

Särmäyksen simulointi ja käytäntö

Tuomo Penttinen

Opinnäytetyö

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä(t) Tuomo Penttinen	
Työn nimi Särmäyksen simulointi ja käytäntö	
Päiväys 29.5.2012	Sivumäärä/Liitteet 43/9
Ohjaaja(t) lehtori Mika Mäkinen	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Savonia-ammattikorkeakoulu, projekti-insinööri Aku Tuunainen	
Tiivistelmä <p>Tämän opinnäytetyön aiheena oli selvittää AutoPOL-ohjelman toiminta ja kyvykkyys särmäyksen apuvälineenä teollisessa ympäristössä. Työ tehtiin Savonia-ammattikorkeakoulun hitsauslaboratoriossa.</p> <p>Työn toteuttaminen aloitettiin kalibroimalla laitteistot eri materiaaleille ja levyjen paksuuksille. Kalibrointi toteutettiin särmäämällä tietyinkokoiset testikappaleet, mittaamalla ne ja syöttämällä testikappaleen mittaustulokset AutoPOL-ohjelmaan. Kalibroinnin jälkeen siirryttiin testikappaleisiin, joista tehtiin kustakin kappaleesta mittausanalyysi. Varsinaisina testikappaleina käytettiin HT Laser Oy:n tuotannossa olevia kappaleita. Lisäksi laadittiin AutoPOL-ohjelman käyttöohjeet.</p> <p>Työn tuloksena saatiin tietää AutoPOL-ohjelman soveltuvan särmäyksen apuvälineeksi, materiaaliasetukset ohjelmaan eri materiaaleille ja eri paksuuksille. Särmäyksessä käytetyistä kappaleista saatiin kappalekohtaiset analyysit. Lisäksi laadittiin käyttöohjeet AutoPOL-ohjelmasta, jota voidaan käyttää opetustarkoituksessa.</p>	
Avainsanat särmäys, simulointi, ohutlevy	
julkinen	

Field of Study Technology, Communication and Transport	
Degree Programme Degree Programme in Mechanical Engineering	
Author(s) Tuomo Penttinen	
Title of Thesis Simulation and Practice of Bending	
Date May 29, 2012	Pages/Appendices 43/9
Supervisor(s) Mr. Mika Mäkinen, Lecturer	
Client Organisation/Partners Savonia University of Applied Sciences, Project Engineer Aku Tuunainen	
<p>Abstract</p> <p>The subject of this final year project was to determine the activities and capabilities of AutoPOL bending simulation program in an industrial environment. The work was done in the welding laboratory of Savonia University of Applied Sciences.</p> <p>The project was started by calibrating the equipment for various materials and sheet thicknesses. Calibration was done by bending test pieces of certain sizes, measuring them and loading the test results into AutoPOL program. The actual test pieces were items that HT Laser Ltd has in production and each item was measured and analysed. Instructions for the use of AutoPOL program were also made.</p> <p>As a result of this project it was proved that AutoPOL program is a suitable tool to be used in bending. Material settings for different materials and thicknesses and test results of the items used were also found out as well as instructions for using AutoPOL were made.</p>	
Keywords bending, simulation, sheet metal, flanging	
public	

ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö tehtiin Savonia-ammattikorkeakoulun HitNetWork-hankkeeseen. Työssä tutkittiin AutoPOL-ohjelmaa teollisessa ympäristössä.

Haluan kiittää HT Laser Oy Vieremää yhteistyöstä sekä hitsauslaboratorion henkilökuntaa mahdollisuudesta tehdä opinnäytetyö. Haluan kiittää myös lehtori Mika Mäkistä opinnäytetyön ohjaamisesta ja avusta.

kuopiossa 29.5.2012

Tuomo Penttinen

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	9
2	AUTOPOL.....	10
2.1	Designer	10
2.2	Unfolder	11
2.3	Piper	12
2.4	Bend Simulator.....	14
3	TAIVUTTAMINEN	15
3.1	Taivuttamisen perusteet.....	15
3.2	Plastinen ja elastinen muodonmuutos	15
3.3	Taivutuksen vaiheet.....	15
3.4	Neutraaliakseli.....	17
3.5	Taivutussäde.....	18
3.6	Takaisinjousto	19
3.7	Oikaistupituus	20
3.8	K-kerroin	22
4	SÄRMÄYSLAITTEISTOT	25
4.1	Särmäyspuristin.....	25
4.1.1	Vapaa taivutus.....	26
4.1.2	Pohjaaniskutaivutus.....	27
4.1.3	Elastisen vastimen avulla taivutus	28
4.2	Taivutuskone.....	29
4.3	Taivutusautomaatti	29
5	MATERIAALIT	31
5.1	Lujat teräkset	31
5.2	Lujien terästen taivutus	31
5.3	Lujien terästen taivutuksessa esiintyvät ongelmat	31
6	SÄRMÄTTÄVÄT KAPPALEET.....	33
7	KOKEELLINEN OSUUS	34
7.1	Tavoitteet	34
7.2	Alkujärjestelyt	34
7.3	Käytetyt laitteet, ohjelmat ja materiaalit.....	35
7.4	Särmäysohjelmien luonti.....	36
7.5	Kappaleiden särmäys	36
8	TULOKSET	37

8.1 Mittatarkkuus ohutlevyillä.....	37
8.1.1 Mittaustulokset	38
8.1.2 Työkalujen mukaan laskettu sisäsäde.....	38
8.2 Paksujen materiaalien särmäys AutoPOL-ohjelmalla	40
8.3 HT-Laser Oy Vieremän kappaleet	40
8.4 AutoPOL-käyttöohjeet	40
9 YHTEENVETO JA TYÖN ARVIOINTI.....	41
10 JATKOTOIMENPITEET	42
LÄHTEET.....	43

LIITTEET

- Liite 1 Kappaleen 1 tulokset
- Liite 2 Kappaleen 2 tulokset
- Liite 3 Kappaleen 3 tulokset
- Liite 4 Kappaleen 4 tulokset
- Liite 5 Kappaleen 5 tulokset
- Liite 6 Kappaleen 6 tulokset
- Liite 7 Kappaleen 7 tulokset
- Liite 8 Kappaleen 8 tulokset
- Liite 9 AutoPOL-ohjelman käyttöohjeet

KÄYTETYT MERKINNÄT

r_s	Sisätaivutussäde
r_u	Ulkoinen taivutussäde
BA	Bend Allowance, neutraaliakselin pituus
k	k-kerroin
s	Levyn paksuus
β	Takaisinjoustopukulma
r_p	Painimen säde
V	Vastimen aukon leveys

1 JOHDANTO

Opinnäytetyö kuuluu Savonia-ammattikorkeakoulussa käynnissä olevaan HitNetWork-hankkeeseen. HitNetWork-hankkeen tavoitteena on hitsaustoimintaketjun tehokkuuden ja laadun parantaminen. HitNetWork-hankkeeseen osallistuu Savonia-ammattikorkeakoulun lisäksi kolme Pohjois-Savon metalliteollisuuden yritystä sekä niiden verkostoyhteistyöyrityksiä.

