjelmoitu simulaatioon, joten kitkan arvo on laskettu täysin johdannaisena lastuamisvoimista ja kulmista. Epälineaarisella alueella (pienillä syötön arvoilla) esiintyy edelleen epätarkkuuksia johtuen kitkamallista ja hankausilmiöistä. Tähän kirjoittajat ovat ottaneet kantaa huomioiden myös P-voimakomponentin ja siten muodostaneet terän ja lastun kontaktipinnan mukaan muuttuvan kitkakertoimen. Tällaisella kitkamallilla uudelleen suoritetut simulaatiot tuottivat paremman tuloksen kuin vakiokitkamallilla, virheen pudotessa 50 prosentista 10 prosenttiin. [31] Uuden kitkamallin eduksi voidaan lukea sen samankaltaisuus Coulombin kitkamallin kanssa, sekä sen helppo ymmärrettävyys, mutta toisaalta erityisesti FEM-simulointia ajatellen malli vaatii huomattavan määrän koedataa, ja koedata on tapauskohtaista, joten malli on vaikea ohjelmoida yleiseen muotoon. Verraten Childsin esittämään malliin, jossa kitkakerroin muuttuu muodonmuutosnopeuden funktiona, joka on suoraan ohjelmoitavissa FEM-koodiin, on edellä esitetty malli kömpelö, joskin havainnollinen.

Lorentzon ja Järvstråtin Inconel 718 koneistuksessa esiintyvän kulumisen mallintamista käsittelevä tutkimus on kirjoitettu vuonna 2008. Inconelia koneistettaessa lämpötila ja lastuamisvoimat nousevat erittäin suuriksi, joka aiheuttaa voimakasta kulumista lastuavaan terään. Työssä todetaan Usuin kulumismallin olevan laajalti käytetty ja hyväksytty ("state-of-the-art in modelling of machining"), mutta Inconelia koneistettaessa malli ei ole antanut riittävän tarkkoja tuloksia varsinkaan terän kärjen alueella. Tutkimuksessa lähdetään luomaan rinnakkain kulumismallia kitkamallin kanssa. Kitka ja kuluminen ovat läheisesti toisiinsa liittyviä ilmiöitä, joten tutkimuksen pyrkimys on kunnioitettava. Työssä käydään läpi kulumisen ja kitkan mallinnuksen eri kehitysvaiheita, joista toimivimmat on otettu mukaan tutkimuksessa tehtävään malliin. Kitkamalleja on kolme, normaali Coulombin kitkamalli, Usuin mallia vastaava leikkausjännitysperustainen kitkamalli sekä Coulombin kitkamalli muuttuvalla kitkakertoimella. Näitä malleja on käytetty eri kohdissa lastuavaa särmää soveltuvin osin, niin että kitkakerroin on eri lastuavan särmän eri kohdissa. Kulumismallina on käytetty lähinnä Usuin mallia pienin muutoksin. Työn loppu tulemana todettiin, ettei vakiotermisellä Coulombin kitkamallilla voida päästä todellisiin kulumistuloksiin kulumismallista huolimatta. Eri kitka- ja kulumismalleilla tehtyjen kokeiden tulokset vaihtelivat riippuen siitä millaista kombinaatiota malleista käytettiin. Kuoppakulumisen syvimmän kulumiskohdan paikan määrittäminen tuli esiin suurimpana ongelmana. Voidaan todeta, että suurin yksittäinen tekijä kulumisen mallintamisessa on kitka, ja kitkamallin kehittäminen paremmin lastuamisongelmissa toimivaksi on tärkeää lastuamisen mallintamisen alalla. [32]

Professori Özel kirjoittaa kitkan mallintamisen tärkeydestä vuonna 2006 julkaisemassaan artikkelissa [33]. Lastuamisen mallintamisessa on kaksi tärkeää ja selkeästi simuloinnin tuloksiin vahvimmin vaikuttavaa tekijää, lastuttavan materiaalin virtausjännityskäyttäytymisen malli eli konstitutiivinen yhteys jännityksen ja venymän välillä, sekä kitkamalli terä-lastu rajapinnalla. Työssään Özel tutkii eri kitkamallien vaikutusta lastuamisen FEM simulaatioon. Nykyisellään, kuten Özelkin kirjoittaa, ei lastuamisen mallintamiseksi ole yhtä universaalia mallia, vaan erilaisille työmateriaaleille ja eri prosesseille on omat mallinsa, jotka kaupallisissa sovelluksissa on "kätketty" käyttöliittymän taakse ohjelmakoodiin. Työssä simuloitiin samaa probleemaa viidellä eri kitkamallilla; (I) vakiokertoiminen leikkausjännitysperustainen kitkamalli, (II) edellä mainittu malli leikkauspinnalla ja Coulombin kitka terän ja lastun välisellä liukupinnalla, (III) vaihtuvakertoiminen leikkausjännitysperustainen kitkamalli koko terä-lastu rajapinnalla, (IV) vaihtuva kitkakerroin koko terä-lastu rajapinnalla, (V) kohtaa (III) vastaava malli leikkauspinnalla ja kohtaa (IV) vastaava malli liukupinnalla. Kuva 21 esittää simulaatioiden tulokset ja lastuamiskokeista saadut arvot lastuamisvoimille, terän ja lastun kosketuspituudelle, liukukulmalle ja maksimilämpötilalle. Kuvasta nähdään että vaihtuvakertoimiset kitkamallit tuottivat parhaat tulokset. Özelin tulokset vahvistavat kitkatutkimuksen tarpeellisuutta lastuavan työstön mallintamisen kannalta. [33]

	$F_c$ (N/mm)	$F_t$ (N/mm)	$l_c (\mathrm{mm})$	$\phi$ (degree)	$T_{\max}$ (°C)
	174	83	0.6	18.8	590
Predicted	Values from	FE Simulation	ns		
Friction Model	$F_c$ (N/mm)	$F_t$ (N/mm)	$l_c (\mathrm{mm})$	$\phi$ (degree)	<i>T<sub>max</sub></i> (°C)
Ι	270	108	0.38	20.9	607
Π	283	126	0.38	21.3	450
III	265	101	0.34	21.1	600
IV	272	115	0.47	18.4	620
V	297	140	0.51	17.8	489

Experimental Results,

Kuva 21. Simulaatiotulokset eri kitkamalleilla, yllä koetulokset [33]

## 3.3 Jäännösjännitykset

Jäännösjännitykset ovat yksi mielenkiintoisimpia tutkimuskohteita lastuavan työstön simuloinnissa. Jäännösjännitysten vaikutus lopullisen tuotteen lujuusominaisuuksiin on merkittävä; väsyminen, viruminen, murtumien syntyminen särönkasvun kautta ja muut jännitystilasta riippuvat kulumismekanismit ja lujuusominaisuudet tyypillisesti heikkenevät jos tuotteen pinnassa on vetojännitystila. Lisäksi jäännösjännitykset saattavat aiheuttaa tuotteen dimensioiden vääristymiä, erityisesti ohutseinäisissä tuotteissa. Jäännösjännitystilan ennustaminen simuloinnin avulla helpottaisi tuotteen valmistuksen suunnittelua ja vähentäisi hylkytuotteiden ja testauksen määrää.[34][35]

Lastuavan työstön aiheuttamat jäännösjännitykset ovat seurausta mekaanisesta ja termisestä muokkauksesta. Hans Gripenbergin julkaisussa pohditaan jäännösjännitysten syntymekanismeja ja jännityksiä ennakoivia malleja eri tutkijoiden teorioiden pohjalta. Lastuava työstö aiheuttaa pintaan joko leikkausjännitystä, tai sekä leikkaus- että puristusjännitystä. Työstettävän materiaalin ominaisuuksista ja lastuamisparametreista riippuen pintaan jäävä jännitys voi olla leikkaus- tai puristusjännitystä. Lastuamisnopeus ja syöttö todetaan tärkeimmiksi jännitystilaan vaikuttaviksi parametreiksi. Työstettävän pinnan lämpeneminen aiheuttaa leikkausjännityksen osuuden kasvua jäännösjännityksissä. [36]

Tohtori Marusich ja FEM-ohjelmistotalo Third Wave Systems on tehnyt yhteistyötä useiden yritysten kanssa. Yhteistyön hedelmiä on E. Askarin Boeingilta ja Marusichin kirjoittama julkaisu jäännösjännityksistä "Modeling Residual Stress and Workpiece Quality in Machined Surfaces" [12]. Julkaisu käsittelee Al7050 alumiinin otsapinnan sorvaamisesta syntyneiden jäännösjännitysten simulointia lagrangen formuloinnilla toteutetulla eksplisiittisellä elementtiratkaisijalla (Ad-Edge). Simulaatio on tehty ortogonaalisuusoletusta käyttäen 2Dvant tasotapauksena. Koska jäännösjännitykset riippuvat materiaalin elastis-plastisista sekä termomekaanisista ominaisuuksista, on simulaation lopuksi suoritettava "rentoutus" (ENG. relaxation), jotta lämpölaajenemisesta aiheutuneet jännitykset vapautuvat ja lopullinen jäännösjännitysjakauma jää jäljelle. Jäännösjännitykset on mitattu koekappaleista reiänporausmenetelmällä, josta syntyy epätarkkuutta erityisesti mittaussyvyyden alkuun. Kuva 22 esittää kokeiden tulokset, joista huomataan että suurimmat koearvot vastaavat simuloituja arvoja hyvällä tarkkuudella, joskin simuloidun jäännösjännityksen maksimiarvo on hieman suurempi ja syvemmällä kuin kokeellisissa tuloksissa. Elementtimenetelmällä simuloitujen lastuamisvoimien on yleisesti todettu olevan jonkin verran suurempia kuin mitattujen voimien, joten voidaan spekuloida, josko tutkimuksessa saatu jäännösjännityksen liian suuri arvo johtuu juuri tästä. Jäännösjännitysten ja lastuamisparametrien välille ei saatu selkeää yhteyttä, joskin jäännösjännitysten jakaumia syntyi kahta tyyppiä: hammaskohtaisen syötön kasvaessa 0.1 millimetristä 0.3 millimetriin tapahtui muutos jännitysten suunnassa, jäännösjännitysten muuttuessa vetojänni-tyksestä puristukseksi (katso Kuva 23). Näin ollen merkittävimmäksi parametriksi osoittautui syötön suuruus, joka vahvistaa Gripenbergin julkaisussa esiintuotua olettamusta syötön ja lastuamisnopeuden osuudesta.



Kuva 22. Jäännösjännityskokeiden ja simulaation tulokset [12]



Kuva 23. Syötön vaikutus jäännösjännityksiin [12]

Aihetta ovat tarkastelleet myös Outeiro, Umbrello, Pina ja Rizzuti julkaisussaan "Modelling of Tool Wear and Residual Stress during Machining of AISI H13 Tool Steel" [34]. Julkaisun fokus on jäännösjännitysten kannalta kriittisimpien lastuamisparametrien tarkastelu ja työkalun kulumisen vaikutus jäännösjännityksiin. Outeiro et al. käyttivät julkaisussaan Deform-2D ohjelmistoa. Työkalun kuluminen mallinnettiin Usuin mallia käyttäen. Työstettävä materiaali on työkaluteräs AISI H13. Simuloidut tulokset varmennettiin jäännösjännityskokein, jonka tulokset on esitetty seuraavassa kuvassa (Kuva 24). Huomataan että simuloidut arvot seuraavat mitattuja arvoja erittäin hyvällä tarkkuudella. Kuvasta nähdään toinen Marusichin julkaisussaan määrittämä tyypillinen jäännösjännitysprofiili, jossa on pinnassa vetojännitystä ja heti pinnan alapuolella puristusta [12]. Syvemmälle mentäessä kuvaaja lähestyy tasaisesti jännityksetöntä tilaa. [34]



Kuva 24. Simuloitu jäännösjännitysjakauma ja mitatut arvot [34]

Lastuamisparametrien vaikutus jäännösjännityksiin tutkittiin simuloimalla samaa lastuamistapausta eri lastuamisparametreilla. Lastuamisnopeuden kasvaessa pinnassa vallitseva vetojännitysalue pieneni. Lastunpaksuuden pienentäminen vaikutti molempiin sekä puristus- että vetojännityksen arvoihin pienentäen jännityksen itseisarvoa. Työkalun lastuavan särmän viimeistelyn vaikutuksesta saatiin tulokset, joiden mukaan viisto hionta aiheuttaa korkeamman vetojännitystilan pintaan ja pienemmän puristusjännityksen, mutta syvemmälle kuin pyöreäksi hiotulla teräsärmällä. Terän kulumisen vaikutus jäännösjännityksiin on myös merkittävä (Kuva 25). Uudella terällä pinnan puristusjännitykset ovat alle 200 MPa, missä kulunein terä aiheuttaa yli 400 MPa. On huomattava että simulaatioissa käytettyjen kuluneiden terien käyttöaika on ollut kuitenkin vain korkeimmillaan 20 sekuntia, joten kulumisen vaikutusta eritoten pitkällä aikavälillä voidaan pitää merkittävänä. Tuloksista päätellään, että jäännösjännitysten minimoimiseksi lastuamisnopeuden tulisi olla suuri, lastunpaksuuden eli syötön suuruuden pieni, lastuavan särmän viimeistely tulisi ennemmin olla pyöreäksi hiottu kuin viistetty, ja terän kuluminen tulisi pitää hallinnassa. [34]



Kuva 25. Terän kulumisen vaikutus jäännösjännityksiin [34]

Ee, Dillon ja Jawahir ovat julkaisseet tutkimuksen jäännösjännitysten mallintamisesta elementtimenetelmällä [35]. Vuonna 2005 tehdyssä tutkimuksessa käsitellään aikaisempia tutkimuksia aiheesta ja otetaan kantaa menetelmän kehityksen tuomiin muutoksiin tulosten tarkkuudessa ja mallin oikeellisuudessa. Julkaisussa kritisoidaan lastunirtoamiskriteerin käyttöä aikaisemmissa tutkimuksissa, koska sen käyttö vääristää lastuavan särmän ympärillä tapahtuvaa muodonmuutoskenttää. Lastunirtoamiskriteeri määrää milloin lastuttavasta työkappaleesta poistetaan elementtejä teräsärmän läheisyydestä siten, että osa kappaleesta muodostaa lastun ja toinen osa pysyy työkappaleena. Lastunirtoamiskriteerejä on tyypillisesti jännitysperustaisia ja siirtymäperustaisia, kun sallittu siirtymä tai jännitys ylittyy elementissä, tämä elementti poistetaan kokonaan. Tästä aiheutuu myös työkappaleen materiaalin tilavuuden pienentymistä. Fysikaaliselta kannalta lastunirtoamiskriteeri on keinotekoinen, koska se vaatii ennalta määrätyn vyöhykkeen jolta lastua tulee irtoamaan. Moderni keino lastunmuodostuksen mallintamiseksi onkin adaptiivinen udelleenverkottaminen, jolla liiallisesti deformoituneet elementit teräsärmän edellä muodostetaan uudelleen, jolloin materiaali pääsee virtaamaan lastuavan särmän molemmin puolin. Julkaisussa kirjoittajat kritisoivat myös Maruschicin ja Askaran tutkimuksessa käytettyä konstitutiivista yhteyttä Power Law, jonka materiaaliparametrit on tarkoitettu suurempien venymien tarkasteluun.

Omassa tutkimuksessaan Ee, Dillon ja Jawahir käyttävät muunneltua versiota Johnsson-Cook materiaalimallista. Tutkittaessa lastuamisprobleemia joissa on alhainen muodonmuutosnopeus alkuperäinen J-C materiaalimalli voi antaa muodonmuutoslujuuden arvoja, jotka ovat alle materiaalin myötörajan. Tästä syystä malliin on lisätty elastinen osuus, jotta materiaalin käyttäytymistä ei-Newtonisena nesteenä voidaan mallintaa. Lastunmuodostumisen mallintamiseksi on käytetty adaptiivista uudelleenverkottamisalgoritmia teräsärmän läheisyydessä, jonka ansiosta jäännösjännitysten ja muodonmuutoskentän tarkkuus mallissa on parempi kuin lastunirtoamiskriteeriä käytettäessä. Myös materiaalin termomekaanisen käyttäytymisen vaikutus muodonmuutokseen on otettu huomioon. Tutkimuksessa mallinnettiin ortogonaalista otsapinnan sorvaamista. Tyypillinen sorvaustapaus, joka on esitelty tässä työssä sorvaamista käsittelevässä luvussa 2.1.1 (Kuva 4) ei ole ortogonaalinen lastuamistapaus, joten sen mallintaminen 2D-simulaatiolla ei tuota haluttuja jäännösjännitysten arvoja. Simulaatiosta saadut jäännösjännitykset (Kuva 26) vastaavat tekijöiden mukaan hyväksyttävällä tasolla kokeellisesti saatuja tuloksia. Jäännösjännityskuvaaja ei vastaa Maruschicin ja Askaran saamia "tyypillisiä" jäännösjännitysprofiileja. Tutkimuksessa tarkasteltiin myös usean lastuamiskerroksen vaikutusta jäännösjännitysprofiiliin. Periaatteellisella tasolla ensimmäisen lastun aikaansaama jäännösjännityskenttä on seuraavien lastujen alkutila, josta seuraa uudenlainen jännityskenttä joka riippuu lastuamiskerrosten lukumäärästä. Tutkimuksessa tulokset käytännössä skaalautuivat pienemmiksi,

neljännen lastun jälkeen noin puoleen alkuperäisestä jännitysprofiilin maksimiarvosta. Lastuamisnopeuden vaikutus suurimman muodonmuutosnopeuden arvoon on lähes lineaarinen, mutta jäännösjännitysten arvoihin lastuamisnopeudella ei tutkimuksessa huomattu olevan suurta vaikutusta. Lastuamisnopeuden nostaminen kolmesta viiteen metriä sekunnissa laski jäännösjännitysten maksimiarvoa ainoastaan 0.01 GPa:n verran. [35]



Kuva 26. Jäännösjännitysten arvo syvyyden funktiona [35]

Vuotuisessa 2008 CIRP'n (College International pour la Recherche en Productique) annaalissa julkaistussa artikkelissa paljon alan tutkimusta tehneet Outeiro ja Jawahir tekevät yhteistyönä tutkimusta Pinan, M'Saobin ja Pusavecin kanssa. Artikkeli käsittelee kuivana koneistamisen aiheuttamia jäännösjännityksiä AISI 316L ja Inconel 718 metalliseoksissa ja niiden mallintamista 3D elementtimallilla. Tutkimuksessa käytettiin Deform 3D ohjelmistoa. Materiaalit on valittu ydinvoimalateollisuuden ja lentoteollisuuden käyttämistä tyypillisistä vaativiin olosuhteisiin suunnitelluista materiaaleista. Tutkimustulokset vahvistivat tyypillisiä oletuksia koneistetun pinnan jäännösjännityksistä, pinnan (0-10 μm) ollessa vetojännityksen alaisena ja syvemmällä (10-25 μm) puristusjännityksen alaisena. Lastunpaksuuden vaikutusta jäännösjännityksiin korostetaan. Mielenkiintoinen havainto on, että käytettäessä pinnoitettua teräpalaa jäännösjännityksen itseisarvot ovat suurempia kuin pinnoittamatonta teräpalaa käytettäessä. [37] Umbrello, Ambrogio, Filice ja Shivpuri ovat kirjoittaneet artikkelin jäännösjännityksistä hieman erilaisesta näkökulmasta. Tutkimuksessa esitellään elementtimenetelmän ja neuroverkon yhteiskäyttöä jäännösjännitysten ennustamiseksi koneistettavassa kappaleessa. Neuroverkko tarvitsee tyypillisesti suuren joukon mallidataa verkon opettamisvaiheessa, jonka hankkiminen lastuamiskokeilla on kallista ja aikaa vievää. Elementtimenetelmällä saadaan suhteellisen nopeasti ja edullisesti riittävän tarkkaa mallidataa neuroverkon opettamiseksi, joten menetelmien yhteiskäyttö vaikuttaisi lupaavalta. Näin meneteltäessä ei kuitenkaan vältytä verifiointikokeilta, jotka täytyy suorittaa lastuamiskokein ja verrata tuloksia simuloituihin. Tosin neuroverkon hyödyntäminen vähentää kokeellisten menetelmien osuutta edelleen verrattuna pelkän elementtimenetelmän käyttöön kokeellisten menetelmien rinnalla. Neuroverkon ongelma on, ettei se kerro prosessista uutta tietoa vaan antaa pelkästään muuttujiin perustuvaa tulosdataa. Edellä esiteltyjen tutkimusten valossa, joiden tulokset osittain tukevat toisiaan ja toisaalta ovat ristiriidassa, neuroverkon käyttöä voidaan suositella silloin, kun tarkastellaan tietyn materiaalin jännityksiä prosessiparametrien funktiona. Opetusdatan on oltava riittävän tarkkaa, jotta tulokset olisivat luotettavia. Näin ollen elementtimenetelmällä saatava data on verifioitava tarkasti. Neuroverkkoa käytettäessä erityisen kiinnostavaa on neuroverkon antaessa lastuamisparametreille optimaaliset arvot suhteessa haluttuun jännitysprofiiliin. Näin säästetään kokeellista työtä ja elementtimenetelmällä tehtäviä analyysejä, kun simulaatioiden pohjalta ei tarvitse "arvata" optimaalisia lastuamisarvoja. [38]

M. Salio Fiatin tutkimuskeskuksesta sekä Berruti ja De Poli ovat tehneet julkaisun turbiininpyörän sorvauksen aiheuttamien jäännösjännitysten arvioinnista. Tutkimuksessa käytettiin elementtimenetelmää MSC.Marc ohjelmistolla. Tulokset verifioitiin analyyttisillä malleilla sekä röntgendiffraktiomittauksilla todellisesta kappaleesta. Turbiininpyörän jäännösjännitykset saattavat olla jopa 800 MPa vetoa 100 µm syvyyteen saakka, joka laskee tuotteen rakenteellista lujuutta ja elinikää radikaalisti. Näin ollen on tärkeää saada tietoa lastuamisen aiheuttamista jännityksistä ja mahdollisesti optimoida lastuamisparametreja niin, että jäännösjännityksistä saadaan mahdollisimman pienet, tai jännitysten suunta saataisiin puristukseksi. Työssä käytettiin 2D mallia, jonka perusteltiin olevan riittävä, koska käytössä olevan pyöreän R-tyypin teräpalan aiheuttamat jäännösjännitykset ovat teräpalan säteen suuntaiset. Simulaatiossa on tehty mielenkiintoinen laskentaa nopeuttava toimenpide, työstettävä kappale on mallinnettu kahdesta osasta jotka on kiinnitetty reunaehdoilla toisiinsa. Näin meneteltäessä voidaan generoida tarkempi elementtiverkko poislastuttavaan osaan, ja kevyempi verkko syvemmälle perusainetta. Työssä saadut tulokset on esitetty seuraavassa kuvassa (Kuva 27). Kuvasta nähdään tyypillinen jäännösjännitysprofiili, pinnassa esiintyvän vetojännityksen laskiessa syvemmälle mentäessä puristusjännitykseksi ja tasoittuen jännityksettömään tilaan. [39]



Kuva 27. Jäännösjännitysprofiilit eri lastuamissyvyyksillä ja kokeellisesti saadut arvot [39]

### 3.4 Materiaalimallit

Yksi tärkeimpiä tekijöitä lastuavaa työstöä mallinnettaessa on materiaalimalli. Materiaalimallin muodonmuutosparametrit saadaan Split-Hopkinson kokeesta (SHPB, Split Hopkinson Pressure Bar) tai ortogonaalisista lastuamiskokeista. Materiaalit käyttäytyvät eri kuormitustilanteissa eri tavoin riippuen kuormituksesta, muodonmuutosnopeudesta ja lämpötilasta. Tästä syystä sopivan materiaalimallin ja siihen liittyvien materiaaliparametrien löytäminen on hankalaa. Materiaaliparametrien hankkiminen SHPB-kokeesta on myös epävarmaa, sillä kokeen olosuhteet venymien, muodonmuutosnopeuden ja lämpötilan suhteen ovat alhaisemmat kuin todellisessa lastuamistilanteessa. Ohion osavaltion yliopiston laitos Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing (ERC/NSM) on kehittänyt materiaalikirjaston MADAMS (Material Database for Machining Simulation), johon on tallennettu tutkimuksissa käytettyjä materiaaliparametreja ja materiaalimalleja. [40][41] Lastuavaa työstöä mallinnettaessa ehkä yleisin materiaalimalli, konstitutiivinen yhteys jännityksen ja venymän välille on Johnson-Cook, jota kaava (104) esittää. Kaavassa  $\sigma$  esittää kappaleessa vallitsevan jännityksen, A ja B ovat myötölujittumistermejä ja C on dimensioton muodonmuutosnopeudesta riippuvaa lujittumista kuvaava vakio. Epsilonit kuvaavat plastista muodonmuutosta  $\varepsilon_p$ , vastaavaa muodonmuutosnopeutta  $\mathscr{B}_p$  ja referenssimuodonmuutosnopeutta  $\mathscr{B}_0$ .  $T^*$  on lämpötilasta riippuva vakio joka saa arvoja nollan ja yhden väliltä. Eksponentit *n* ja *m* ovat muokkauslujittumisen ja termisen pehmenemisen volyymiä kuvaavat termit.

$$\boldsymbol{\sigma} = \left[A + B\boldsymbol{\varepsilon}_{p}^{n}\right] \left[1 + C \ln\left(\frac{\boldsymbol{\mathscr{B}}_{p}}{\boldsymbol{\mathscr{B}}_{0}}\right)\right] \left[1 - \left(T^{*}\right)^{n}\right]$$
(104)

Malli sovitetaan koearvoihin muokkaamalla mallin parametreja niin, että mallin antamien ja todellisten jännityksen erotuksen neliöiden summaa otosten ylitse minimoidaan. Mallin sovittaminen koearvoihin tehdään parametreittain, joten malli toimii oikein yhden parametrin muuttuessa, mutta ei ole varmuutta antaako malli oikeita arvoja usean parametrin muuttuessa yhtä aikaa. Milani, Dabboussi, Nemes ja Abeyaratne tutkivat mallin metodiikkaa ja pohtivat keinoja tarkkuuden parantamiseksi 2009 julkaistussa artikkelissa [42]. Artikkelissa pohditaan kuinka kaikki SHPB-koedata saadaan yksivaiheisella menettelyllä sovitettua JCmateriaalimalliin. SHPB-koe suoritetaan törmäyttämällä ammus toiseen koejärjestelyn kahdesta tangosta, joiden välissä tutkittava materiaalinäyte sijaitsee. Tankoon (Incident Bar) syntyy puristusjännitysaalto (Incident Pulse), joka etenee näytekappaleeseen. Osa jännitysaallosta heijastuu takaisin vetojännitysaaltona (Reflected Pulse) ja osa jatkaa näytekappaleen läpi seuraavaan tankoon (Transmitted Bar). Koejärjestelyn tangoissa on venymäliuskat joilla jännitysaallot mitataan. Näistä mittaustuloksista voidaan laskea kokeen aikainen näytekappaleen jännitys, muodonmuutos ja muodonmuutosnopeus. Kuva 28 esittää havainnepiirroksen koejärjestelystä. [42][43]



Kuva 28. SHPB kokeen periaatekuva [42]

Julkaisussa tutkitaan mallia ja koedatan sovittamista malliin, koska materiaalin jännitysvenymäkäyttäytyminen on vahvasti riippuvainen lämpötilasta. Koska metalleille 90-100 % plastiseen muodonmuutokseen tehdystä työstä muuttuu lämmöksi, syntyvän lämmön vaikutusta materiaalimallin jännityksiin ei voida jättää huomiotta. Kuva 29 esittää työssä laaditun uuden sovitusmenetelmän suoriutumista verrattuna vanhaan sovitusmenetelmään ja koearvoihin jännitys-muodonmuutos kuvaajassa. Uuden menetelmän antamat tulokset on esitetty kuvassa jatkuvalla viivalla, koearvot ympyröillä ja vanhan menetelmän tulokset katkoviivalla. Huomataan julkaisussakin todettu parannus tarkkuudessa. Näin ollen materiaaliparametrien vaikutukset toisiinsa voidaan olettaa, ellei todistaa olevan olemassa. [42]



Kuva 29. Sovitusmenetelmien suoriutuminen koearvoihin nähden [42]

N. Fang Utahin osavaltion yliopistosta on tehnyt herkkyysanalyysin 18 materiaalille, joiden materiaalimalli perustuu Johnson-Cook malliin. Työssä tutkitaan JCmallia Oxleyn, Zerilli-Amstrongin ja Maekawan mallien kanssa. Tutkimus suoritettiin käyttämällä JC-mallia laskemaan muodonmuutoslujuus eri venymän, muodonmuutosnopeuden ja lämpötilan arvoille. Työssä saatiin 216 000 eri parametrien kombinaatiota. Friedmanin statistista mallia (Multivariate Adaptive Regression Splines, 1991) käytettiin määrittäessä parametrien tärkeyttä tuloksia ajatellen. Tärkeimmäksi parametriksi saatiin muokkauslujittuminen tai terminen pehmeneminen riippuen lastuamisparametreista ja muista olosuhteista. Termisen pehmenemisen vaikutus lisääntyi lämpötilan kasvaessa. Muodonmuutosnopeuden aiheuttama lujittuminen todettiin vähiten vaikuttavaksi tekijäksi, näin erityisesti alumiineilla. Työssä huomataan eri materiaalien konstitutiivisen käyttäytymisen vaihtelevan suuresti, jopa sama materiaaliryhmän sisällä eri seosteiset materiaalit voivat käyttäytyä erilailla. Työn tulokset eivät ole mitenkään yllättäviä, mutta ne varmistavat ennakkoon tiedetyt prosessimuuttujien vaikutukset muodonmuutoslujuuteen. [44]

Ubrello, M'Saoubi, ja Outeiro tutkivat vuonna 2006 laaditussa artikkelissa Johnson-Cook materiaalimallin parametrien vaikutusta lastuamissimulaation tuloksiin. Tutkimuksessa käytettiin viisiä eri materiaaliparametreja Johnson-Cook materiaalimalliin AISI 316L haponkestävälle teräkselle, jonka lastuamistuloksia arvioitiin voimien, lämpötilan, lastunmuodon ja jäännösjännitysten suhteen. Työssä tehtiin 2D-simulaatioita Deform 2D -elementtiratkaisijalla, joiden tuloksia verrataan ortogonaalisista lastuamiskokeista saatuihin tuloksiin. Kuva 30 esittää ortogonaalista lastuamiskoejärjestelyä, jossa 150 mm halkaisijaltaan oleva terästanko pyörii akselinsa ympäri ja työkalu siirtyy terästangon säteen suuntaisesti työkappaleeseen lastuamisrajapinnan ollessa yhdensuuntainen työkappaleen keskiakselin suhteen. Näin meneteltäessä pyörimisnopeuden tulisi kasvaa syöttöliikkeen funktiona, sillä lastuttaessa työkappaleen halkaisija pienenee ja lastuamisnopeus ei pysy vakiona tasaisella pyörimisnopeudella. Jos lastuamispituus on lyhyt, lastuamisnopeuden muutoksen aiheuttama virhe on hyvin pieni. [45]



Kuva 30. Ortogonaalinen lastuamiskoejärjestely [45]

JC-materiaalimallissa käytetyt parametrit saatiin SHPB-kokeista, lastuamiskokeista ja analyyttisistä lastuamismalleista joiden syötedatana käytettiin lastuamiskokeista saatua dataa. Parhaat tulokset simulaatioista saatiin Oxleyn analyyttisen ortogonaalin lastuamismallin pohjalta hankituilla materiaaliparametreilla, jonka virhe lastuamisvoimien osalta on alle 2 %, missä muilla malleilla virhe oli jopa yli 30 %. Parametrien määrittämistä Oxleyn mallilla tutkivat Tounsi et al. vuonna 2002 julkaistussa artikkelissa [46]. Lämpötilojen laskentaan mikään malli ei antanut hyväksyttävää tulosta virheen ollessa parhaimmillaankin 200 °C. Lastunmuodot eri materiaaliparametreilla esitetään seuraavassa (Kuva 31). Edelleen parametrit, joilla saatiin parhaat tulokset lastuamisvoimien suhteen, tuottivat parhaimman lastunmuodon. Myös jäännösjännitysten suhteen samat parametrit tuottivat parhaimman profiilin, jotka Kuva 32 esittää syvyys-jännitys kuvaajassa. Materiaaliparametrien valinnalla on suuri merkitys simulaatiotuloksiin, kuten Umbrellon julkaisun tuloksetkin osoittavat. Materiaaliparametrit, jotka on hankittu analyyttisten mallien ja lastuamiskokeiden yhteiskäytön tuloksena, ovat selkeästi muita parametreja tarkemmat, ja tuottavat muiden kuin lastuamislämpötilojen suhteen hyviä tuloksia. [45]



Kuva 31. Lastunmuodot eri materiaaliparametreilla [45]



Kuva 32. Jäännösjännitysprofiilit säteen suunnassa eri parametreilla [45]

Thomas Childs tutkii materiaalin vaikutusta lastuavaa työstöä mallinnettaessa numeerisesti vuonna 2006 julkaistussa artikkelissa [47]. Työssä on tehty tavattoman paljon lastuamissimulaatioita, kaikkiaan kuusikymmentä. Kokeiden tarkoituksena on ollut ensinnäkin tutkia aikaisemman lastuamistutkimuksen herättämiä kysymyksiä erityisesti liukuviivakenttäteorian valossa (slip-line field theory), sekä tutkia elementtimenetelmän suoriutumista lastuamisongelmien ratkaisijana.