Työn aihe saatiin Savonia-ammattikorkeakoulun hitsauslaboratorion projekti-insinööri Aku Tuunaiselta. Särmyksensimulointiohjelmat ovat yleistyneet ja monilla särmäinten valmistajilla on tarjota erilaisia särmyksensimulointiohjelmia, mutta niiden käytännöllisyydestä, tarkkuudesta ja niiden soveltuvuudesta särmyksen apuvälineeksi ei ollut varmuutta.

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan AutoPOL-särmyksensimulointiohjelman soveltuvuutta teolliseen ympäristöön. Työssä selvitetään AutoPOL-ohjelman kyvykyys ja mittatarkkuus erimuotoisille ja paksuisille kappaleille sekä se, saadaanko ohjelmalla merkittäviä hyötyjä särmykseen. Koemateriaalina käytetään Ruukki Laser 355 MC-terästä. Koekappaleet saatiin HT Laser Oy Vieremältä. Työssä tutkitaan särmytysten koekappaleiden laadun parantamista särmyksessä.

Teoriaosuudessa käsitellään yleisesti materiaalin taivutusta ja särmystä. Kokeellisessa osuudessa käsitellään AutoPOL-ohjelman ominaisuuksia ja hyötyjä särmyksen kannalta ja sen mittatarkkuutta teollisessa ympäristössä. Testikappaleina käytetään HT Laser Oy:n tuotannossa olevia kappaleita.

2 AUTOPOL

AutoPOL on FCC Software AB:n ohjelmisto ohutlevytuotteiden suunnitteluun ja särmäyksen simuloimiseen. Ohjelmistolla tehdyt särmäysohjelmat voidaan tulostaa suoraan käytettäville koneille.

AutoPOL-ohjelman tukemat särmäinten ohjauslaitteistot ovat:

- Delem 3D & num
- Cybelec/CYCAD
- AccurPress D3
- Safan TS 3D & num
- ESA.

AutoPOL-ohjelma tukee dwg, dxf, sat, step, iges ja ipt tiedostomuotoja.

AutoPOL-ohjelma perustuu neljään moduuliin. Kukin moduuli voidaan hankkia ja niitä voidaan käyttää erikseen. AutoPOL-ohjelman moduuleista kerrotaan tarkemmin luvuissa 2.1-2.4. (FCC Software AB 2012.)

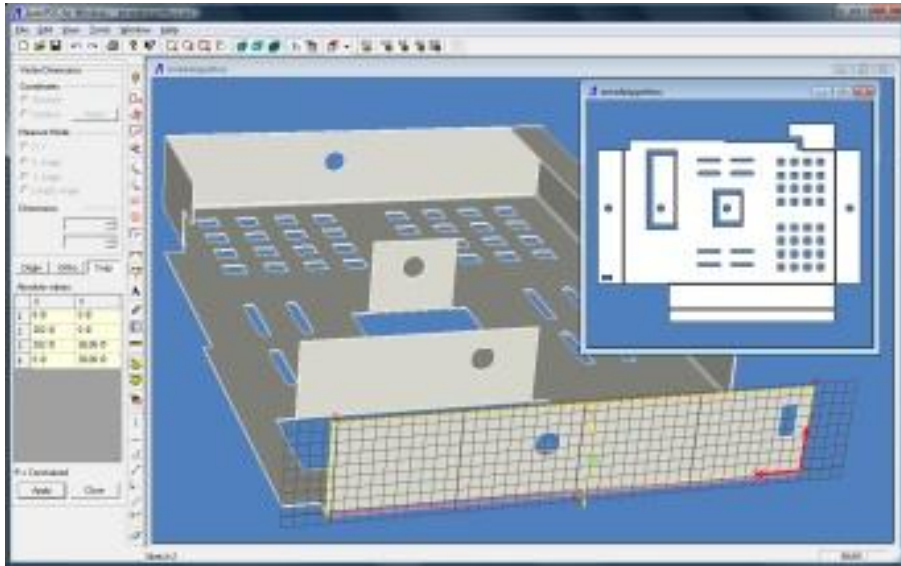
2.1 Designer

AutoPOL Designer on ohjelma ohutlevyjen suunnitteluun ja 3D-mallien levityskuvien luontiin. Ohjelmalla voidaan ottaa huomioon työkalujen ja materiaalien eri vaikutukset suunnitteluvaiheessa.

Alla on lueteltu AutoPOL Designer:n ominaisuuksia.

- 3D-mallinnus levykappaleille
- K-kertoimen määrittäminen kalibrintikappaleella
- Taivutusten sisäsaiteet työkalujen mukaisiksi
 - Sisäsaiteet voidaan muuttaa Designeriin tuotaviin kappaleisiin tai Designerillä suunnitellaan suoraan kappaleet käytettävillä työkaluilla.
- Yksinkertainen käyttöliittymä
 - Yksinkertainen käyttää, mutta osa täyden mittakaavan CAD-ohjelman ominaisuuksista puuttuu. (FCC Software AB 2012.)

Kuvassa 1 on Designer-käyttöliittymä ja kuvassa 2 on ohjelmalla suunniteltuja esimerkkikappaleita.



KUVA 1. AutoPOL Designer-käyttöliittymä. (FCC Software AB 2012)



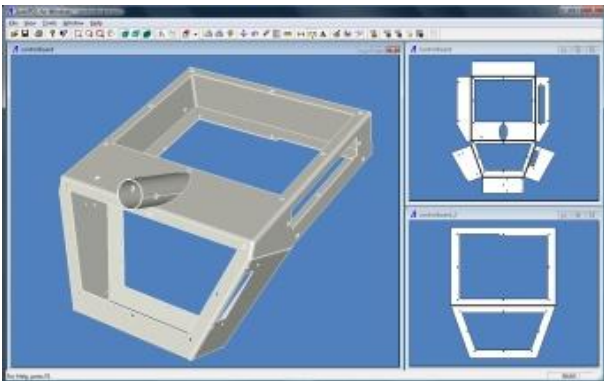
KUVA 2. Designerillä suunniteltuja esimerkkikappaleita. (FCC Software AB 2012)

2.2 Unfolder

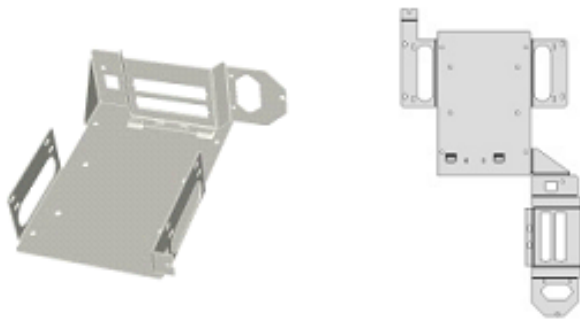
AutoPOL Unfolder on 3D-mallien levitysohjelma. Ohjelma ottaa huomioon levityskuvaa laskettaessa käytettävät työkalut ja materiaalin. Käytettävät työkalut määräävät särmän sisäsaiteen ja vaikuttavat oikaistuun pituuteen. Kuvassa 3 on Unfolder-moduulin käyttöliittymä ja kuvassa 4 on esimerkkikappale taivutettuna ja levitettyinä.