Liukuviivakenttäteoria perustuu Merchantin 1945 [48] sekä Leen ja Shafferin 1951 [49] julkaisemiin teorioihin. Perustana on kaksidimensionaalinen plastinen virtaus, jossa eri malleihin liittyvät tietyt ehdot täyttyvät virtaukseen liittyvillä kulmilla, jotka lastuavassa työstössä ovat liukutason kulma  $\phi$ , kitkakulma  $\lambda$  ja rintakulma  $\gamma$ . Ensimmäinen Childsin työssä tutkittu kysymys liittyy normaalisuuntaisen kontaktijännityksen jakaumaan rintapinnalla, yleisesti ajatellaan jännityksen kasvavan eksponentiaalisesti lähestyttäessä teräsärmää, mutta todellisuudessa asia ei ole aina näin.

Työssä laadittiin neljä simuloitua lastuamiskoesarjaa, joilla tutkittiin mikä määrää millainen jännityskenttä rintapinnalle syntyy lastuamisen aikana. Ensimmäisessä koesarjassa tutkittiin normaalijännitysjakauman ja liukuviivakenttäteorian parametrin  $(\phi + \lambda - \gamma)$  riippuvuuksia materiaalin muodonmuutoslujuuden pienenemisestä lämpötilan noustessa toissijaisella liukutasolla. Toisen koesarjan tarkoituksena oli tutkia kitkakertoimen ja rintakulman vaikutusta. Kolmas koesarja tehtiin tutkien muokkauslujittumisen vaikutuksia lastunmuodostukseen. Viimeinen koesarja oli saatujen tulosten herkkyysanalyysi muuttamalla terän särmän kaarevuussädettä kahdesta sadasosamillistä viiteen mikrometriin. Simulaatiotulokset varmennettiin aikaisempien lastuamiskokeiden perusteella. Työssä käytettiin 19 erilaista materiaalimallia, joista suurin osa oli termisesti pehmeneviä, hieman muokkauslujittuvia ja muutama malli myös muodonmuutosnopeuden mukaan lujittuvia. Normaalijännitysjakauma todettiin noudattavan sääntöä  $(\phi + \lambda - \gamma) < 45^{\circ}$ , jolloin jakauma on tasaisesti jakautunut koko rintapinnan ja lastun kontaktipinnalle. Täpätee erityisen hyvin suurilla rintakulman arvoilla. Kun mä sääntö  $(\phi + \lambda - \gamma) > 45^{\circ}$ , jännitys kasvaa eksponentiaalisesti kohti teräsärmää. Muokkauslujittuvuuden ollessa mukana, liukuviivakenttäteorian mukaiset arvot poikkesivat täysin simuloiduista riippumatta millaisia rintakulman tai kitkakulman arvoja käytettiin. Terän särmän kaarevuussäteen muuttaminen vaikutti parametrin  $(\phi + \lambda - \gamma)$  arvoihin keskimäärin 10 % verran, joten simulaatioiden tulosten voidaan todeta olevan jokseenkin stabiileja. Lopputulemana liukuviivakenttäteorian todetaan olevan riittämätön laajan materiaaliskaalan lastuamisen tutkimiseen, erityisesti muokkauslujittuvuus aiheuttaa ongelmia, ja että tulevaisuuden lastuamiskokeet tullaan tekemään numeerisin keinoin. [47]

Childs pureutuu muokkauslujittuvuuden mallintamiseen kolmen vuonna 2009 julkaistun artikkelin voimin [50][51][52]. Elementtimenetelmällä on tunnetusti vaikeuksia mallintaa yhtäaikaisesti päälastuamisvoimaa, syöttövoimaa ja lastunpaksuussuhdetta (lastunpaksuuden suhde lastuamissyvyyteen). Childs esittää tämän syyksi lastuttavan materiaalin materiaalimallin virheellisyyttä muokkauslujittuvuuden osalta. Virheen pääsyy on ylemmän myötörajan jättäminen pois materiaalimallista. Childsin aiemmassa tutkimuksessa [47] saatiin yhteys liukutason kulman  $\phi$ , kitkakulman  $\lambda$  ja rintakulman  $\gamma$  sekä muokkauslujittuvuus eksponentin 1/n välille, kuten kaava (105) esittää. [50]

$$\tan(\phi + \lambda - \gamma) + 2\phi = funct \left(\frac{1}{n\sin\phi}\right)$$
(105)

Kuva 33 esittää tutkimuksessa käytetyn simulaatiodatan ja lastuamiskokeista saadun koedatan sijoittumisen kokeellisesti saadun yhteyden (105) suhteen. Kuvasta nähdään kuinka simuloitu data ohjelmistosta riippumatta asettuu kokeellisten arvojen alapuolelle. Simulaatioiden antamat tulokset ovat virheellisiä vain suurilla lastuamisnopeuksilla, josta Zorev, jonka julkaisusta [53] lastuamiskoedata on otettu, sanoo että mahdollinen syy tälle on, ettei teräs ehdi muuttaa muotoaan suurilla nopeuksilla. Tämän voidaan tulkita tarkoittavan juuri ylempää myötörajaa. [50]


Kuva 33. Lastuamiskoedataa ja simulaatiotuloksia [50]

Childsin tutkimuksessa luodaan materiaalimalli, jossa ylempi myötöraja on otettu huomioon. Malli tehdään Advant Edge elementtiratkaisijalle, jossa on mahdollisuus valita käyttäjän määrittelemä materiaalimalli. Materiaalimallin perusmuodossa on vastaavat termit kuin Johnson-Cook materiaalimallissakin (kaava (104)), jännitys on kuvattu venymän funktiona siten, että mukana on muokkauslujittumisen ja termisen pehmenemisen vaikutukset, mutta mallit eivät ole identtiset. Uuteen malliin tehdään muokkauslujittuvuusosuus, jossa ei huomioida lämpötilaa tai muodonmuutosnopeutta. Ylempi myötöraja saatiin malliin luomalla uusi ehto muokkauslujittuvuustermiin. Kun venymä on alle tietyn rajan, myötöjännitys on ylemmän myötörajan suuruinen. Tällöin jännitysvenymäkäyrä näyttää seuraavalta (Kuva 34). Malli on yksinkertaistettu, koska realistisemmat mallit epäonnistuivat. [50][51]



Kuva 34. Uuden konstitutiivisen yhteyden jännitysvenymäkäyrä [50]

Lastuamiskokeet tehtiin 070M20 hiiliteräksellä 0.25 mm lastunpaksuudella, 50-250 m/min lastuamisnopeudella ja rintakulmalla 6°. Simulaatioita tehtiin kolmella eri materiaalimallilla, joista ensimmäisessä on lineaarinen terminen pehmeneminen, eikä ylempää myötörajaa, toisessa on epälineaarinen terminen pehmeneminen, muttei ylempää myötörajaa, ja kolmannessa mallissa on epälineaarinen terminen pehmeneminen ja ylempi myötöraja. Tutkimuksessa vertailtiin tangentiaalivoiman, lastuamisvoiman ja liukutason kulman arvoja. Ensimmäinen malli aliarvioi molemmat voimat ja yliarvioi liukukulman arvon. Toinen malli yliarvioi päälastuamisvoiman, aliarvioi liukukulman ja sai hyviä tuloksia tangentiaalivoiman osalta. Kolmas malli tuotti hyvin tarkkoja tuloksia kaikkien kolmen tutkitun muuttujan osalta. Kuvaajat simulaatiotuloksista ja lastuamiskokeiden arvoista esitetään seuraavassa (Kuva 35), ylimpänä ensimmäisestä materiaalimallista ja alimpana viimeisimmästä materiaalimallista saadut tulokset. Voidaan todeta että ylemmän myötörajan lisääminen materiaalimalliin tuo selkeän tarkkuuden parannuksen simuloitaessa muokkauslujittuvia ylemmän myötörajan omaavia materiaaleja. Tällaisten materiaalien käsittäessä suurimman osan koneenrakennusmateriaaleista, on parannus hyvin tärkeä lastuavan työstön simuloinnin kannalta. [50][51][52]



Kuva 35. Lastuamiskokeiden tulokset eri materiaalimalleilla [52]

Lentokoneteollisuuden käyttämä titaani Ti-6Al-4V omaa alhaisen lämmönjohtavuuden. Tästä syystä titaaniseos on hankalasti koneistettava lämpötilan aiheuttaessa suuria jännityksiä ja lämpötiloja, jotka johtavat terän nopeaan kulumiseen. Titaanilla on taipumus tuottaa segmentoitunutta lastua koneistettaessa. Calamaz, Dominique Coupard ja Franck Girot tutkivat Ti-6Al-4V titaanin segmentoituneen lastun muodostumista materiaalimallin perusteella vuonna 2008 julkaistussa artikkelissa. [54]Tyypillisesti segmentoituneen lastun syntyyn on uskottu vaikuttavan joko adiabaattinen leikkausvyöhyke, jossa terminen pehmeneminen ja muokkauslujittuminen vuorottelevat, tai murtumien muodostuminen primäärisellä liukuvyöhykkeellä tai molemmat yhdessä. Useimmissa numeerisissa ratkaisijoissa käytetään murtumakriteeriä lastunkatkeamisen mallintamiseksi. Yleisesti käytetty Johnson-Cook materiaalimalli ei pysty mallintamaan adiabaattista ilmiötä, joka aiheuttaa sahalaitaisen segmentoituneen lastun syntymistä, koska muokkauspehmenemistä ei oteta huomioon. Muokkauspehmeneminen on ilmiö, jonka fysikaalista mekanismia ei tunneta täysin, mutta muokkauspehmenevää materiaalia muokatessa jännitys pienenee kun kriittinen muokkausaste ylittyy. Tämä ilmiö muistuttaa jännitysvenymäkäyrältään hieman kohonnutta myötörajaa, joten voisi kuvitella Childsin esittämän materiaalimallin soveltuvan myös muokkauspehmenevien materiaalien mallintamiseen pienin muutoksin. Julkaisussa esitetty malli on muokattu Johnson-Cook materiaalimalli, joka ottaa huomioon muokkauslujittumisen, termisen pehmenemisen sekä muokkauspehmenemisen. Muutokset on aikaansaatu käyttämällä hyperbolista tangenttia. Uusi TANH-materiaalimalli on Johnson-Cook materiaalimalli johon on lisätty kerroin, joka esitetään kaavassa (106). Uudessa termissä esiintyvät muuttujat A, B, C ja D ovat materiaaliparametreja. Muut muuttujat on esitetty alkuperäisen JC-mallin kaavan (104) yhteydessä. [54]

$$\sigma = \left(A + B\varepsilon^{n} \left(\frac{1}{\exp(\varepsilon^{a})}\right)\right) \left(1 + C \ln \frac{\varepsilon}{\varepsilon}\right) \left(1 - \left(\frac{T - T_{r}}{T_{m} - T_{r}}\right)^{m}\right)$$
(106)  
$$\times \left(D + (1 - D) \tanh\left(\frac{1}{(\varepsilon + S)^{c}}\right)\right)$$
  
jossa  $D = 1 - \left(\frac{T}{T_{m}}\right)^{d}$  ja  $S = \left(\frac{T}{T_{m}}\right)^{b}$ 

Kuva 36 esittää alkuperäisen ja muunnellun JC-materiaalimallin jännitysvenymäkäyrät 324 celsiusasteessa. Muunnellussa mallissa on huomattavissa muokkauspehmenemisen osuus joka aiheuttaa jännityksen laskun muokkausasteen 0.2 ylittyessä.



Kuva 36. Johnson-Cook ja TANH materiaalimallien mukaiset jännitysvenymäkäyrät lämpötilassa 324 °C [54]

Erityisen vakuuttava tulos työssä saatiin segmentoituneen lastun mallintamisessa, johon työssä pyrittiin. Kuva 37 esittää simulaatioista saadut lastunmuodot eri materiaalimalleja käytettäessä, vasemmalla alkuperäisen JC-mallin tuottama lastu ja oikealla TANH-mallin mukainen lastu, jonka sahalaitaisuus on selvästi havaittavissa. Työssä todetaan uuden mallin parantaneen lastunmuotoa simulaatioissa, mutta lastuamisvoimien laskemiseksi mallia tulee vielä parantaa. Päällimmäiseksi syyksi työssä esitetään JC-materiaalimallin materiaaliparametrien valintaa. Työssä tutkittiin myös kitkan vaikutusta, joka todettiin vähäiseksi lastuamisvoimien osalta, mutta sen vaikutus huomattiin teräsärmän lämpötilassa. [54]



Kuva 37. Eri materiaalimalleilla tehtyjen simulaatioiden lastunmuoto [54]

# 4 Kaupalliset lastuamisen simulointisovellutukset

Lastuavan työstön mallintamiseksi tarkoitetuista kaupallisista sovellutuksista ei ole ylitarjontaa. Ainoastaan kaksi elementtimenetelmää hyödyntävää kaupallista ohjelmistoa on markkinoilla, Third Wave Systemsin Advant Edge sekä Scientific Forming Technology Corporationin Deform. Tarjolla voi olla muitakin ohjelmistoja, mutta tämän tutkimuksen puitteissa niitä ei löydetty, joten voidaan olettaa että ne ovat hyvin pienten ohjelmistotalojen tarjoamia sovellutuksia, jos niitä on ollenkaan.

#### 4.1 Advant Edge

Third Wave Systems on Minneapoliksessa toimiva ohjelmistoyritys, jonka toimiala on lastuavan työstön suunnitteluun, mallinnukseen ja optimointiin liittyvien tuotteiden tarjonta ja ylläpito. Heidän tuotteisiinsa kuuluu Advant Edge elementtiratkaisija, joka on luotu nimenomaan lastuavan työstön mallintamiseksi. Ohjelmisto on Lagrangen formuloinnilla toteutettu eksplisiittisellä aikaintegrointirutiinilla varustettu elementtiratkaisija. Yritys on tehnyt vahvaa yhteistyötä Yhdysvaltojen puolustusministeriön sekä useiden teollisuusyritysten kanssa, kuten Bell Helicopter, Cessna Aircraft, Ford, General Motors, Kennametal ja Sandvik Coromant. Ohjelmasta on saatavilla 2D- ja 3D-versiot. Third Wave Systems tarjoaa myös CAM-ohjelmistojen (Computer Aided Manufacturing) yhteydessä toimivan Production Module -moduulin, joka optimoi työstöratoja ja lastuamisvoimia sekä työkappaleeseen kohdistuvia kuormituksia työstön aikana. Lisäksi tarjontaan tulee tämän työn kirjoittamishetkellä beeta testauksessa oleva Distortion Modulesta saatujen syötteiden perusteella lopputuotteen vääristymiä ja mittatarkkuutta. [55]

#### 4.2 Deform

Scientific Forming Technologies Corporation on Ohiossa perustettu ja toimiva yritys jonka päätuote on Deform elementtiratkaisija, joka on pääasiallisesti muovaavaan työhön tarkoitettu, mutta se soveltuu myös lastuavan työstön mallintamiseen. Siihen on saatavissa lastuavan työstön mallinnusmoduuli, joka helpottaa simulaatioiden laatimista. Deform, josta on saatavilla useita eri moduuleita niin 2D- kuin 3D-versiona, on maailman käytetyin metallien muovaavaan työstöön ja muottien analysointiin tarkoitettu elementtiratkaisija. Deform on Lagrangen formuloinnilla toteutettu implisiittisellä aikaintegrointirutiinilla varustettu elementtiratkaisija. [56]

#### 4.3 Muut

Lastuavan työstön tutkimuksen saralla on käytetty useita elementtiratkaisijoita, kuten tutkijoiden itse ohjelmoimia ratkaisijoita, yleisiä elementtiratkaisijoita joihin tutkijat ovat ohjelmoineet lastuavan työstön simuloimiseksi tarvittavat lisäominaisuudet, sekä yliopistoprojekteina ohjelmoituja elementtiratkaisijoita. Yleisimmin tutkimuksissa esiintyneitä ohjelmistoja ovat laajalti käytetty Abaqus, Marc, joka nykyisin on integroitu MSC Softwaren tuotteisiin ja OXCUT ohjelmisto, joka on kehitetty ERC/NSM:ssä (Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing) Ohion osavaltion yliopistossa. Näiden ratkaisijoiden käyttö teollisuuden tarpeisiin vaatii korkeasti koulutettua henkilökuntaa ja tuntemusta sekä elementtimenetelmän teoriasta sekä lastuavasta työstöstä.

# 5 Lastuamissovellusten käyttö

Lastuamissovelluksia testattiin simuloimalla kolme tyypillistä lastuamisen tutkimusongelmaa. Tarkoituksena oli selvittää miten ohjelmistot selviytyvät käytännössä ja kuinka pitkällä mallinnusteknologia on. Erityisesti ohjelmistojen soveltuvuus teolliseen käyttöön haluttiin selvittää. Tässä luvussa käsitellään simulointiohjelmien käytettävyyttä. Suorituskykyä mitattiin simulointiohjelmien käytettävyydellä, ajan käytön tarpeella ja tulosten paikkansapitävyydellä. Tutkimus aloitettiin tutustumalla ohjelmiin muutaman viikon verran, ennen ohjelmistotoimittajien järjestämiä koulutuksia. Ohjelmilla on helppo tehdä yksinkertaisia malleja, jos on vähänkään kokemusta tietokoneohjelmien käytöstä yleensä. Ohjelmien hienosäätömahdollisuuksia on paljon, joiden kokeileminen yritys erehdys periaatteella ei ole suositeltavaa jos ei tiedä mitä tekee. Jos toimii tietämättä eri toimintojen tarkoituksesta, voi helposti omaksua vääriä toimintatapoja, jotka vääristävät simulointituloksia. Advant Edgeä tarjoava ohjelmistotalo Third Wave Systems järjesti ilmaisen yksipäiväisen kurssin tiloissaan Minneapoliksessa. Kurssilla käytiin selkeästi tarvittavat toiminnot läpi. Kurssimateriaali on erittäin selkeää. Deformia tarjoaa Eurooppalaisille asiakkaille Wilde FEA, joiden toimipisteessä Manchesterissa järjestettävä kaksipäiväinen koulutus on maksullinen. Koulutuksessa käydään asiakkaan tarvitseman moduulin toiminnot läpi perusteellisesti. Tässä tutkimuksessa ohjelmistojen käyttöä kokeiltiin käytännössä laatimalla kolme tyypillistä lastuamissimulaatiota, joiden tulokset varmennettiin lastuamiskokein. Samalla ohjelmistojen käytettävyyttä ja käyttökokemuksia tarkkailtiin. Koealustana oli Lenovo ThinkCentre pöytätietokone, jonka spesifikaatiot ovat;

- Intel Core 2 Quad Q6600 2.4 GHz Neliytiminen prosessori
- 4 Gb Keskusmuistia
- NVidia GeForce 8600 GT Näytönohjain
- Windows XP

Vaikka tietokone on tehotyöasema, ei se täytä Advant Edgen suositusvaatimuksia. Tästä syystä osa simulaatioajoista oli huomattavasti pidempiä kuin asianmukaisella laitteistolla suoritettuna. Ideaalisin laskenta-alusta olisi laskentaklusteri, jossa suuri määrä prosessoreja laskee simulaatioita yhtäaikaisesti. Vaikka käytössä ollut laskenta-alusta ei ollut nopein mahdollinen kokoonpano, se ei vaikuttanut ohjelmistojen käyttöön tai tuloksiin, vaan ainoastaan laskenta-aikaan. Seuraavassa kerrotaan käyttökokemuksista ohjelmistokohtaisesti.

#### 5.1 Advant Edge

Advant Edge on erittäin helppokäyttöinen. Ohjelmassa on selitykset kaikille toiminnoille ja kattavasta käyttöoppaasta löytyy tarvittavat tiedot niin ohjelman toiminnan kannalta, kuin myös virhekoodit selityksineen. Ohjelman käynnistyessä uusi ikkuna avautuu, jossa käyttäjältä kysytään halutaanko laatia 2D- vai 3Dsimulaatio ja millaista työstömenetelmää halutaan simuloida. Kaikki valinnat johtavat kullekin työstömenetelmälle ominaiseen perusprobleemaan, johon voi tehdä muutoksia työstöarvojen, työkappaleen, käytettävän työkalun ja laskentaparametrien suhteen. Perusprobleemien olemassaolo auttaa erityisesti vasta-alkajaa, sillä perusprobleeman voi lähettää laskentaan sellaisenaan, jolloin saadaan myös tulokset kyseiseen ongelmaan. Kuva 38 esittää tällaisen perusprobleeman 2Dsorvaussimulaatiosta. Kuvasta nähdään myös ohjelmiston perusnäkymä. Advant Edgestä löytyy materiaalitiedot useille teräksille, alumiineille, ruostumattomille teräksille ja muille tyypillisille lastuttaville materiaaleille. Myös yleisimmät terämateriaalit ja terägeometria löytyvät valmiina malleina. Joitain Sandvikin terien mallejakin löytyy 2D simulaatioihin. Ohjelmistoon voi ladata CAD-ohjelmilla piirrettyjä työkappaleita ja teriä. Ainakin STEP ja STL tiedostotyypit ovat tuettuja. Lastuamiskokeissa käytetty Sandvikin DNMG 150608-MM sorvin teräpala mallinnettiin ja tuotiin ohjelmaan ilman ongelmia. Teräpalan CAD-mallia on edullista muokata hieman ennen siirtämistä Advant Edgeen siten, että poistetaan terägeometria ei lastuavan särmän puolelta ja katkaistaan teräpala niiltä osin jotka eivät ole suorassa yhteydessä työkappaleeseen. Näin verkotettavaa osuutta on vähemmän ja simulaation laskenta on nopeampaa.

Vaikeuksia syntyy silloin, kun työstettävä materiaali puuttuu ohjelmasta. Advant Edgessä on myös Custom Material toiminto, jolla voi luoda uuden materiaalin, mutta tämä vaatii huomattavan määrän materiaaliparametreja, joita tyypillisesti ei mainita tai tunneta materiaalitoimittajienkaan tiedoissa. Tällöin joudutaan tekemään materiaalikokeita parametrien selvittämiseksi. Third Wave Systems tekee jatkuvasti töitä materiaalikirjastonsa laajentamiseksi. Ohjelmassa on mahdollisuus muuttaa elementtimenetelmälle tyypillisiä parametreja, mutta ohjelma kehottaa olemaan muuttamatta näitä, ellei tiedä mitä tekee. Näiden parametrien kuten elementtikoon ja verkon tiheyden muuttaminen ja muiden laskentaan liittyvien tekijöiden merkitys opetetaan ohjelmistotoimittajan järjestämällä kurssilla. Tärkein laskentaparametreihin liittyvä ikkuna on heti ensimmäinen välilehti Simulation Options ikkunassa, jossa asetetaan simulaatio joko Rapid- tai Standard-moodiin. Rapid-moodissa ohjelma laskee probleeman nopeammin, mutta huomattavasti huonommalla tarkkuudella. Tätä voi käyttää demonstraatiotarkoituksissa, tai testattaessa simulaation toimivuutta. Standard-moodissa ohjelma laskee probleeman niillä parametreilla, jotka simulaatioasetuksissa on määrätty. Suurimmat vaikeudet ohjelman käytössä liittyivät asennukseen, jossa lisensointi ei toiminut koska tietokoneen palomuuri esti sen pääsyn lisenssiserverille. Tämän ongelman korjaamiseksi tarvittiin Teknillisen Korkeakoulun atk-keskuksen tukihenkilön ja Third Wave Systemsin asiakastuen neuvoja. Ongelma korjaantui lisäämällä palomuuriin poikkeus ohjelman lisenssin kohdalle.



Kuva 38. Advant Edge ohjelman käyttöliittymä

Advant Edge-simulointi, kuten yleensä muukin tieteellinen laskenta vaatii huomattavan paljon laskentatehoa tietokoneelta. Yksinkertaisimmat 2D-simulaatiot vievät aikaa kymmenistä minuuteista useisiin tunteihin. Jäännösjännityksiä laskettaessa 2D moodissa laskenta voi viedä muutamia vuorokausia. Pahimmillaan laskenta voi viedä jopa viikkoja, kun simulaatio on 3D-moodissa ja laskennassa käytetään tiheää elementtiverkkoa. Kuitenkaan 3D-jäännösjännitystenkään laskenta ei ole mahdotonta, joskin aikaa vievää. Laskenta kestää kauan, muttei kuitenkaan vaadi käyttäjältä toimenpiteitä laskennan aikana, ja ohjelmalla on mahdollista työskennellä toisen simulaation parissa samalla, kun laskenta on käynnissä. Ohjelmistossa on mahdollisuus usean prosessorin tuelle, jota tässä työssä ei kuitenkaan ollut mahdollista kokeilla. Valmistajan esitteiden mukaan siirtyminen yhden prosessorin käytöstä kahden prosessorin käyttöön nopeuttaa laskentaa noin 50 %, neljän prosessorin käyttöön 65 % ja kahdeksan prosessorin käyttöön 75 %. Ohjelmiston hinta nousee jokseenkin samassa suhteessa prosessorituen kanssa. Simulaatioiden laskennan päättyessä voidaan siirtyä napin painalluksella tulostenkatseluohjelmaan Tecplot, josta ikkunanäkymä seuraavassa (Kuva 39). Tulosten tarkastelu on helppoa AdvanEdge Quick Analysis työkalulla, jolla voi valita näyttökuvassa esiintyvän suureen, kuten lastuamislämpötilan jakauman, plastisen muodonmuutoksen määrän, muodonmuutosnopeuden tai jännitykset. Lastuamisvoimat näkyvät ajan suhteen kaaviossa varsinaisen lastuamistilanteen esityksen alapuolella. Heikoimmin toteutettu osuus on tulosten siirtäminen toiseen ohjelmaan, kuten taulukkolaskentaohjelmiin tai tekstinkäsittelyohjelmiin. Teollisuuskäytössä katseluohjelman antamat tiedot ovat riittävät raporttien laatimiseksi, mutta tieteellistä analyysiä tehtäessä numeroarvoja on päästävä analysoimaan tarkemmin. Tämä on kuitenkin mahdollista, mutta hankalaa.



Kuva 39. Advant Edgen tulostenkatseluohjelman Tecplot näkymä

# 5.2 Deform

Deformin lastuamismoduuli toimii suoraviivaisesti kysyen käyttäjältä ensin halutun työstömenetelmän, lastuamisarvot ja muut "todelliset" suureet. Sitten siirrytään simulaatioparametrien asetuksiin; verkon tiheys, laskenta-askeleiden lukumäärä ja haluttavat tulostiedot. Deformin työstömenetelmien valikoima on huomattavasti pienempi kuin Advant Edgessä, tosin Deformia voi myös käyttää Deform 3D-pre-tilassa, jolloin käyttäjän on asetettava kaikki simulaatioparametrit ja työstöparametrit. Pre-tila toimii kuten useimmat yleiset elementtiratkaisijat; käyttäjän on määritettävä itse kappalegeometriat, verkotusparametrit, materiaalimallit, reunaehdot, kappaleiden liikkeet, laskentaan liittyvät parametrit, kuten aika- tai siirtymäaskeleen pituus, pysäytyskriteerit ja numeerisen laskennan menetelmät. Pre-tilaa käytettäessä ohjelmistolla on mahdollista simuloida käytännössä kaikkia mahdollisia lastuavan työstön menetelmiä. Deformissa on kattava materiaalikirjasto, josta löytyy tyypillisiä koneistusmateriaaleja sekä työkalumateriaaleja kovametalleista keraameihin. Ohjelmassa on hieman laajempi Custom Material toiminto, jolla voidaan jopa asettaa materiaalin jännitys-venymä käyrän koearvojen perusteella. Kuitenkin Deformiakin käytettäessä materiaalikokeet on tehtävä, jos materiaalimallia ei löydetä ohjelman kirjastosta. Ohjelmiston lastuamismoduulissa on myös tyypillisimmät terägeometriat sorvaukseen, jyrsintään ja poraamiseen.

Käyttö pre-tilassa on huomattavasti hankalampaa kuin Advant Edgellä, ja parametrien asettaminen väärässä järjestyksessä voi aiheuttaa virheen, jolloin koko simulaatio muuttuu käyttökelvottomaksi. Toisaalta tämä on yleistä muillakin elementtiratkaisijoilla, ja kokeneet käyttäjät osaavat välttää ongelmatilanteet. Ohjelmistoa varten järjestetty kurssi oli mainio, ja pienellä etukäteen tutustumisella ohjelmistoon kurssin vaatimustaso oli sopivan haastava, joten kurssilla saadut tiedot antoivat erittäin hyvän pohjan ohjelmiston käyttöä varten. Käyttökokemusten jälkeen ohjelmistosta jäi hieman epävakaa mielikuva, sillä ohjelmisto jumiutui tai kaatui liian usein ollakseen tavallista pc-ohjelmalle. Deformissa 2D- ja 3Dosuudet ovat täysin eri ohjelmistoja, jotka ovat molemmat eri lisenssillä. Kuva 40 esittää Deform 3D-käyttöliittymän, joka on simulaatiografiikkaa lukuun ottamatta identtinen 2D-käyttöliittymän kanssa. Ohjelmistoon saa myös usean prosessorin tuen, jonka kustannukset ovat kymmenesosa ohjelmiston hinnasta. Myös Deformin käytössä oli ongelmia palomuurin kanssa, joka esti usean prosessorin tuen käytön. Ongelman kiertämiseksi palomuuri oli suljettava aina simuloinnin ajaksi, jolloin prosessorituki toimi. Ongelma korjaantui lopullisesti vaihtamalla F-Securen palomuuriohjelma Symantecin palomuuriin.



Kuva 40. Deform 3D-ohjelman käyttöliittymä

Deformin parhaita ominaisuuksia on erittäin kattava tulostenkäsittelytila, josta Kuva 41. Asetuksista voi valita minkä muuttujan haluaa näkyvän värikarttana lastuamissimulaation tulosgeometrian pinnalla, ja geometriaa voi leikata jolloin tuloksia voi tarkastella esimerkiksi lastun leveyden keskeltä. Myös tulosten siirtäminen muihin tietojenkäsittelyohjelmiin onnistuu helposti. Deformin käytön vaikeuden, mutta lukuisten säätömahdollisuuksien sekä erityisen hyvän tulostenkatseluohjelman ansiosta ohjelmisto soveltuu erityisesti lastuavan työstön tieteelliseen tarkasteluun.



Kuva 41. Deform ohjelman postprosessorin käyttöliittymä

# 6 Simulaatiot ja verifiointikokeet

Käytön mukavuus ei tyypillisesti ole raskaan teollisuuden suurin huolenaihe. Näin ei myöskään lastuavan työstön simuloinnissa. Simulaatio-ohjelmien tulosten tarkkuus on kriittinen tekijä ohjelmistojen suorituskykyä mitattaessa, joten tässä työssä suoritettujen lastuamissimulaatioiden tulokset varmistettiin lastuamiskokein. Seuraavassa esitellään laaditut simulaatiot ja lastuamiskokeet. Tuloksia verrataan simuloituihin arvoihin ja pohditaan mahdollisten virheiden syitä.

#### 6.1 Simulaatiot

Tutkimuksessa laaditut simulaatiot pyrittiin valitsemaan siten että, ne olisivat mahdollisimman mielenkiintoisia teollisuuden kannalta. Valittiin sorvaus, poraus ja tapaus, jolla pystytään testaamaan jäännösjännitysten simulointia, joka valittiin ortogonaaliseksi sorvaustapaukseksi. Simulaatioiden tuloksia verrataan lastuamis-kokeista saatuihin arvoihin simulaatioiden tarkkuuden selvittämiseksi. Simulaatio ohjelmistoina käytettiin Advant Edge- ja Deform-elementtiratkaisijoita.