Alla on lueteltu AutoPOL Unfolderin ominaisuuksia:

- kappaleiden levitys taive kerrallaan tai kaikki taieet yhdessä
- työkalujen ja materiaalin huomioon ottaminen levityskuvaa laskettaessa
- dxf-tulostus levityskuvasta. (FCC Software AB 2012.)



KUVA 3. AutoPOL Unfolder-käyttöliittymä. (FCC Software AB 2012)



KUVA 4. Esimerkkikappale taivutettuna ja levitettynä. (FCC Software AB 2012)

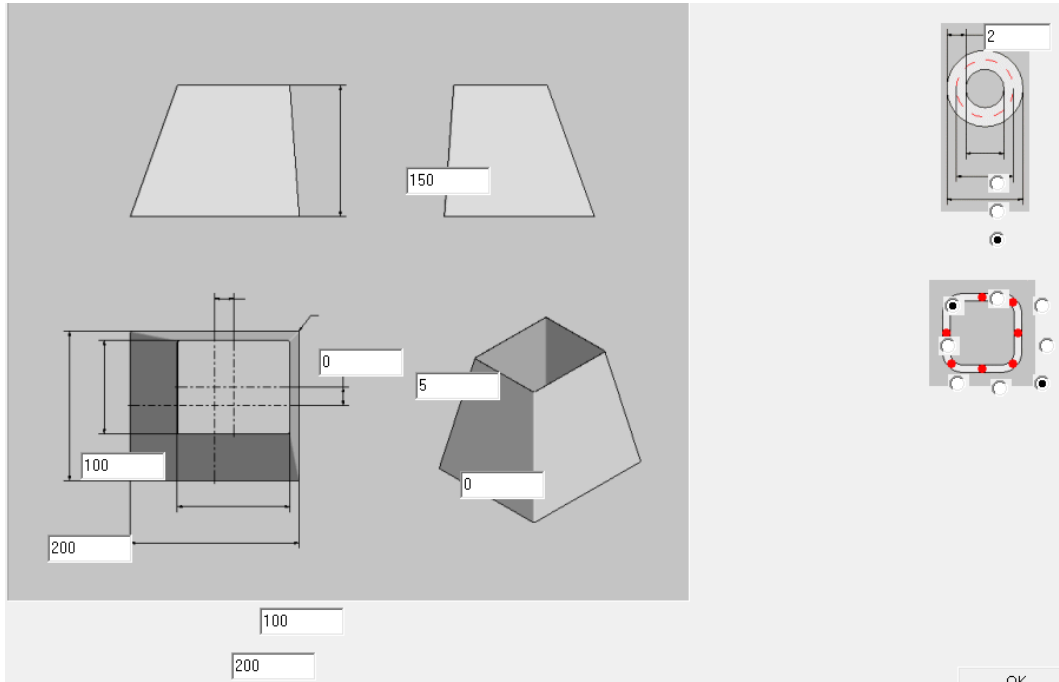
2.3 Piper

AutoPOL Piper on putkimaisten ohutlevytuotteiden suunnitteluun tarkoitettu moduuli.

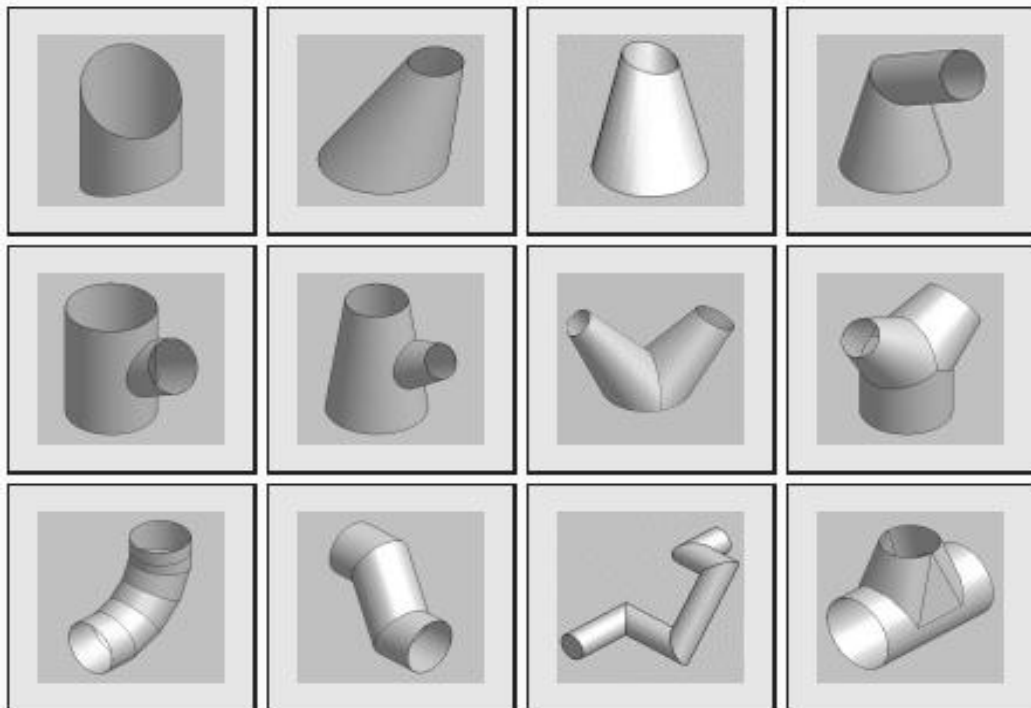
AutoPOL Piper-moduuli:

- on yksinkertainen käyttää
- sisältää yleisimpiä malleja, joita voidaan muunnella tarpeen mukaan
- toimii taivutettavilla ja valssattavilla kappaleilla. (FCC Software AB 2012.)

Kuvassa 5 on esimerkki putkimaisen kappaleen luonnista ja kuvassa 6 Piper-moduulin esimerkkikappaleita.



KUVA 5. Esimerkki putkimaisen kappaleen luonnista. (FCC Software AB 2012)



KUVA 6. Piper moduulin esimerkkikappaleita. (FCC Software AB 2012)

2.4 Bend Simulator

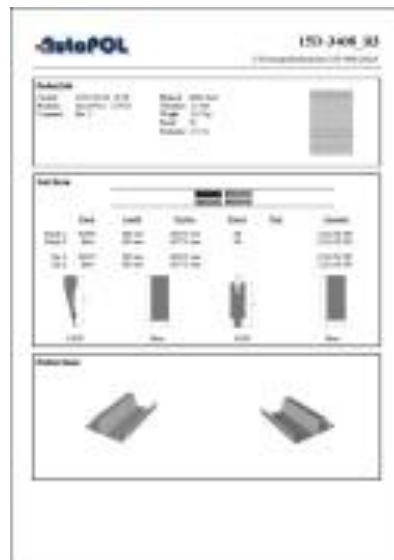
AutoPOL Bend Simulator on 3D-simulointiohjelma särmäyksen simulointiin. Ohjelmalla simuloidaan särmäysprosessi ja sillä voidaan tulostaa valmis ohjelma särmäimelle. (FCC Software AB 2012.)

AutoPOL Bend Simulatorin edut ja ominaisuudet ovat:

- Koneen seisokkien väheneminen
 - Ohjelmointi tehdään tietokoneella, joten särmäin voi olla tuotannossa ohjelmoinnin ajan
- Ongelmien esiintyminen ennen särmäintä.
 - Ohjelmalla voidaan havaita mahdolliset ongelmat jo simulointivaiheessa (kuva 7)
- Vähemmän hukkaa
 - Ohjelmalla voidaan vähentää hukkaa testikappaleiden vähenemisellä tai jopa poisjäännillä.
- Nopeammat asetusajat.
 - Ohjelmasta saadaan selkeät dokumentit työkaluasetuksista ja taivutusjärjestyksestä (kuva 8). (FCC Software AB 2012.)

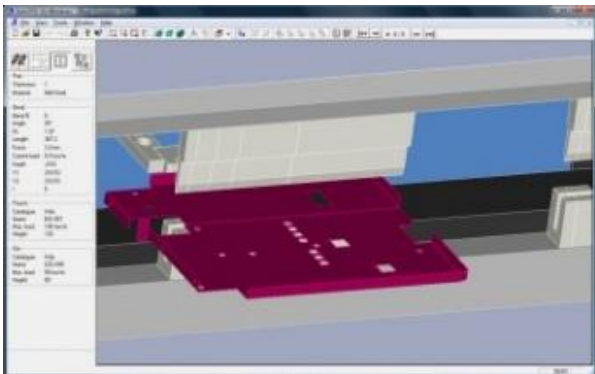


KUVA 7. Törmäys simuloinnissa.
(FCC Software AB 2012)



KUVA 8. Työkaluasetuslehti.
(FCC Software AB 2012)

Kuvassa 9 on esitetty simulointiohjelman näkymä.



KUVA 9. Simulointiohjelman näkymä. (FCC Software AB 2012)

3 TAIVUTTAMINEN

3.1 Taivuttamisen perusteet

Taivutuksessa levyn isoimmat muodonmuutokset syntyvät särmän kohdalle, jolloin särmän ulkopinta venyy ja sisäpinta tyssääntyy. Särmän kohdalta levy ohenee ja sen reunoissa tapahtuu plastisia ja elastisia muodonmuutoksia. Kun särmään tapahtuvista muodonmuutoksista osa on elastista ja osa plastista, näiden suhde vaikuttaa takaisinjouston määrään. (Karppinen 1986, 12.)

3.2 Plastinen ja elastinen muodonmuutos

Metallin ollessa jähmeässä tilassa siinä olevat atomit ovat järjestäytyneet tiiviisti ja säännönmukaisesti järjestäen kiderakenteita. Ulkoisen voiman kohdistuessa metalliin aiheutuu kiteessä muodonmuutos, joka voi olla plastista tai elastista. Elastinen muodonmuutos ei ole pysyvää: kiteen atomit lähenevät tai etääntyvät toisistaan ja voiman poistuessa tilanne palautuu. Plastisessa muodonmuutoksessa kiteiden eri osat liukuvat toistensa ohi ja muodonmuutos on pysyvää. Elastisesta muodonmuutoksesta siirtymistä plastiseen muodonmuutokseen sanotaan myötörajaksi. (Lindroos, Sulonen & Veistinen 1986, 19, 58-60; Valorinta 1993, 49.)

3.3 Taivutuksen vaiheet

Taivuttaminen voidaan jakaa seuraaviin kolmeen vaiheeseen.

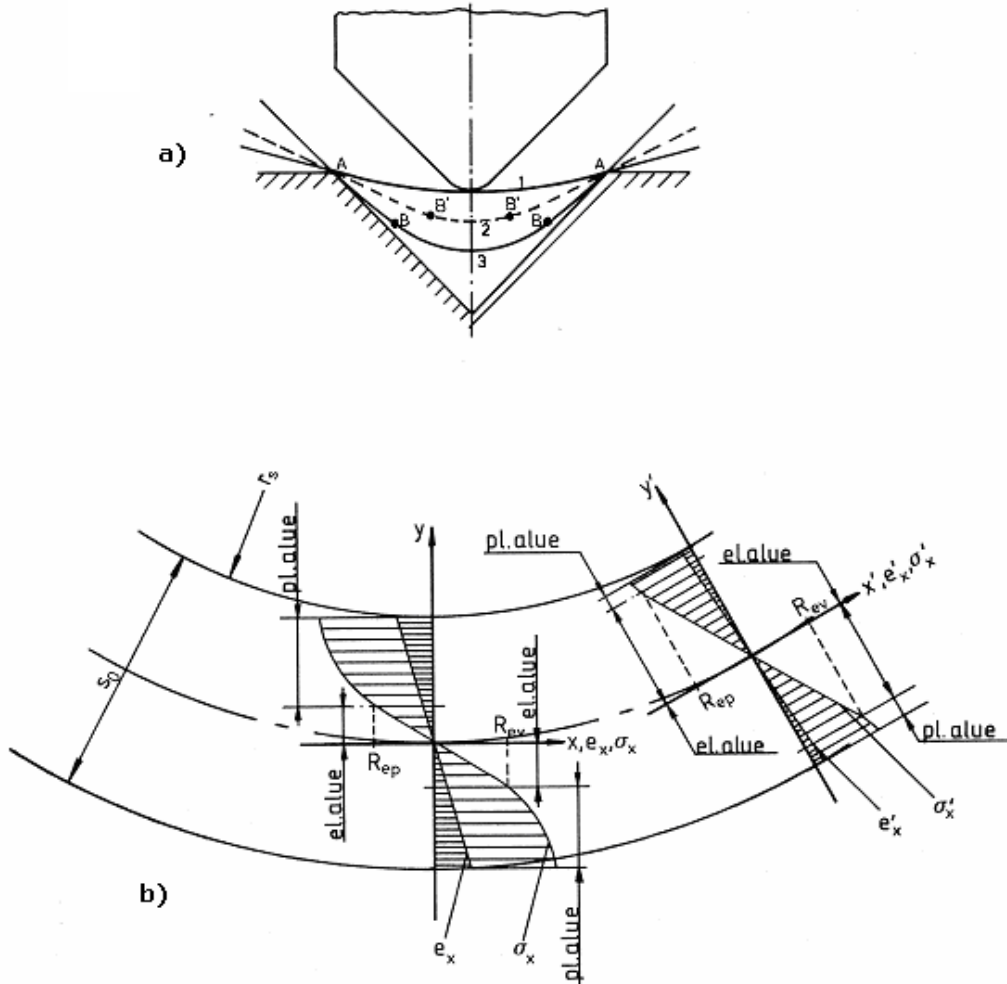
1. Jännitys taivutuksen alussa ei ylitä materiaalin myötörajaa, jolloin venymä pysyy elastisena. Ulkoisen taivuttavan voiman poistuessa levy palautuu suoraksi.