#### 6.1.1 Sorvaussimulaatiot

Sorvaussimulaatioita suoritettiin Advant Edgen 2D- ja 3D-moduuleilla, sekä Deform 3D:llä. Deform 2D jäi kaikkien tarkkuustarkastelujen ulkopuolelle, sillä ohjelmistotoimittaja ei vastannut tarjouspyyntökyselyyn ajoissa. Tuote saatiin lopulta ilmaiseksi määräaikaiseen akateemiseen käyttöön. Simulaatioita tehtiin kolmea eri variaatiota samasta lastuamistapauksesta, kun kaikki kolme tapausta simuloitiin jokaisella moduulilla, saatiin yhteensä yhdeksän eri simulaatiota. Työmateriaalina oli pyörötanko AISI 304 ruostumatonta terästä, jota sorvattiin kolmella eri lastuamissyvyydellä pitäen muita lastuamisarvoja samana. Kierrosnopeus simulaatioissa oli 1061 rpm, syöttö 0,4 mm/r ja lastuamissyvyydet olivat 2, 3 ja 4 millimetriä. Lastuava terä oli Sandvikin DNMG 150608-MM, jonka lastunmurtoprofiili mallinnettiin Advant Edgen omalla Custom Tool-työkalulla 2D-tapauksiin, ja koko teräpala mallinnettiin CAD-ohjelmistolla 3D-tapauksia varten. Advant Edgellä simulaatiot suoritettiin perusasetuksia käyttäen Standard Mode -valintaa. Ohjelmassa on myös Rapid Mode, jolla saadut tulokset eivät vastaa todellisuutta, mutta simuloinnin käytäntöä voidaan esittää sillä nopeasti. Valittavana on myös useita verkotusparametreja, mutta näiden annettiin olla vakioasetuksilla. Deformilla suoritetut simulaatiot tehtiin Deform 3D Pre-tilassa, jolloin kaikki valinnat tehtiin itse. Verkotusparametrit ja aika-askeleet valittiin siten, että simulaatiot kestäisivät jokseenkin yhtä kauan kuin Advant Edgellä suoritetut 3D-simulaatiot.

#### 6.1.2 Poraussimulaatiot

Usein suuria reikäsarjoja tehtäessä esiintyy terärikkoja, jotka varsinkin miehittämättömissä vuoroissa ovat erityisen ikäviä. Poraussimulaatiot päätettiin tehdä juuri porausparametrien optimointia silmälläpitäen. Materiaaliksi valittiin tyypillinen nuorrutusteräs DIN-42CrMo4. Poraksi valittiin 8 millimetrin kaksileikkuinen titaaninitridipinnoitteinen pora. Simulointi aloitettiin hyvin karkealla mallilla parantaen tarkkuutta, tarkoituksena saada tulokset vastaamaan koearvoja halutulla tarkkuudella. Porauksen simuloinnissa toivottiin päästävän pureutumaan lastunmuodostukseen sekä lastuamisvoimiin ja momentteihin. Porauksen ollessa geometrisesti monimutkaista, sen simulointi onnistuu vain 3D-moduuleilla. Vailla parempaa kokemusta, simulaatioista laadittiin liian raskaita, joten laskenta olisi kestänyt kohtuuttoman kauan. Päädyttiin tekemään simulaatiot, joissa lastuamismatka on vain <sup>1</sup>/<sub>4</sub> kierrosta. 3D-simulointi on vielä nykypöytäkoneille sen verran raskasta, että poraussimulaatiot olisi laadittava siten, että lastuttavaa materiaalia on hyvin vähän, ja tarkastelu kohdistuu lyhyelle aikavälille, ei koko työvaiheen ylitse. Koko työvaihetta voidaan tarkastella laatimalla erikseen simulaatiot porauksen alkaessa, ja porauksen jo ollessa "Steady State"-tilassa. Valitettavaa on, ettei esimerkiksi lastuvirtaa voida tarkastella porauksen yhteydessä vielä nykytekniikalla.

#### 6.1.3 Jäännösjännityssimulaatiot

Jäännösjännityssimulaatiot laadittiin vastaamaan ortogonaalia lastuamistapausta, joka suoritettiin sorvaamalla pyörötangon otsapintaa syötön ollessa tangon keskiakselin suuntainen. Työstömateriaaliksi valittiin 7075-T6 Alumiini, jonka muokkauslujittuvuusominaisuudet on helpommin mallinnettavissa kuin teräksillä, ja materiaali löytyi molempien ohjelmistojen materiaalikirjastosta. Simulaatiot suoritettiin jälleen Advant Edgen molemmilla moduuleilla ja Deform 3D:llä. Valitettavasti Deformilla laadittuja simulaatioita ei saatu tuottamaan tuloksia konvergenssiongelmien takia. Vika on luultavasti ohjelman materiaalimallissa, joka ei toimi oikein ongelmassa esiintyneiden erittäin suurten muodonmuutosnopeuksien johdosta.

#### 6.2 Simulaatioiden tulokset

Simulaatioiden tulokset esitetään seuraavassa. Esitykseen käytetään kuvaajia joissa lastuamisvoima, lastuamislämpötila tai jäännösjännitykset esitetään jonkin muuttujan funktiona.

#### 6.2.1 Sorvaussimulaatioiden tulokset

Advant Edge ohjelmalla simuloidut lastuamisvoimat esitetään seuraavissa kuvaajissa (Kuva 42 - Kuva 44). Kuvaajista nähdään selvästi lastuamissyvyyden vaikutus; lastuamissyvyyden laskiessa yhdellä millimetrillä, lastuamisvoimat laskevat noin 500 N. Perinteisten laskukaavojen (kuten kaava (1)) voiman ja lastun pintaalan välisen yhteyden lineaarisuus siis pätee, ainakin näillä koeparametreilla.



Kuva 42. 2D Advant Edge: 4 mm lastuamissyvyydellä saadut voimat



Kuva 43. 2D Advant Edge: 3 mm lastuamissyvyydellä saadut voimat



Kuva 44. 2D Advant Edge: 2 mm lastuamissyvyydellä saadut voimat

Advant Edge 3D-simulaatioiden tulokset esitetään seuraavien kuvaajien (Kuva 45 - Kuva 47) avulla. Huomataan kolmannen voimakomponentin mukaantulo simulaation dimensioiden kasvaessa. Lastuamisvoimat mukailevat 2D-simulaatioista saatuja voimia hyvin. Myös vastaava lineaarinen lastuamissyvyyden ja päälastuamisvoiman yhteys on havaittavissa.



Kuva 45. Advant Edge 3D: 4 mm lastuamissyvyydellä saadut tulokset



Kuva 46. Advant Edge 3D: 3 mm lastuamissyvyydellä saadut tulokset



Kuva 47. Advant Edge 3D: 2 mm lastuamissyvyydellä saadut tulokset

Deform 3D:llä saadut simulaatiotulokset poikkeavat hieman Advant Edgellä saaduista. Kuva 48 - Kuva 50 esittävät Deform 3D-moduulilla saadut lastuamisvoimat ajan suhteen kuvattuna. Päälastuamisvoiman suhteen kuvaajat yhtenevät Advant Edgellä saatujen tulosten kanssa, mutta erityisesti syöttövoiman arvot ovat hieman alhaisemmat Deformilla.



Kuva 48. Deform 3D: 4 mm lastuamissyvyydellä saadut tulokset



Kuva 49. Deform 3D: 3 mm lastuamissyvyydellä saadut tulokset



Kuva 50. Deform 3D: 2 mm lastuamissyvyydellä saadut tulokset

Lastuamislämpötila simulaatioista otettiin lastun lämpötilasta, sillä lastuamiskokeista saadut lämpötilan arvot ovat myös lastun lämpötiloja. Taulukko 1 esittää simulaatioista saadut lastunlämpötilat. Lämpötilat on siirretty postprosessorin lämpötilajakauman esittävästä tilasta (Kuva 51) tulostamalla lastunlämpötila datatiedostona, josta saatiin lastun lämpötilajakauma taulukkolaskentaohjelmaa hyväksikäyttäen. Lämpötiloissa nähdään suuri variaatio eri ohjelmien välillä. Erikoista on myös lastuamislämpötilan muutos lastuamissyvyyden funktiona, joka on laskeva kasvavalla lastuamissyvyydellä.

Taulukko 1. Simulaatioista saadut lastunlämpötilat °C

	a = 2 mm	a = 3 mm	a = 4 mm
Advant Edge 3D Simuloitu max	518,23	461,23	479,91
Advant Edge 3D Simuloitu avg	458,53	398,76	427,11
Advant Edge 2D Simuloitu max	554,78	558,14	543,94
Advant Edge 2D Simuloitu avg	514,01	438,01	428,75
Deform 3D Simuloitu max	925,03	911,21	895,84
Deform 3D Simuloitu avg	775,77	802,55	798,40

Lastun muotoa tarkastellaan myöhemmin suhteessa lastuamiskokeista saatujen lastujen profiileihin. Lastujen profiilit on saatu seuraavaa kuvaa (Kuva 51) vastaavista simulaatioiden tulostenkatseluikkunoista.



Kuva 51. Lämpötilajakauma lastu-terä rajapinnalla

# 6.2.2 Poraussimulaatioiden tulokset

Poraussimulaatioista saatujen syöttövoimien ja momenttien arvot (Kuva 52) noudattavat selkeää trendiä simulaatioiden numeerisen tarkkuuden lisääntyessä. Simulaatio 101 on tehty rapid mode –tilassa, 102 standard mode –tilassa ja 103:ssa käytettiin standard mode –tilasta tihettyä työkappaleen verkkoa. Sekä voimien että momenttien arvot laskevat simulaation elementtiverkon tiheyden kasvaessa. Arvot liikkuvat syöttövoimien osalta 1000 Newtonin molemmin puolin ja momentti on 4 Nm:n luokkaa.







Kuva 52. Syöttövoimat ja momentit

#### 6.2.3 Jäännösjännityssimulaatioiden tulokset

Kaksiulotteisista jäännösjännityssimulaatioista (Advant Edge) saadut tulokset esitetään seuraavassa kuvaajassa (Kuva 53). Nähdään tyypillinen muoto, jossa heti pinnan alla on suurehko vetojännitysalue, jonka jälkeen se muuttuu puristukseksi, joka tasoittuu hitaasti jännityksettömään tilaan.



Kuva 53. 2D jäännösjännitysprofiili

## 6.3 Lastuamiskokeet ja menetelmät

Lastuamiskokeet ovat olleet perinteinen menetelmä tutkia lastuavaa työstöä. Vaikka kaikkia haluttuja ilmiöitä ei voida mitata kokeellisesti, voidaan kokeita käyttää simulaatioiden rinnalla varmentamaan simulaatioiden tuloksia niiltä osin, kuin ilmiöitä voidaan tutkia kokeellisesti. Näin varmennettujen simulaatioiden muihinkin tulostietoihin voidaan luottaa suuremmalla varmuudella. Seuraavaksi käsitellään tässä työssä käytettyjä kokeita ja menetelmiä.

## 6.3.1 Sorvauskokeet

Koesarjan tarkoituksena oli varmentaa simuloimalla saadut lastuamisvoimien arvot ja työstölämpötilat käytettäessä lähtökohtana Sandvik-terävalmistajan lastuamisarvosuosituksia. Taulukko 2 esittää simulaatioissa käytetyt lastuamisparametrit.

Taulukko 2. Lastuamiskokeissa käytetyt lastuamisparametrit

$a_p (mm)$	f (mm/r)	v (m/min)	$\Omega$ (rpm)	P(kW)
2	0.4	153	1061	5.5
3	0.4	147	1061	7.9
4	0.4	140	1061	10

Käytettävä terä on DNMG 150608-MM (Kuva 54) terälaadulla 2025, joka on kemiallisella kaasufaasilla valmistettu keraamipinnoite kovametallisen perusaineen päällä. Pinnoite on 5.5  $\mu$ m paksu *TiCN-Al*<sub>2</sub>*O*<sub>3</sub>-*TiN*. Terässä on 55 asteen kärkikulmalla varustettu päästötön terägeometria, jonka paksuus on 6 millimetriä ja sivujen pituus 15 millimetriä. Terän nirkonsäde on 0.8 millimetriä. Teräpalasta luotiin CAD-ohjelmistolla 3D-malli, jota käytettiin simulaatioissa.



Kuva 54. DNMG-150806 Teräpalan CAD-malli

Lastuttava aihio on halkaisijaltaan 50 millimetriä oleva pyörötanko AISI-304 ruostumattomasta teräksestä. Simulaatiot suoritettiin sekä Advant Edgellä että Deformilla, Advant Edgellä tehtiin sekä 2D että 3D simulaatiot ja Deformilla 3D simulaatiot. Simulaatiotulokset esitetään taulukoissa lastuamisvoimien että lastuamislämpötilojen osalta. Lisäksi lastunmuotoa verrataan kokeista saatuihin lastuihin. Lastuamiskokeissa mitattiin lastuamisvoimia sekä lastuamislämpötilaa. Lastuamisvoimien mittaamiseen käytettiin tuotantotekniikan laboratorion voimanmittauslaitteistoa: KISTLER KIAG SWISS TYPE 9263 3-akselinen pietsoanturi, KISTLER varausvahvistin ja PCLAB mittauskortti. PCLAB mittauskortin näytteenottotaajuus on tehdyissä mittauksissa 100 Hz. Lastuamislämpötilaa mitat-

tiin työstökokeiden aikana FLIR SC660 infrapunakameralla. Metallipintojen IRmittaamisessa ongelmallista on niiden emissiivisyys. Metallipinta heijastaa enemmän ympäristön lämpösäteilyä kuin mitä se säteilee itse. Tällöin emissiivisyys on pientä. Tätä ilmiötä voidaan kompensoida emissiokertoimella. Emissiivisyys tarkoittaa kappaleen säteilytehon suhdetta vastaavankokoisen ja -lämpöisen mustan kappaleen lähettämään säteilyyn. Mustalla kappaleella tarkoitetaan kappaletta joka absorboi kaiken itseensä kohdistuvan ulkopuolisen säteilyn. Mustan kappaleen emissiokerroin on yksi. Lastuamiskokeita tehtäessä IR-kameran mittausalue säädettiin yli 30 °C, joten ulkopuolisen säteilylähteen olisi oltava suurempi, jotta se vaikuttaisi mittaustuloksiin. Huomattiin, ettei koehenkilöstön ruuminlämpö näkynyt kuvassa. Kuva 55 esittää koejärjestelyä. [57]



Kuva 55. Koejärjestely

# 6.3.2 Voimanmittauslaitteiston ja lämpökameran kalibrointi

Voimamittauslaitteiston varausvahvistin muuttaa pietsoanturilta tulevan datan +/-5V syötteeksi mittausohjelmalle, joka tallentaa syötteen tiedostoon. Tallennettu data on muutettava voimiksi, jota varten on suoritettava kalibrointi. Kalibrointi tehtiin kuormittamalla pietsoanturia tunnetulla voimalla, jonka luomiseksi käytettiin jousivaakaa. Kuormituksen ja syötejännitteen välille saatiin kertoimet joilla jännitteen arvot muutetaan voimiksi. Kalibroinnista aiheutuva virhe laskettiin toistokokeiden hajonnasta. Virheen arvoksi saatiin  $6 \pm 2$  %. Lämpökameran kalibrointi suoritettiin lämmittämällä kokeessa käytettyä materiaalia ja mittaamalla kappaleen lämpötilaa kosketuslämpömittarilla K-tyypin termoelementtiä käyttäen. Kappaletta kuvattiin lämpökameralla lämmittämisen ajan. Näin saatu lämpökamerakuva jälkikäsiteltiin ThermaCAM Researcher Pro ohjelmistolla muuttaen parametreja niin, että kuvattu lämpötila saatiin vastaamaan kosketuslämpömittarin lukemia. Lämpökuvauksen parametreja ovat kuvattavan materiaalin emissiivisyys, kuvausetäisyys, ilman kosteus ja lämpötila, sekä käytettävän linssin suodatuskerroin. Näin toimittaessa virheen voidaan arvioida olevan 20 % luokkaa, koska lämpötila-alue ei ollut sama kuin kokeiden aikana, sekä koetilanteessa esiintyi enemmän virhelähteitä, kuten ulkopuolista lämpösäteilyä. On kuitenkin huomattava, ettei lämpökameraa voitu viedä riittävän lähelle koekappaletta, jotta kaikkein pienimmätkin kohteet tallentuisivat kameralle. Myös lastuvirta häiritsi kuvaa niin, ettei teräsärmän kuuminta kohtaa pystytty taltioimaan. Näin ollen koetuloksia tarkastellaan lastun lämpötilasta. Lämpökameran ja ktermoelementin yhteiskäyttö olisi yksi mahdollinen tapa saada tarkka lämpötilan arvo ja myös lämpötilajakauma kun kameran näyttämä kalibroitaisiin termoelementin mukaan.

#### 6.3.3 Porauskokeet

Koesarjan tarkoituksena oli toistaa varmistaa simuloimalla saadut porausvoimien ja momenttien arvot. Lastuttava materiaali on DIN-42CrMo4 nuorrutusteräs. Käytettävät porat ovat Hartnerin halkaisijaltaan 8 millimetrin titaaninitridipinnoitteinen pikateräspora sekä Nachi-Fujikoshin vastaava pora. Lastuamiskokeet tehtiin Tuotantotekniikan laboratorion säteisporakoneella. Lastuamisarvosuositukset (katso Taulukko 3) ovat Hartnerin porausmanuaalista. Kokeissa mitataan lastuamisvoimia sekä momenttia. Lastuamisvoimien ja momentin mittaamiseen käytetään laboratorion voimanmittauslaitteistoa: KISTLER KIAG SWISS TYPE 9271A pietsoanturi, jossa on anturit pystysuuntaisen voiman ja momentin mittaamiseeksi, KISTLER varausvahvistin ja PCLAB mittauskortti.