2. Taivutuksen jatkuessa materiaalin myötöraja ylittyy ensimmäiseksi levyn pinnassa, jolloin siirrytään elastisesta muodonmuutoksesta plastiseen. Myötöraja levyn sisäosissa ylitetään taivutussäteen pienentyessä, jolloin levyn sisäosissakin tapahtuu plastista muodonmuutosta. Materiaalin myötörajaa ei ylitetä levyn keskiosassa, johon jää elastiseksi jäänyt alue. Tämä elastiseksi jäänyt alue pyrkii palauttamaan levyn takaisin suoraksi ulkoisen voiman poistuessa.

3. Taivutettavan levyn taivutussäteen ollessa samaa suuruusluokkaa levyn paksuuden kanssa häviää elastinen muodonmuutos lähes kokonaan. Tällöin levyssä tapahtuneet muodonmuutokset ovat lähes ainoastaan plastisia.

(Erkkilä 1985, 4-5.)

Levyn taivutusta vapaassa taivutuksessa on havainnollistettu kuviossa 1.

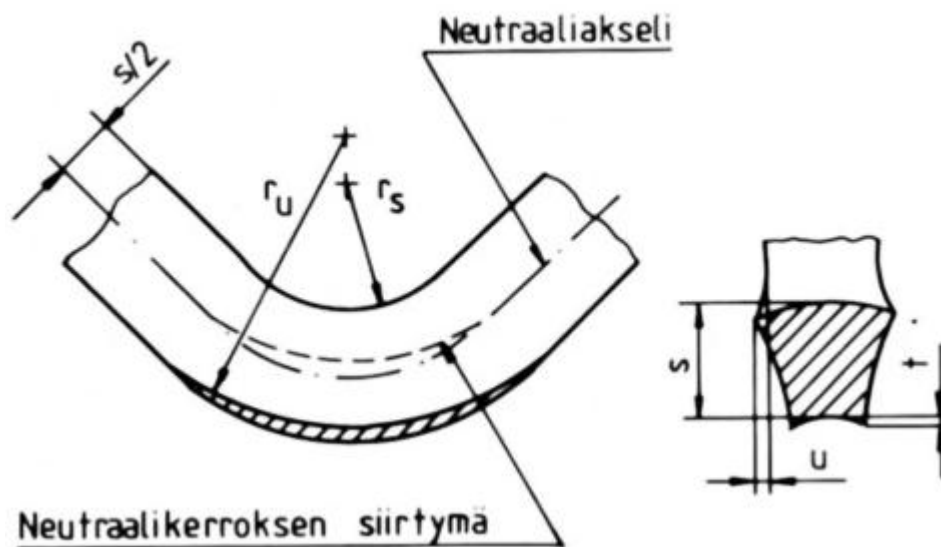


KUVIO 1. Levyn vaiheittainen taivutus vapaassa taivutuksessa. (Erkkilä 1985,10)

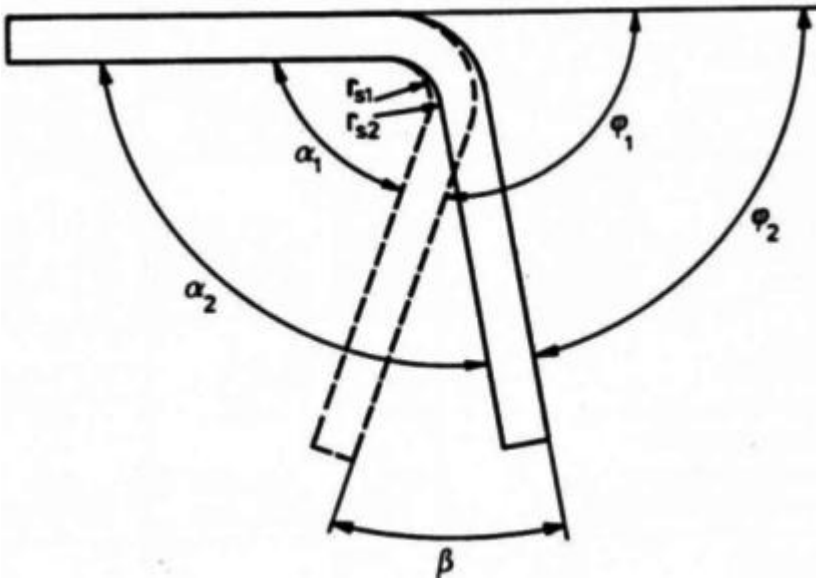
1. Vain elastista muodonmuutosta
 2. Muodonmuutos elastista välillä A-B' ja elastis-plastista välillä B'-B'.
 3. Muodonmuutos elastis-plastista välillä B-B ja elastista välillä A-B.
- Jännitysten ja venymien jakautuminen leikkauksissa y ja y' .
 e_x ja $e_{x'}$ kuvaavat x -suuntaisia venymiä, s_x ja $s_{x'}$ kuvaavat x -suuntaisia jännityksiä. R_{ev} on vetomyötölujuus ja R_{ep} puristusmyötölujuus.