Taulukko 3. Porauskokeiden lastuamisarvot

f (mm/r)	v (m/min)	$\Omega$ (rpm)	P (kW)
0.112	20	800	0.4

#### 6.3.4 Jäännösjännityskokeet

Koesarjan tarkoituksena on todentaa simuloimalla saadut jäännösjännitysten arvot ja lastuamisvoimat. Muodostuneet jäännösjännitykset mitataan reiänporausmenetelmällä koneenrakennuksen materiaalitekniikan laboratorion suorittaessa mittaukset. Lastuttava materiaali on AISI-7075-T6 alumiinia, halkaisijaltaan 100 millimetristä pyörötankoa. Lastuamiskokeet tehtiin Tuotantotekniikan laboratorion Okuma LB 15 NC-sorvilla. Taulukko 4 esittää käytetyt lastuamisarvot. Koesarjan vaikeutena oli saada aikaiseksi ortogonaalinen lastuamistapaus, jossa voidaan mitata aiheutetut jäännösjännitykset. Suurihalkaisijan kappaleen otsapinnan sorvaus vastasi tilannetta riittävän hyvin ja jännitysten mittaaminen otsapinnalta oli mahdollista. Ongelmallista oli saada syöttö lopetettua riittävän nopeasti, jotta koekappaleesta saataisiin riittävän pitkä vakiopaksuinen lastu. Tämä saavutettiin asettamalla NC-sorvin pikaliike vastakkaiseen suuntaan kesken syöttöliikkeen. Samalla pyörimisliike pysäytettiin. Näin saatiin riittävän pitkä matka, noin 1/3 kierrosta vakiopaksuista lastua, jolloin kappaleeseen jäävien jäännösjännitysten tulisi vastata simuloitua tapausta. Kuva 56 esittää millainen lastunpaksuusjakauma kappaleeseen saatiin. Huomataan että mittauspisteet 6-9 ovat riittävän lähellä 0.2 millimetriä. Sorvauksen aiheuttamat jännitykset tunnistetaan mittauksista vertaamalla jännitysten arvoja toiseen samasta aihiosta kipinätyöstämällä irrotetun referenssikappaleen jännityksiin.



Kuva 56. Lastunpaksuus

Taulukko 4. Jäännösjännityskokeen lastuamisarvot

ap (mm)	f (mm/r)	v (m/min)	Ω (rpm)
10	0.2	185.5	656

Reiänporauskokeet suoritettiin koneenrakennuksen materiaalitekniikan NDTlaboratoriossa. Koelaitteena käytettiin (Kuva 57) Italiassa valmistettua Barkhausen reiänporauslaitteistoa. Mittauksia tehtäessä laitteistolla porataan mitattavaan kappaleeseen kiinnitetyn venymäliuskan läpi halkaisijaltaan 1-4 mm reikä edeten syvyyssuunnassa askelittain. Venymäliuska antaa mittausohjelmistolle venymätietoa kultakin askeleelta, jolloin saadaan venymäprofiili koko reiän syvyydeltä. Venymistä saadaan laskettua jännitykset tavallisten lujuusopin kaavojen avulla. Menetelmä on vahvasti dimensio ja suuruusriippuvainen, joten tulokset pätevät vain tietyillä koekappaleen dimensioiden ja jännitysten suuruusluokilla. Tässä työssä esiintyvät jännitykset ovat pieniä, jolloin menetelmä ei aiheuta ongelmaa tämän suhteen, mutta venymäliuskan sijainti kappaleen reunalla voi joissain tapauksissa aiheuttaa suuriakin systemaattisia virheitä, joilta tässä työssä vältytään käyttämällä referenssikappaletta ja jännityksiä tarkastellaan kvalitatiivisesti. [58]



Kuva 57. Reiänporausmenetelmän koejärjestely

#### 6.4 Kokeiden tulokset

Tässä luvussa esitellään lastuamiskokeiden ja jäännösjännitysmittausten tulokset. Tulokset esitetään koesarjoittain järjestyksessä: sorvauskokeiden tulokset, porauskokeiden tulokset ja jäännösjännityskokeiden tulokset.

## 6.4.1 Sorvauskokeiden tulokset

Seuraavat kuvaajat (Kuva 58 - Kuva 60) esittävät lastuamiskokeista mitattuja lastuamisvoimien arvoja. Mittausohjelmiston matalan näytteenottotaajuuden vuoksi mittauspisteet esitetään kymmenen kierroksen ajalta, jotta mittauspisteitä olisi riittävä otanta. Mittaustulokset seuraavat Kienzle & Victorin analyyttisen kaavan arvoja hyvällä tarkkuudella ja lastuamisvoimien muutos lastuamissyvyyden funktiona on lineaarista. Kienzle & Victorin lastuamisvoiman kaavasta saadaan AISI-304 ominaislastuamisvoimalla, joka tyypillisesti on 1900-2300 N/mm<sup>2</sup> välillä, lastuamisvoimien arvot, jotka esitetään seuraavassa taulukossa (Taulukko 5) [59].





Kuva 58. Lastuamisvoimat 4 millimetrin lastuamissyvyydellä

Kuva 59. Lastuamisvoimat 3 millimetrin lastuamissyvyydellä



Kuva 60. Lastuamisvoimat 2 millimetrin lastuamissyvyydellä

Taulukko 5. Kienzle & Victor lastuamisvoimat vertailutaulukossa

a	h	k <sub>c1.1</sub> max	k <sub>c1.1</sub> min	k <sub>c1.1</sub> koe	F <sub>i</sub> max	F <sub>i</sub> min	F <sub>i</sub> koe
4	0,4	2300	1900	2013	3680	3040	3220
3	0,4	2300	1900	2094	2760	2280	2513
2	0,4	2300	1900	2085	1840	1520	1668

Lastuamiskokeiden lastuamislämpötilaa mitattiin muodostuvasta lastusta, koska teräsärmän lämpötilan mittaaminen olisi vaatinut erikoisjärjestelyjä, jolloin lämpökameran käyttö ei olisi tullut kyseeseen. Seuraava kuva (Kuva 61) esittää todellista lämpökamerakuvaa lastuamistapahtumasta, kuvasta nähdään, ettei teräsärmän lämpötilaa voida mitata muodostuvan lastun ollessa teräsärmän edessä. Lastuamislämpötilat lastusta mitattuna vaihtelivat 265 ja 477 °C välillä, keskiarvon ollessa 360 astetta.



Kuva 61. Lämpökamerakuvaa sorvauksesta 2 millimetrin lastuamissyvyydellä

Lastunmuotoa tarkastellaan lastuamiskokeista saaduista lastuista käyttäen mikroskooppia ja digitaalikameraa. Lastut kuvattiin referenssimitan kanssa, joten lastun koko on tunnistettavissa kuvista. Kuva 62 esittää lastunmuotoja sivusta ja lastuterä rajapinnan suunnista kuvattuna.



Kuva 62. Lastuamiskokeista saadut lastunmuodot, ylhäältä alas 2, 3 ja 4 mm lastut, kuvan asteikkoväli on 0,5 mm

## 6.4.2 Porauskokeiden tulokset

Porauskokeiden tulokset esitetään seuraavissa kuvissa (Kuva 65 - Kuva 68). Kuvaajat näyttävät koko poraussyklin voimat ja momentit noin 10 millimetrin syvyyteen asti poratessa. Huomataan, että vaikka eri valmistajien porat ovat lastuamisgeometrialtaan samat, DIN 338 standardin mukaiset, on lastuamisvoimissa ja momenteissa pieniä eroja. Nachi Fujikoshin poralla saatiin syöttövoimaksi noin 1270 N ja momentiksi noin 4,7 Nm. Hartnerin poralla saatiin syöttövoimaksi noin 1370 N ja momentiksi noin 4,4 Nm. Sadan Newtonin ero syöttövoimissa on selitettävissä joko työkappaleen ominaisuuksien vaihtelulla paikan funktiona, tai poran kärjen viimeistelyllä. Nachi Fujikoshin porassa on moniviisteinen päästögeometria (Kuva 63), kun Hartnerin porassa on yksinkertainen tylppäkärkinen viimeistely (Kuva 64).







Kuva 64. Hartner poran geometria



Kuva 65. Nachi Fujikoshin poralla saadut momentin arvot



Kuva 66. Nachi Fujikoshin poralla saadut syöttövoiman arvot



Kuva 67. Hartnerin poralla saadut momentin arvot



Kuva 68. Hartnerin poralla saadut syöttövoiman arvot

## 6.4.3 Jäännösjännitysmittausten tulokset

Jäännösjännitysmittauksista saadut tulokset esitetään seuraavassa kuvaajassa (Kuva 69). Tulokset on esitetty maksimi- ja minimijännityksinä. Näistä jännityksistä lasketaan XX-suuntaiset jännitykset olettaen materiaalin olevan isotrooppista. XX-suunnalla tarkoitetaan kappaleen tangentin suunnassa olevia jännityksiä.

Kuva 71 esittää XX-suuntaisia jännityksiä koekappaleesta mittauspisteistä 3, 4 ja 5. Kuva 70 esittää vastaavat referenssikappaleen jännitykset. Kuva 72 esittää lopullisen sorvaamisesta aiheutuneen jännitysprofiilin koekappaleen ja referenssikappaleen jännitysprofiilien erotuksena. Kuvaajia tarkasteltaessa on huomioitava, ettei reiänporausmenetelmällä saada tuloksia alle 0.1 millimetrin syvyyksillä. Tulosten tarkkuus heikkenee 0.8 millimetriä syvemmällä.





Kuva 69. Maksimi ja minimijännitykset [MPa] koekappaleessa syvyyden [mm] funktiona, mittauspisteet ylhäältä alas 3, 4 ja 5


Kuva 70. XX -suuntaisiksi muunnetut koekappaleen jännitykset [MPa] syvyyden [mm] funktiona, mittauspisteet ylhäältä alas 3, 4 ja 5



Kuva 71. Referenssikappaleen XX-suuntaisiksi muunnetut jännitykset



Kuva 72. Koekappaleen ja referenssikappaleen jännitysten erotus

### 6.5 Tulosten vastaavuus

Simulaatiotuloksien ja lastuamiskoetuloksien vertailulla saadaan tietoa simulaatioiden luotettavuudesta, sekä mahdollisista parannuskohteista. On muistettava että kokeelliset menetelmätkään ei ole täysin absoluuttisia, joten kaikkia virhetekijöitä ei voida asettaa simulaatiovirheen syyksi. Koetulosten vertaaminen on suurimmalta osalta yksinkertaista numeroarvojen vertailua, mutta jotkin ilmiöt, kuten lastunmuodon tarkastelu on tehtävä muilla keinoin. Seuraavassa vertaillaan koetuloksia suurekohtaisesti.

#### 6.5.1 Lastuamisvoimat

Lastuamisvoimakuvaajia tarkasteltaessa huomataan lastuamisvoimien vastaavan kokeista saatuja arvoja, mutta 2d simulaatioilla saaduissa tuloksissa on noin 200 Newtonia liikaa. Tämä on yleisesti huomattu ilmiö lastuamisvoimien mallintamisessa elementtimenetelmällä. Tätä on koetettu selittää syötearvojen virheellä sekä tyypillisellä numeerisesta ratkaisusta koituvalla virheellä [60]. Tuoreessa julkaisussa Thomas Childs uskoo virheen johtuvan erityisesti teräksillä esiintyvästä kohonneesta myötörajasta, josta herra Childs kirjoittaa vuonna 2009 julkaistussa artikkelissa [50]. Lopputuloksena voidaan todeta että simuloidut lastuamisvoimat seuraavat lastuamisparametrien aiheuttamaa muutosta hyvin, mutta voimat ovat keskimäärin liian suuria. Taulukko 6 esittää lastuamisvoimatulosten yhteenvedon ja Kuva 73 esittää voimat havainnollisessa kuvaajassa. Mielenkiintoinen trendi on huomattavissa 2D-simulaatioiden lastuamisvoimien arvojen ollessa tarkempia kuin 3D-simulaatioden. Tämä on selitettävissä 2D-simulaatioiden suhteellisen kevyellä laskentakuormalla. Jopa suurilla verkontiheyksillä 2D-simulaatio on nopea laskea tavallisellakin pöytäkoneella. Keskimääräinen virhe 2D-simulaatioissa on 8 %, Advant Edgen 3D-simulaatioissa 27 % ja Deformilla jopa 38 %. Deformin virhettä kasvattavat täysin epäkelvot arvot radiaalivoimissa. Radiaalivoimien virhettä voidaan selittää Deformilla saatujen lastuamislämpötilojen suhteettoman korkeilla arvoilla, joka johtaa materiaalin lämpötilapehmenemiseen ja näin lastuamisvoimien liian pieneen arvoon. Pohdittavaksi jää miksei lämpeneminen vaikuta muihin lastuamisvoimiin, jota voitaisiin tutkia lastuamistapahtuman geometrian pohjalta. Menetelmän voidaan todeta antavan keskimäärin uskottavia tuloksia lastuamisvoimien suhteen, vaikka joiltain osin tuloksissa olisi parannettavaa. On huomattava että näissä simulaatioissa ei ole käytetty lainkaan referenssidataa ennen simulaation luomista, joten simulaatioiden antamat lastuamisvoimien arvot ovat täysin laskennallisesti saatuja tuloksia. Tulosten tarkkuutta voidaan parantaa lastuamiskokeiden ja simuloinnin yhteiskäytöllä. Voidaan muuttaa kitkakertoimen arvoa, jolloin yli- tai alikorostuneet voimat saadaan kohdalleen, materiaalien kovuuksia voidaan säätää, lisäksi terän särmän terävyyttä voidaan säätää. Lisäksi materiaalimallia voidaan korjata kokeiden perusteella, mutta tämä ei ole yksinkertainen korjausoperaatio, vaan vaatii kokeita ja tietämystä asiasta. On myös mainittava että uusimpia kehitysaskeleita, kuten Childsin kohonneen myötörajan mallinnusta ei ole implementoitu vielä tässä työssä käytettyihin ohjelmistoversioihin, joten voidaan uskoa että puhtaasti laskennallisetkin tulokset tarkentuvat jatkossa tutkimus ja kehitystyön tuloksena tasolle, joka mahdollistaa huomattavat säästöt lastuamiskokeiden määrässä.

	a = 4 mm			a = 3 mm			a = 2 mm		
	Fy	Fz	Fx	Fy	Fz	Fx	Fy	Fz	Fx
2d Advant Edge	2631	1053	-	2136	943	-	1412	605	-
3d Advant Edge	2954	1011	407	2166	690	341	1370	338	255
3d Deform	3018	339	530	2232	271	388	1471	205	183
koearvo	2880	1300	620	2220	1000	620	1430	660	550

Taulukko 6. Lastuamisvoimavertailu [N]



Kuva 73. Lastuamisvoimat palkkikuvaajana

Porauskokeiden lastuamisvoiman ja momentin arvoissa näkyi mielenkiintoinen ilmiö. Heikoimmalla simulaatioresoluutiolla arvot vastaavat mitattuja arvoja erittäin hyvin, mutta tarkennettaessa simulaatiota tulosten tarkkuus heikkenee. Taulukko 7 ja Kuva 74 esittävät saatuja simulaatio- ja lastuamiskoetuloksia vertailutaulukossa. Kysymykseen miksi simulaatiotulokset suppenevat väärään suuntaan tarkkuutta lisätessä, voidaan arvella vaikuttavan käytetyn porageometrian mallin, jossa voi olla joitain geometrisiä poikkeamia verrattuna lastuamiskokeissa käytettyihin poriin. Myös materiaalimalli voi vaikuttaa tulosten tarkkuuteen, sillä koekappaleesta mitattu kovuus oli suurempi kuin simulaatiomallin materiaalin oletuskovuus, jota jouduttiin säätämään sopivammaksi. Tämä aiheuttaa muutoksia mallin käyttäytymiseen, joka voi olla virhelähde. Lopulta virhearvioksi tulee keskimäärin 16 %.