3.4 Neutraaliakseli

Levyä taivutettaessa särmä venyy ulkopinnasta ja sen sisäpuoli tyssääntyy. Särmän ulkopinnalle aiheutuu vetojännitystila ja sisäpinnalle puristusjännitystila, minkä vuoksi sijaitsee levyn sisäosassa jännityksetön alue, neutraaliakseli (kuvio 2). Levyyn kohdistuneiden veto- ja puristusvoimien aiheuttamien muodonmuutosten johdosta neutraaliakseli ei ole aina kappaleen keskellä, vaan se siirtyy lähemmäksi taiepen sisäreunaa. Neutraaliakseli voi joissakin tapauksissa siirtyä jopa kappaleen ulkopuolelle, esimerkiksi voimakkaassa venytyksessä taivuttaessa. Kuviossa 3 on taivutukseen liittyviä nimityksiä merkintöineen. (Karppinen 1986, 12.)



KUVIO 2. Neutraaliakseli ja taivutuksen aiheuttamat muodonmuutokset (Karppinen 1986, 12)



KUVIO 3. Taivutukseen liittyviä nimityksiä merkintöineen (Karppinen 1986, 12)

α_1 = taivutuskulma ennen takaisinjoustoja
 α_2 = taivutuskulma takaisinjouston jälkeen
 φ_1 = kaarikulma ennen takaisinjoustoja
 φ_2 = kaarikulma takaisinjouston jälkeen
 r_{s1} = sisätaivutussäde ennen takaisinjoustoja
 r_{s2} = sisätaivutussäde takaisinjouston jälkeen
 β = takaisinjoustokulma.

3.5 Taivutussäde

Levytuotteen pienin mahdollinen taivutussäde määräytyy seuraavista ominaisuuksista: materiaali, työtapo ja vaaditut ominaisuudet. Mitä pienempi taivutussäde on, sitä suurempi on särmän murtumisen riski. Ulkopuolisen taivutussäteen r_u voidaan olettaa noudattavan yhtälöä:

$$r_u = 1,25 * r_s + s \quad (1)$$

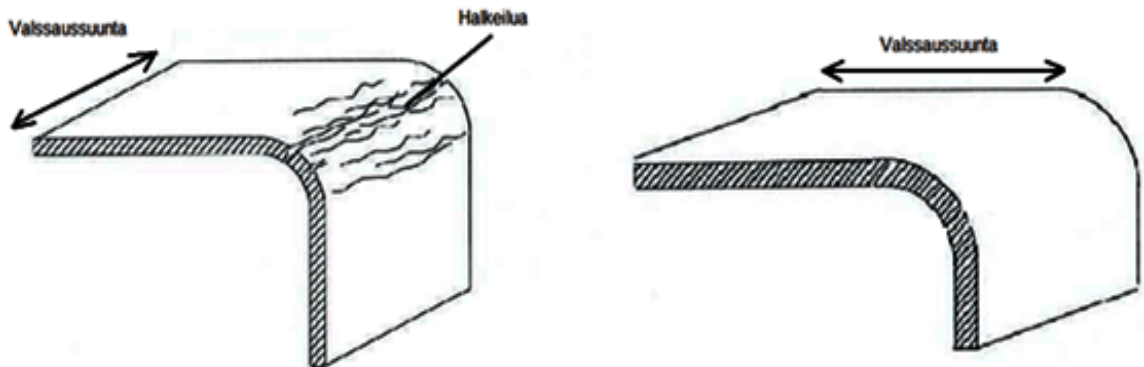
r_s = sisäsäde

s = levynpaksuus.

(Karppinen 1986, 13.)

Materiaalille voidaan määrittellä taivutuskokeen avulla myös taivutussäde, jota voidaan käyttää ohjearvona. Taivutuskoetta tehtäessä tulee huomioida, että se tehdään virheettömälle sileäreunaiselle kappaleelle ja taivuttaminen tehdään riittävän hitaasti kitkattomilla työkaluilla sallien kuroutumat ilman murtumia. Taivutuskoetta tehtäessä on hyvä ottaa huomioon, että levyn valssaussuunnalla on merkitystä

taivutussäteeseen, kuvassa 10 on esitetty valssaussuunnan merkitys. (Karppinen 1986, 12; Määttä 2009, 15.)

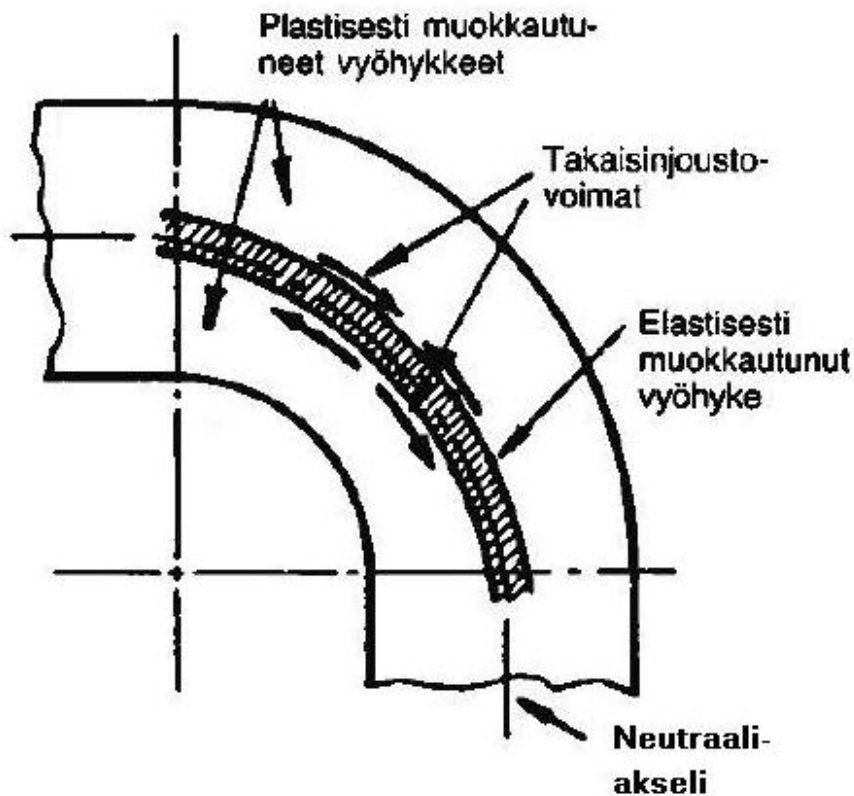


KUVA 10. Valssaussuunnan vaikutus (Määttä 2009, 15)

Taivutussäteen ollessa liian suuri kappaleen ulkopinnan venymä ei ylitä materiaalin kimmorajaa, joten ulkoisen voiman poistuessa levy palautuu alkuperäiseen muotoonsa. Pysyvän muodonmuutoksen syntyyn tarvitaan siis materiaalin kimmorajan ylittävä taivuttava voima. (Karppinen 1986, 13.)