KOE	Voima	Momentti
101	1136,94	4,85
Virhe % koe a)	10,3 %	3,8 %
Virhe % koe b)	16,9 %	11,3 %
102	1050,99	4,16
Virhe % koe a)	17,1 %	10,8 %
Virhe % koe b)	23,2 %	4,4 %
103	919,60	3,63
Virhe % koe a)	27,5 %	22,2 %
Virhe % koe b)	32,8 %	16,7 %
Koe a) Nachi Fujikoshi	1267,66	4,67
Koe b) Hartner	1367,85	4,36

Taulukko 7 Poraamisen syöttövoiman [N] ja momentin [Nm] arvot



Kuva 74. Voimat ja momentit eri koesarjoista

## 6.5.2 Lastuamislämpötila

Lastuamislämpötilan määrittäminen sekä simuloimalla että lastuamiskokeilla on haastavaa. Tässä työssä tehtyjen simuloitujen lastunlämpötilojen arvot ovat suuremmat kuin mitatut arvot. Tämä on selitettävissä osittain sillä, että numeerisesta tai mallinnusvirheestä johtuva simuloitujen lastuamisvoimien liian korkea arvo on suoraan verrannollinen lastuamislämpötiloihin. Lastuamislämpötilat esitetään palkkidiagrammilla (Kuva 75) lastuamissyvyyden mukaan järjestettyinä. Huomataan, että selkeästi muista poikkeava tulos saatiin Deform 3D -ohjelmistolla. Tämä on selitettävissä materiaalimallien eroilla eri ohjelmistojen kesken. Deform ohjelmistolla saadut päälastuamisvoimat ovat myös selkeästi muita simuloituja arvoja suuremmat. Voidaan spekuloida josko Deform- ohjelman vahva tausta muokkaavan työstön (takominen, valssaaminen, pursotus) mallintamisessa on jättänyt jälkensä ohjelmistossa käytettäviin materiaalimalleihin, ja näin vääristää tuloksia lastuavaa työstöä mallinnettaessa. Mielenkiintoinen, myös lastuamiskokeista huomattava lämpötilan ja lastuamissyvyyden yhteys on lämpötilan nousu lastuamissyvyyden pienentyessä. Tämä on vain muutamia kymmeniä asteita, mutta kuitenkin intuition vastaisesti. Koska plastinen muodonmuutos on lastuamislämpötilan primäärilähde, voidaan tehdä seuraavanlainen hypoteesi. Plastisen muodonmuutoksen määrä pienentyy suhteessa ympäröivän materiaalin määrään, kun lastuamissyvyys kasvaa. Kun ympäröivä materiaali omaa korkean lämmönjohtavuuden, kuten teräkset yleensä, materiaali johtaa suhteessa pienenevän lämpölähteen tuottaman lämmön nopeammin muualle työmateriaaliin, josta seuraa maksimilämpötilan pienentyminen lastuamissyvyyden kasvaessa. Tämän todentaminen vaatisi lisätutkimusta, jota ei tämän työn puitteissa ollut resursseja, tai hyvää syytä tehdä. Lastuamislämpötilojen voidaan sanoa olevan oikealla dekadilla, mutta vakuuttavamman tuloksen saamiseksi vaadittaisiin simulaatioiden kalibrointia lastuamiskokeiden avulla.



Kuva 75. Lastunlämpötilat vertailutaulukossa [°C]

# 6.5.3 Lastunmuoto

Lastun muodosta on helppo tarkastella simulaation kykyä mallintaa todellisuutta. Lastun muotoa tarkastellaan 2D-simulaatiosta muodostuneiden lastujen ja lastuamiskokeissa syntyneiden lastujen sivuprofiilista. Kuva 76 esittää simuloitujen ja kokeellisesti saatujen lastunmuotojen sivuprofiilit yksittäin ja vertailukuvana. Kuvaajista on hankala laskea validia virheprosenttia, joten tämä tarkastelu on tehty täysin silmämääräisen arvion perusteella Huomataan, että simuloidun lastun koko vastaa hyvin kokeellisesti saatuja tuloksia. Myös simuloidun lastun kiertymä on suurella skaalalla tarkka, mutta kokeista saatujen lastujen sisäkierre on tiukempi verrattuna simuloituun. Tämä voidaan selittää simulaation dimensioista aiheutuvana virheenä, sillä koelastujen kiertymä ei ole ainoastaan kahdessa tasossa, vaan myös kuvassa paperiin päin. Huomataan myös että syvyyssuuntainen kiertymä alkaa jokseenkin samassa kohtaa kuin simuloidut lastut katkeavat. Syvyyssuuntainen kiertymä nähdään kuvan fokuksen muuttuessa epätarkaksi, kuvassa keltaisella merkityissä kohdissa. 2D-simulaatioista saatujen lastunmuotojen voidaan sanoa olevan hyvä estimaatti todellisista lastuista.



Kuva 76. Lastunmuodot ylhäältä alas 2 mm, 3 mm, 4mm lastuamissyvyydellä [ruudun koko 0.5x0.5 mm]

3D-simulaatioista saatujen lastunmuotojen tarkastelu on huomattavasti hankalampaa kuin 2D-lastujen. Tarkastelu tehdäänkin etsimällä lastuamiskokeista saaduista lastuista karakteristisia piirteitä ja tutkimalla piirteiden vastaavuutta 3D-lastusta. Seuraava kuva (Kuva 77) esittää lastuamiskokeista saatuja lastunmuotoja lastuterä-rajapinnalta vertaillen niitä Deformista saatuihin lastunmuotoihin. Nähdään, että terän lastunmurtaja jättää uran lastun keskelle, joka on selvästi huomattavissa myös simuloiduissa lastuissa.



Kuva 77. Deformista saadut lastunmuodot oikealla verrattuna todellisiin lastunmuotoihin vasemmalla

Advant Edge 3D:llä saadut lastunmuodot esitetään seuraavissa kuvissa (Kuva 78 -Kuva 80). Kuvista nähdään, että myös Advant Edgellä lastunmurtaja jättää selvästi tunnistettavan uran lastun keskelle. Myös lastujen kiertymä on muistuttaa silmämääräisesti kokeellisesti tuotettujen lastujen kiertymää.











Kuva 80 Advant Edge 3D lastunmuoto 2 mm lastuamissyvyydellä

## 6.5.4 Jäännösjännitykset

Advant Edgellä saadun jännitysprofiilin ja mitattujen jännitysten välillä nähdään selvä yhteys (Kuva 81). Vaikka mittauksista ei voida varmistaa jännitysprofiilin muotoa, suuruus on erittäin hyvällä tarkkuudessa selvillä. Simulaatiosta saatu suuri vetojännitys alle 0,1 millimetrin syvyydellä on tyypillinen jännitysprofiili ja vastaavanlaisia profiileja on raportoitu aiemmissa tutkimuksissa. Tältä osin reiänporausmenetelmällä saadut tulokset vaikuttaisivat olevan ristiriidassa simuloitujen arvojen kanssa, mutta koska reiänporausmenetelmä ei anna parhaassakaan tapauksessa luotettavia arvoja alle 0,1 millimetrin, voidaan vielä luottaa simuloidun profiilin olevan uskottava, varsinkin aiemman tutkimuksen valossa. Jotta koekappaleesta voitaisiin varmistaa pinnan alainen vetojännitys, pitäisi tehdä lisämittauksia röntgendiffraktiota käyttäen. Kuvaajasta nähdään kuinka kappaleeseen syntyy noin 5-10 MPa puristusjännitys pinnan alle.



Kuva 81. Mitatut ja simuloidut jäännösjännitysten arvot kuvaajassa syvyyden funktiona

# 7 Luotettavuusanalyysi

Simulointi on tehokas tapa tutkia ja parantaa mitä tahansa ilmiötä tai prosessia. Prosessia kehitettäessä päästään parhaisiin lopputuloksiin, kun simulaatioiden tulosdataan voidaan luottaa. Jotta simulaatiodataan voidaan luottaa, tarvitaan tietoa sekä simulaation tuomasta virheestä, että verifiointikokeiden mittausvirheestä. Elementtimenetelmä on laskennallisesti ideaalinen numeerinen ratkaisija osittaisdifferentiaaliyhtälöiden ratkaisemiseen, sillä menetelmästä voidaan aina laskea kustakin probleemasta syntyvä keskimääräinen virhe tai maksimivirhe. Lastuavan työstön mallintamisessa esiintyy useita, hankalia virhetekijään liittyviä seikkoja. Vaikka elementtiratkaisijan numeerinen virhe voidaan laskea hyvinkin tarkasti, lastuamista kuvaava fysikaalinen malli tuottaa oman mallinnusvirheensä ratkaisuun. Elementtiratkaisijan numeerinen virhe voi olla merkityksettömän pieni, mutta materiaalimallin ollessa niin puutteellinen, että simulaatioiden lopputulokset eivät vastaa mitattuja arvoja, ei lopullista virhettä voida laskea mallista. Tämän mahdollisen puutteellisuuden aiheuttama virhe olisi helppo tutkia laajamittaisilla lastuamiskokeilla, mutta ongelmaksi nousee lastuttavien materiaalien kirjo ja sitä kautta materiaalimallien monimuotoisuus. Luonnollisestikaan kaikkia materiaaleja ei voida tutkia laajamittaisilla lastuamiskokeilla, joten virhetekijöiden kontrollointi on hoidettava muutoin. Yleisin ratkaisu on simulaatioiden ja lastuamiskokeiden yhteiskäyttö. Luodaan simulaatiot, jotka kalibroidaan lastuamiskokeiden avulla, jolloin voidaan olettaa simulaatioiden tuottavan kyseessä olevan materiaalin osalta hyviä tuloksia. Lastuamiskokeiden virhe on tutkittavissa toistokokein.

Tässä työssä laadittiin kolme koesarjaa: sorvauskokeet, joissa mitattiin lastuamisvoimia ja lämpötilaa, porauskokeet, joissa mitattiin voimaa ja momenttia sekä jäännösjännityskokeet, joissa mitattiin kappaleeseen työstöstä syntyviä jäännösjännityksiä. Voimanmittauskokeista toistokokeiden tuloksena saatiin laskettua virheen suuruus, joka on  $1,4 \pm 1,2$  %. Lastuamislämpötilan virheen suuruuden voidaan vain arvioida olevan 20 % luokkaa. Reiänporausmenetelmällä suoritetut jäännösjännitysmittaukset ovat hyvin häiriöherkkiä. Venymäliuskojen hyvä kiinnitys on tärkeää, sillä huonosti kiinnitetystä liuskasta aiheutuvaa virhettä on hyvin vaikea määrittää, ja virhe voi olla suuri. Venymäliuskan kiinnitys liimaamalla vaatii kiinnityspinnan hionnan, joka aiheuttaa suuren puristusjännityksen pintaan. Nämä jännitykset vaikuttavat 30 µm saakka. Toinen suuri virhelähde on porauksen epäkeskisyys venymäliuskaan nähden. Alle 2 % virheessä pysytään kun epäkeskisyys on alle 0,025 millimetriä. Myös poraamisesta ja siitä aiheutuvasta lämpenemisestä aiheutuu virhettä mittauksiin. Reiän etäisyyden kappaleen reunasta on oltava moninkertainen reiän halkaisijaan nähden. Tässä työssä tehtyjen mittausten etäisyyteen reunasta ei voitu vaikuttaa, ja reiät ovat hieman epämukavasti vain 5 millimetrin etäisyydellä reunasta, reiän ollessa 2 millimetriä, saadaan virheeksi noin 12 % Eero Mullin diplomityössä esitetyn mallin mukaan [58, s. 26]. Kaiken kaikkiaan jäännösjännitysten koearvojen virheen voidaan arvioida olevan 14 % luokkaa. Lastuamiskokeiden ja simulaatioiden tuloksien vastaavuudesta saadut simulaatioiden virheet ovat sorvauskokeiden lastuamisvoimien osalta keskimäärin  $20 \pm 10$  %. Lämpötilojen osalta Advant Edgellä saadut virheet ovat  $30 \pm$ 20 %. Deformilla tulokset olivat kaksinkertaisia mitattuihin arvoihin nähden, joten voidaan todeta simulaatioiden epäonnistuneen mallintamaan todellisuutta lämpötilojen suhteen. Poraamista tarkasteltiin lastuamisvoimien ja momentin suhteen. Porauskokeiden tuloksissa nähtiin erikoinen ilmiö, kun simulaation numeerista tarkkuutta kasvatettiin, tulokset heikkenivät verrattuna mitattuihin arvoihin. Tämä vahvistaa väitettä, että numeerinen virhe on suhteellisen pieni verrattuna itse mallin epätarkkuuksiin. Kaiken kaikkiaan virhe pysyi keskimäärin alle 16 %:ssa.

Jäännösjännitysten osalta simuloimalla saatu jännitys oli 5-10 MPa luokkaa, ja mitatut arvot ovat noin 5 MPa, joten simulointi onnistui hyvin suuruusluokassa, mutta jännitysprofiilin oikeellisuudesta ei voida sanoa enempää, sillä reiänporausmenetelmällä alle 0.1 millimetrin syvyyksillä tuloksiin ei voida luottaa edes viitteellisinä. Simuloimalla saatiin suuri vetojännitys heti pinnan alla alle 0.1 millimetrin syvyydellä, jota mittaamalla ei voitu todentaa. Vastaavanlaisia profiileja on saatu muissa tutkimuksissa, joten simulaation antamaa profiilia ei ole syytä epäillä suuremmin. Virhearvion antaminen prosentteina ei kuvaisi simulaation tarkkuutta kuvaavasti.

On huomattava että tehtyjä simulaatioita ei ole kalibroitu lastuamiskokeiden avulla, vaan tulokset on saatu suoraan ohjelmistojen vakioarvoja käyttäen. Yhdellä kalibroinnilla simulaatiotuloksia voitaisiin parantaa huomattavasti, vaikka tulokset ilmankin kalibrointia ovat osittain hyvin lähellä todellisuutta. Yleisesti ottaen simuloimalla saadut tulokset ilman kalibrointia voivat olla hyvinkin lähellä oikeita, kuten Advant Edge 2D:n lastuamisvoimien tulokset alle 8 % virheellä, mutta poikkeavat keskimäärin 30 % mitattavan suuren todellisista arvoista. Tutkimuksissa on raportoitu päästävän alle 5 % kokonaisvirheisiin kalibroinnin avulla. Suurimmiksi virhelähteiksi tutkimuksissa ovat paljastuneet materiaalimallit, joita tutkitaan tiiviisti. Lähitulevaisuudessa voidaan odottaa suuria parannuksia menetelmän tarkkuuteen ja nopeuteen, sekä mallien tutkimuksen että tietotekniikan kehityksen myötä.

# 8 Johtopäätökset ja suositukset

Elementtimenetelmän ensimmäinen lastuavan työstön sovellus oli hyvin tarkkaan rajattu, juuri tietyillä prosessiparametreilla ortogonaalia lastuamistapausta simuloiva ratkaisija. Näiden rajoitusten sisälläkään tulokset eivät olleet erityisen hyviä. Vajaan kahdenkymmenen vuoden kehityksen jälkeen ollaan pisteessä, jossa simulaatioparametreille ei juuri ole rajoituksia tunnettujen lastuamismenetelmien parissa. Simulaatioiden tulokset riippuvat pitkälti materiaalimallin tarkkuudesta, ei niinkään numeerisesta tarkkuudesta. Menetelmälle voidaan antaa yleinen virhearvio 50 %, joka on kuitenkin vielä liian suuri, jotta menetelmää voitaisiin käyttää yksistään ilman lastuamiskokeita teollisuuden tutkimusongelmien simulointiin. Todennäköisesti virhe on lähes aina pienempi, mutta tätä ei voida tietää ennen lastuamiskokeita. Lastuamiskokeiden avulla kalibroituna simulaatioiden virhe voidaan saada alle 5 %. Tällaisella tulosten tarkkuudella simulaatioiden avulla voidaan optimoida lastuamisparametreja tehokkaasti. Vaikka menetelmä ja lastuamista kuvaavat fysikaaliset mallit eivät aina anna absoluuttisen tarkkoja lukuarvoja, on ilmiöiden kuvaus oikein. Kun lastuamissyvyyttä lisätään, lastuamisvoimat kasvavat, tai kun teräkulmia muutetaan, malli käyttäytyy oikein. Usein myös lukuarvojen muutos on oikeaa suuruusluokkaa, vaikka skaala olisi väärin. Menetelmää tutkitaan laajalti ja monissa tutkimusjulkaisuissa on esitetty parannuksia materiaalimalleihin tai lastuamisessa esiintyviin fysikaalisten ongelmien malleihin, joiden avulla on päästy erittäin hyviin tarkkuuksiin ilman simulaation kalibrointia.