3.6 Takaisinjousto

Levyä taivutettaessa syntyy plastisesti muovautuneet puristus- ja vetojännitysvyöhykkeet. Näiden vyöhykkeiden välissä olevan neutraaliakselin kohdalle muodostuu kapea vyöhyke, jossa pääsee tapahtumaan vain elastisia muodonmuutoksia. Tämän vyöhykkeen vuoksi ulkoisen taivuttavan voiman poistuessa ei kappaleessa vallitse voimatasapaino, vaan se pyrkii palautumaan alkuperäiseen muotoonsa. Tätä palautumista vastustavat plastisesti muovautuneet vyöhykkeet kappaleen ympärillä. Voimatasapaino saavutetaan sitten, kun on päässyt tapahtumaan tietynsuuruinen muodon palautuminen. Tätä ilmiötä kutsutaan takaisinjoustoksi ja sen syntyminen on esitetty kuviossa 4. (Karppinen 1986, 14.)



KUVIO 4. Takaisinjouston syntyminen (Karppinen 1986, 14)

Takaisinjoustoan vaikuttavat muun muassa taivutettavan materiaalin lujuus ja paksuus sekä taivutussäde. Takaisinjousto kasvaa materiaalin lujuuden ja sisäsäteen kasvaessa; levynpaksuuden kasvaessa takaisinjousto pienenee. Takaisinjouston johdosta kappaleita joudutaan taivuttamaan hieman yli, jotta saadaan haluttu taivutuskulma. (Erkkilä 1985, 16.)

3.7 Oikaistupituus

Ennen kappaleen taivuttamista pitää levyaihiolle määrittää sen pituus, josta se taivutetaan. Tätä pituutta kutsutaan oikaistuksi pituudeksi. Oikaistun pituuden tulee olla oikea, jotta kappaleen dimensiot saadaan oikeiksi taivutettuina. Taivutussäteiden ollessa suuria ($r > 50 \cdot s$) neutraalikerros on taivutetun levyn keskellä ja pituus vastaa taivutettuna oikaistua pituutta. Pienillä taivutuskulmilla taas taiteen sisäpinta puristuu kokoon vähemmän kuin ulkopinta venyy. Tästä syystä neutraaliakseli siirtyy sisäpintaan päin (kuvio 5). Ulkopinnan venymisen vuoksi levy ohenee ja neutraaliakselin sisäänpäin siirtymisen johdosta levy pitenee. (Karppinen 1986, 14.)

Oikaistun pituuden laskemiseksi voidaan käyttää kaavaa:

$$L = a + b - v \quad (2)$$

jossa a ja b ovat taiteen sivun pituudet ja v on levyn paksuudesta ja taivutussäteestä riippuva tekijä. Tekijä v voidaan määrittää seuraavasti:

taivutuskulman ollessa $0^\circ < \alpha \leq 90^\circ$:

$$v = \pi * \left(\frac{180^\circ - \alpha}{180^\circ} \right) * \left(r + \frac{s}{2} * k \right) - 2(r + s) \quad (3)$$

kun taas taivutuskulman ollessa $90^\circ < \alpha \leq 165^\circ$:

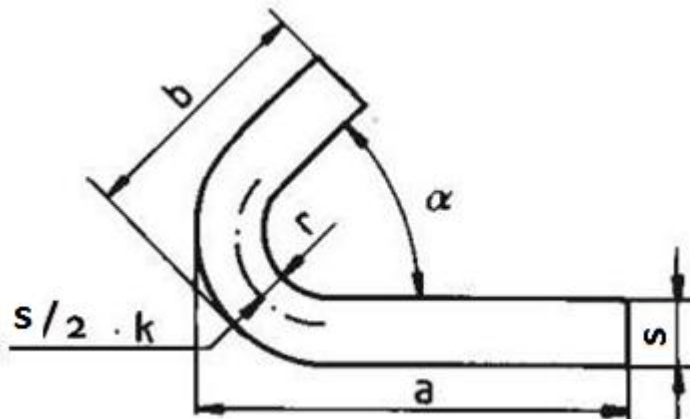
$$v = \pi * \left(\frac{180^\circ - \alpha}{180^\circ} \right) * \left(r + \frac{s}{2} * k \right) - 2(r + s) * \tan \frac{180^\circ - \alpha}{2} \quad (4)$$

kaavoissa:

r = taivutussäde

s = levynpaksuus

k = materiaalin k-kerroin.



KUVIO 5. Oikaistunpituuden laskennassa tarvittavien parametrien merkinnät (Karppinen 1986, 15)

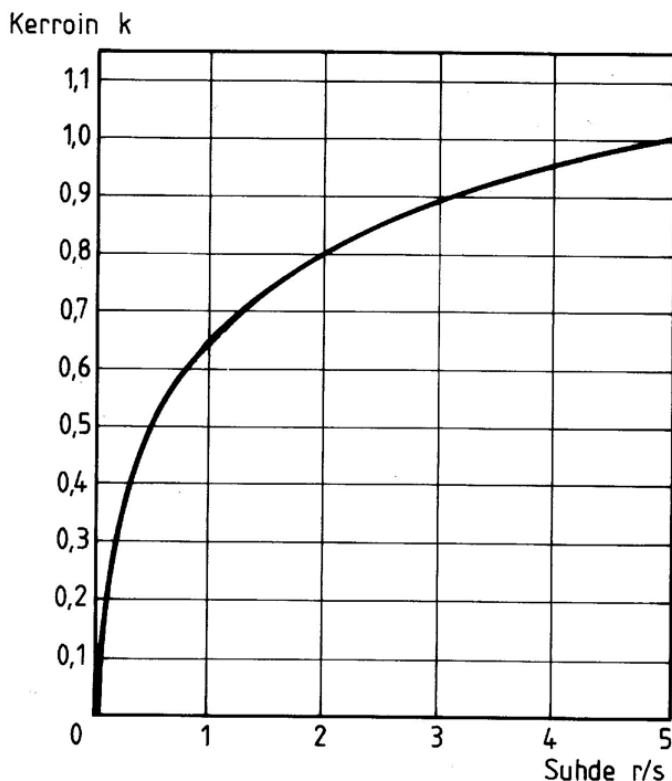
3.8 K-kerroin

Oikaistunpituuden laskentaan tarvittava k-kerroin voidaan määrittää likimääräisesti kuvion 6 mukaisesta käyrästä. K-kerroin määräytyy tällöin taivutussäteen ja levynpaksuuden suhteen perusteella. Standardin DIN 6935 mukaan k-kerroin voidaan laskea kaavasta:

$$k = 1, \text{ kun } r/s > 5 \quad (5)$$

$$k = 0,65 + 0,5 \cdot \log_{10}(r/s), \text{ kun } r/s \leq 5 \quad (6)$$

Edellä esitetyllä tavalla saadaan oikaistunpituus määritettyä likimääräisesti. Suurien sarjojen valmistukseen tai muuten tarkkaa arvoa haettaessa tulee suorittaa taivutuskoe. (Karppinen 1986, 15.)