Lastuamisparametrien optimoinnilla saavutettavat säästöt kertautuvat varsinkin suurissa sarjoissa. Tuotantonopeus ja valmistuskustannukset ovat tärkeimmät parametrit prosessia tarkasteltaessa. Lastuamisnopeuden prosentuaalisen noston x, ja lastuamiskustannusten prosentuaalisen säästön y, vaikutus kertaantuu kappalekohtaisissa kokonaiskustannuksissa karkeasti kaavan (107) mukaisesti, jolloin x:n ja y:n prosentuaalinen vaikutus lähes kaksinkertaistuu kokonaiskustannuksissa.

$$(1-(1-x)(1-y))100\%$$
 (107)

Tuotantokustannusten säästö on erityisen tärkeässä asemassa tuotteilla, joilla hintakilpailu on kovaa ja sarjat suuria. Yritysten, joiden tuotteet kuuluvat tähän kategoriaan, tulisi investoida lastuavan työstön tehostamiseen. Tämä voidaan tehdä perinteisesti lastuamiskokein, mutta jotta koko teollisuudenala voi hyötyä, tulee perustaa instanssi, jolta voidaan tilata lastuamissimulaatiot ja verifiointikokeet, jolloin optimointikustannukset ovat edullisemmat ja myös pienemmillä yrityksillä on mahdollisuus käyttää kyseisiä palveluja. Tutkimuspuolella tulisi keskittyä menetelmän kehittämiseen niin, ettei se olisi niin materiaalimalliriippuvainen. Jos tutkimusongelmassa esiintyvää materiaalia ei ole valmiiksi simulointiohjelmiston materiaalikirjastossa, materiaalin käyttäytymistä kuvaavat mallin on ohjelmoitava ja testattava itse. Tällöin simulointi tulee kalliiksi. Jos tämän voisi korvata tietyillä standardikokeilla, jotka kertovat materiaalista riittävästi tietoa lastuamissimuloinnin suorittamiseksi ja jotka voisi syöttää suoraan simulaatioon parametreina, olisi menetelmä huomattavasti käyttökelpoisempi esimerkiksi uusien materiaalien lastuttavuutta tutkittaessa. Itse menetelmän tarkkuutta ei tarvitse kehittää, sillä se tapahtuu itsestään materiaalimallien ja tietotekniikan kehityksen myötä. Tällä hetkellä tärkeintä on tuoda Suomeen riittävä osaaminen ja aloittaa kaupallinen soveltaminen, jotta tulevaisuudessa ei jouduta tilanteeseen, jossa ollaan myöhässä uuden tekniikan käyttöönotossa ja joudutaan hakemaan osaamista ulkomailta. Osaaminen on Suomen teollisuuden kilpailuvaltti, joten sitä tulee myös ylläpitää.

# **9** Yhteenveto

Tämän työn tavoitteena oli tutkia lastuavan työstön elementtimallintamisen soveltuvuutta teollisuuden käyttötarpeisiin ja päätellä menetelmän tarkkuuden nykytilanne. Työssä esiteltiin tyypilliset lastuavat työstömenetelmät, elementtimenetelmän perusteet ja aikaisemmat tutkimukset aiheesta. Itse tutkimus suoritettiin kahdella kaupallisella elementtiratkaisijalla; Advant Edge ja Deform. Molemmat ovat Lagrangen formuloinnilla toteutettuja elementtiratkaisijoita, joissa lastunirtoaminen on toteutettu adaptiivisella uudelleenverkottamisrutiinilla. Erona ohjelmistoissa on aikaintegrointi, joka Advant Edgessä on toteutettu eksplisiittisenä ja Deformissa implisiittisenä. Ohjelmistojen käytettävyyttä ja tarkkuutta tutkittiin simuloimalla kolme tyypillistä lastuamistapausta, joiden tuloksia verrattiin lastuamiskokeista saatuihin arvoihin. Kohteet olivat sorvaaminen, poraaminen ja jäännösjännitysten muodostuminen. Tutkimustulosten perusteella todettiin ratkaisijoiden tarkkuuden kehittyneen menetelmän alkuajoista, mutta niiden todettiin olevan vielä liian arvaamattomia käytettäväksi täysin ilman lastuamiskokeita, joilla simulaatiot voidaan kalibroida. Elementtimenetelmä itsessään ei tuota ongelmia, koska sen aiheuttama numeerinen virhe on laskettavissa, mutta vaikka numeerinen virhe minimoitaisiin, taustalla olevat fysikaaliset mallit, kuten materiaalimallit, aiheuttavat suurimman virheen. Muiden tekemiä tutkimuksia käsittelevässä osiossa esiteltiin muutamia parannusehdotuksia menetelmään, erityisesti materiaalimallien osalta. Näiden parannusten ja tietotekniikan jatkuvan kehityksen tuoman laskentatehon kasvun todetaan parantavan menetelmän tarkkuutta niin, että jatkossa ei enää tarvittaisi lastuamiskokeita lähellekään samalla tavoin kuin nykyään, parhaassa tapauksessa ei ollenkaan. Käytettävyyden osalta todetaan Advant Edgen soveltuvan paremmin teollisuuden työkaluksi sen selkeän käyttöliittymän ja helpon käytettävyyden vuoksi, kun taas Deform on selkeästi enemmän tutkimustyökalu siinä olevien lukuisten säätömahdollisuuksien, mutta monimutkaisen käyttöliittymän vuoksi. Ohjelmistojen välillä ei huomattu selkeää eroa simulointitarkkuudessa, joskin Advant Edgen voidaan sanoa tuottavan tuloksia hieman varmemmin kuin Deformin. Menetelmään panostamisen todetaan tuovan kilpailuetua tulevaisuudessa, erityisesti kun Suomen kokoisen maan teollisuus ei voi kilpailla volyymillä, vaan etua saadaan laadulla, osaamisella ja tuotannon tehokkuudella.

### Lähdeluettelo

1 Boothroyd, G., Knight, W.A., Fundamentals of Machining and Machine Tools, New York, Dekker, 1989, ISBN: 0-8247-7852-9

2 Childs, T.H.C., Maekawa, K., Obikawa, T., Yamane, Y., Metal Machining; Theory and Applications, Lontoo, Arnold, 2000, ISBN: 0-340-69159-X

3 Aaltonen, K., Andersson, P., Kauppinen, V., Konepajan tuotantotekniikka; Koneistustekniikat, Porvoo, WSOY, 1997, ISBN: 951-0-21437-X

4 Kienzle, O., Victor, H., Die Bestimmung von Kräften und Leistungen an spanenden Werkzeugmaschinen, *VDI-Z* 94 (11–12) 1952, s. 155–171.

5 Petropoulos, G., Ntziantzias, I., Anghel, C., A Predictive Model of Cutting Force in Turning Using Taguchi and Response Surface Techniques, 1st International Conference on Experiments/Process/System Modelling/Simulation/Optimization, Ateena , 2005

6 Vihinen, J., Lastuamisvoimat, Lisensiaatinseminaari, TTK, Tampere, 1993

7 Ottosen, N., Petersson, H., Introduction to the Finite Element Method, Essex, Pearson – Prentice Hall, 1992, ISBN: 0-13-473877-2

8 Belytschko, T., Liu, W.K., Moran, B., Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures, Chichester, John Wiley & Sons, 2006, ISBN: 978-0471-98773-4

9 NAFEMS, A Finite Element Primer, Glasgow, Bookcraft Ltd., 2003, ISBN: 0-903640-17-1

10 Ottosen, N.,S., Ristinmaa, M., The Mechanics of Constitutive Modeling, Lund, ELSEVIER, 2005, ISBN: 978-0-08-044606-6

11 Korhonen, A., Larkiola, J., Ohutlevytekniikan perusteet, Oppikirjan käsikirjoitus, 2008

12 Marusich, T.D., Askari, E., Modeling Residual Stress and Workpiece Quality in Machined Surfaces, Fourth CIRP international workshop modeling of machining operations, Delft Technological University, 2001. p.105–109 13 Marusich, T.D., Ortiz, M., Modeling and Simulation of High-Speed Machining, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Volume 38 Issue 21, 1995, s. 3675 - 3694

14 Mackerle, J., Finite-element analysis and simulation of machining: a bibliography (1976-1996), Journal of Materials Processing Technology, Volume 86, Number 1, 1998, s. 17-44

15 Mackerle, J., Finite-element analysis and simulation of machining: An addendum A bibliography (1996-2002), International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 43, Issue 1, 2003, s. 103-114

16 Yen, Y., Jain, A., Altan, T., A finite element analysis of orthogonal machining using different tool edge geometries, Journal of Materials Processing Technology, Volume 146, Issue 1, 2004, s. 72-81

17 Usui, E., Hirota, M., Masuko, A., Analytical prediction of three dimensional cutting process: part 1 basic cutting model and energy approach, ASME Journal of Engineering for Industry 100, 1978, s. 222–228

18 E. Usui, A. Hirota, Analytical prediction of three dimensional

cutting process: part 2 chip formation and cutting force with conventional singlepoint tool, ASME Journal of Engineering for Industry 100, 1978, s. 229–235

19 Strenkowski, J.S., Shih, A.J., Lin, J.C., An analytical finite element model for predicting three-dimensional tool forces and chip flow, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 42, Issue 6, 2002, s. 723-731

20 Karpat, Y., Özel, T., Sockman, J., Shaffer, W., Design and Analysis of Variable Micro-Geometry Tooling for Machining Using 3-D Process Simulations, International Conference on Smart Machining Systems, 2007

21 Uhlmann, E., Graf von der Schulenburg, M., Zettier, R., Finite Element Modeling and Cutting Simulation of Inconel 718, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 56, Issue 1, 2007, s. 61-64

22 M., Graf von der Schulenburg, E., Uhlmann, Thermographic Temperature Measurement on the Tool and the Workpiece during Milling, European Society for Precision Engineering and Nanotechnology -EUSPEN-: Proceedings of the Topical Meeting: Thermal Effects in Precision Systems Maastricht, 2007, S.42-44

23 Bhushan, B., Gupta, B.K., Handbook of Tribology, Materials, Coatings, and Surface Treatments, New York, McGgraw-Hill, 1991, ISBN 0-07-005249-2

24 Matsumura, T., Shirakashi, T., Usui, E., Identification of Wear Characteristics in Tool Wear Model of Cutting Process, International Journal of Material Forming, Volume 1, Supplement 1, 2008, s. 555-558, ISSN:1960-6206

25 Usui, E., Shirakashi, T., Analytical Prediction of Cutting Tool Wear, Wear 100:11, 1984, s. 129-151

26 Taylor, F. W., "On the art of metal cutting", Transactions ASME, 28, 1901

27 Xie, L.-J., Schmidt, J., Schmidt, C., Biesinger, F., 2D FEM estimate of tool wear in turning operation, Wear, Volume 258, Issue 10, 2005, s. 1479-1490

28 Attanasio, A., Ceretti, E., Rizzuti, S., Umbrello, D., Micari, F., 3D finite element analysis of tool wear in machining, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 57, Issue 1, 2008, s. 61-64

29 Childs, T.H.C., Friction modeling in metal cutting, Wear, Volume 260, Issue 3, 2006, s. 310-318

30 Finnie, I. Shaw, M.C., The friction process in metal cutting, Trans. ASME J. Eng. Ind. 79B (1957) 1649-1657

31 Arrazola, P.J., Ugarte, D., Domínguez, X., A new approach for the friction identification during machining through the use of finite element modeling, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 48, Issue 2, 2008, s.173-183

32 Lorentzon, J., Järvstråt, N., Modelling tool wear in cemented-carbide machining alloy 718, International journal of machine tools & manufacture, 2008, s.1072-1080, ISSN: 0890-6955

33 Özel, T., The influence of friction models on finite element simulations of machining, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 46, Issue 5, 2006, s. 518-530 34 Outeiro, J.C., Umbrello, D., Pina, J.C., Rizzuti, S., Modelling of Tool Wear and Residual Stress during Machining of AISI H13 Tool Steel, MATERIALS PROCESSING AND DESIGN; Modeling, Simulation and Applications; NUMI-FORM '07; Proceedings of the 9th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes. AIP Conference Proceedings, Volume 908, 2007, s. 1155-1160

35 Ee, K.C., Dillon Jr., O.W., Jawahir, I.S., Finite element modeling of residual stresses in machining induced by cutting using a tool with finite edge radius, International Journal of Mechanical Sciences, Volume 47, Issue 10, 2005, s. 1611-1628

36 Gripenberg, H., Mekaanisen työstön jäännösjännitykset termomekaanisesti muokatussa teräksessä RAEX 560 HSF, RESTEM-projekti, Teknillinen Korkeakoulu, Materiaalitekniikan laboratorio, 2001

37 Outeiro, J.C., Pina, J.C., M'Saoubi, R., Pusavec, F., Jawahir, I.S., Analysis of residual stresses induced by dry turning of difficult-to-machine materials, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 57, Issue 1, 2008, s. 77-80

38 Umbrello, D., Ambrogio, G., Filice, L., Shivpuri R., A hybrid finite element method–artificial neural network approach for predicting residual stresses and the optimal cutting conditions during hard turning of AISI 52100 bearing steel, Materials & Design, Volume 29, Issue 4, 2008, s. 873-883

39 Salio, M., Berruti, T., De Poli, G., Prediction of residual stress distribution after turning in turbine disks, International Journal of Mechanical Sciences, Volume 48, Issue 9, 2006, s. 976-984

40 Altan, T., Al-Zkeri, I., Sartkulvanich, P., Process Modeling of High Speed Cutting using 2D FEM, International Conference of Smart Machining Systems, 2007

41 The material flow stress database for machining simulation (MADAMS) http://nsm.eng.ohio-state.edu/madams/, viitattu 6.8.2009

42 Milani, A.S., Dabboussi, W., Nemes, J.A., Abeyaratne, R.C., An improved multi-objective identification of Johnson-Cook material parameters, International Journal of Impact Engineering, Volume 36, Issue 2, 2009, s. 294-302

43 Hopkinson Split Bar –menetelmä, http://www.tut.fi/index.cfm?MainSel=-1&Sel=19862&Show=17946&Siteid=141, viitattu 6.8.2009

44 Fang, N., A New Quantitative Sensitivity Analysis of the Flow Stress of 18 Engineering Materials in Machining, Journal of engineering materials and technology, 2005, vol. 127, no. 2, s. 192-196, ISSN: 0094-4289

45 Umbrello, D., M'Saoubi, R., Outeiro, J.C., The influence of Johnson–Cook material constants on finite element simulation of machining of AISI 316L steel, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 47, Issues 3-4, 2007, s. 462-470

46 Tounsi, N., Vincenti, J., Otho, A., Elbestawi, M.A., From the basic mechanics of orthogonal metal cutting toward the identification of the constitutive equation, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 42, Issue 12, 2002, s. 1373-1383

47 Childs, T.H.C, Numerical experiments on the influence of material and other variables on plane strain continuos chip formation in metal machining, International journal of mechanical sciences, vol. 48, no. 3, 2006, s. 307-322, ISSN: 0020-7403

48 Merchant, M.E., Mechanics of the metal cutting process, J. Appl. Phys. 16, 1945, s. 318-324.

49 Lee, E. H. and Shaffer, B. W., The theory of plasticity applied to a problem of machining. Trans. ASME J. Appl. Mech. 18, 1951, s. 405-413

50 Childs, T.H.C., Rahmad, R., The Effect of a Yield Drop on Chip Formation of Soft Carbon Steels, 12th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations, 2009

51 Childs, T.H.C, Modelling orthogonal machining of carbon steels. Part I: Strain hardening and yield delay effects, International Journal of Mechanical Sciences, Volume 51, Issue 5, 2009, s. 402-411

52 Childs, T.H.C., Rahmad, R., Modelling orthogonal machining of carbon steels. Part II: Comparison with experiments, International Journal of Mechanical Sciences, Volume 51, Issue 6, 2009, s. 465-472

53 Zorev, N.N., Metal Cutting Mechanics, Pergamon Press, Oxford, 1966

54 Calamz, M., Coupard, D., Girot, F., A new material model for 2D numerical simulation of serrated chip formation when machining titanium alloy Ti–6Al–4V, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 48, Issues 3-4, 2008, s. 275-288

55 Advant Edge Kotisivu, www.thirdwavesys.com, viitattu 6.8.2009

56 Deform Kotisivu, www.deform.com, viitattu 6.8.2009

57 Lämpökuvauksen teoriaa, Publ. No. 1 557 713 Rev. A – FINNISH (FI) – April
16, 2003, http://www.infradex.com/pdf/teoria.pdf, viitattu 6.8.2009

58 Mulli, Eero, Terästermotelan sisäisten jännitysjakaumien kokeellinen tutkiminen ja selvitys, Teknillinen Korkeakoulu, Koneenrakennuksen materiaalitekniikan laboratorio, Espoo, 117 s.

59 Gandarias, A., Lopez de Lacalle, L.N., Aizpitarte, X., Lamikiz, A., Study of the performance of the turning and drilling of austenitic stainless steels using two coolant techniques, International Journal of Machining and Machinability of Materials, Volume 3, Number 1-2, 2008, s.1 - 17

60 Deform koulutusmanuaali 2008; Wilde Deform -3D Machining