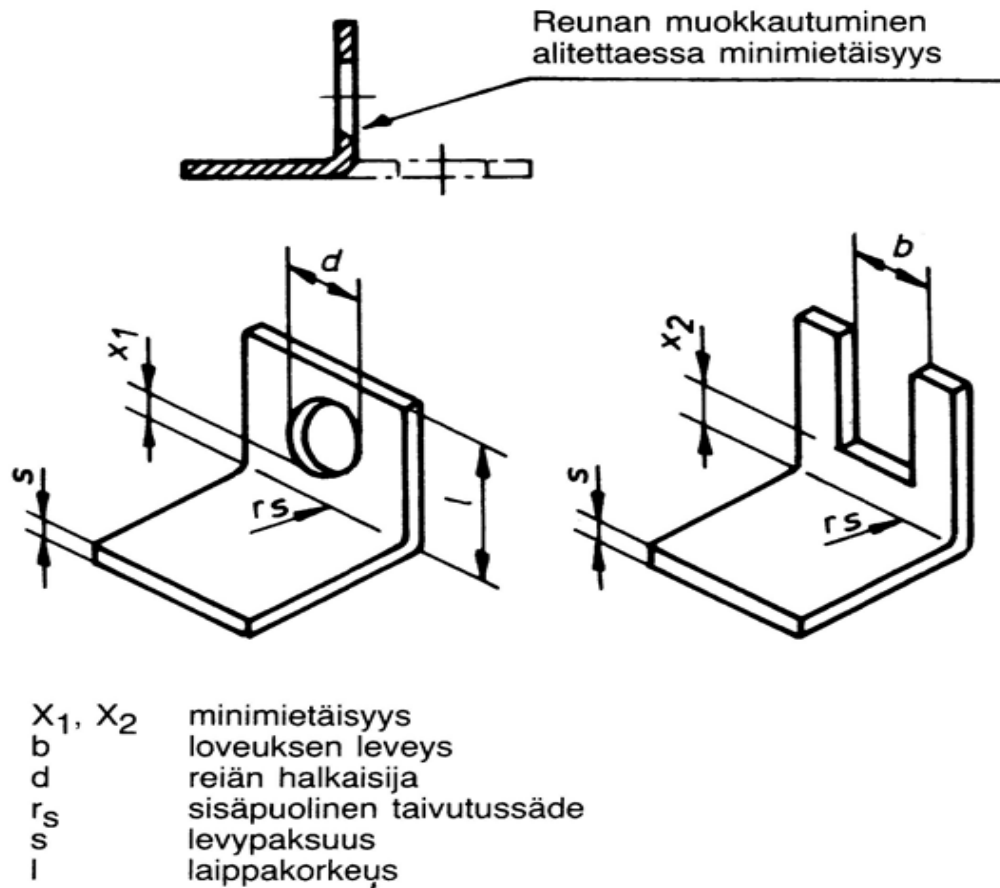


KUVIO 6. K-kertoimen määrittäminen suhteen r/s avulla. (Karppinen 1986, 15)

3.3.5 Taivutuksen lähellä olevat muodot

Suunniteltaessa taivutuksen lähelle muotoja, esimerkiksi loveusta tai reikää, on tärkeää huomioida niiden pienin sallittu etäisyys taivutettavasta taiveesta. Loveuksen tai reiän muoto ei pysy enää vakiona, jos niiden pienin sallittu etäisyys taiveesta

alitetään. Kuviossa 7 on esitetty loveuksen tai reiän minimietäisyydet taiteesta. (Karppinen 1986, 42.)



KUVIO 7. Loveuksen tai reiän minimietäisyys. (Karppinen 1986, 42)

Minimietäisyys x_1 tai x_2 on riippuvainen reiän halkaisijasta d tai loveuksen leveydestä b , taivutussäteestä r_s ja levypaksuudesta s . Minimietäisyydet saadaan seuraavista kaavoista, kun

$$S = 0,4 - 2,5 \text{ mm}, d \text{ tai } b = 1,5 - 7,0 \text{ mm} \quad (7)$$

Pyöreät reiät:

$$X_1 = \sqrt{d * s} + 0,8 * r_s \sqrt{\frac{1}{d}} \text{ (mm)} \quad (8)$$

Loveukset ja nelikulmaiset reiät:

$$X_2 = 1,1 \sqrt{b * s} + 0,8 * r_s \sqrt{\frac{1}{d}} \text{ (mm)} \quad (9)$$

(Karppinen 1986, 43.)

3.3.6 Laippakorkeus

Koneellisessa taivutuksessa pienin mahdollinen laippakorkeuden likiarvo on $b = r_s + 2s$, jossa r_s on sisätaivutussäde ja s on levynpaksuus. Suositeltavia ja pienimpiä laippakorkeuden arvoja on esitetty kuvan 11 taulukossa. Tarvittaessa pienempää laippakorkeutta, kun on mahdollista taivuttaa jää ainoaksi vaihtoehdoksi laipan lyhentäminen taivutuksen jälkeen. (Karppinen 1986, 43.)

Levyn paksuus s (mm)	Laippakorkeus b min (mm)	suositeltava (mm)
0,5	1,5	2,8
0,75	2,3	4,7
1,0	3,0	5,6
1,25	3,8	6,8
1,5	4,5	9,4
2,0	6,0	10,6
2,5	7,5	14,0
3,0	9,0	17,0



KUVA 11. Teräsohutlevyjen laippakorkeuksia, kun $r_s = s$. (Karppinen 1986, 43.)

4 SÄRMÄYSLAITTEISTOT

Särmäys on yleinen levytuotteiden valmistustapa. Siinä taivutetaan valmiiksi leikattu levyaiho haluttuun muotoon. Enimmäkseen taivutustöissä käytetään särmäyspuristimia, mutta niissä käytetään myös taivutuskoneita ja taivutusautomaatteja. Seuraavissa luvuissa käsitellään tarkemmin näitä laitteita.

4.1 Särmäyspuristin

Perinteisistä särmäysmenetelmistä laajin käyttöalue on särmäyspuristimilla; sitä voidaan käyttää särmäyksen lisäksi leikkaamiseen ja lävistämiseen. Särmäyspuristimissa levy asetetaan taivuttavien työkalujen, painimen ja vastimen väliin. Särmäyksessä painin suorittaa taivutuksen painamalla taivutettavaa levyä vastinta vasten. Koneen sisäosassa on takavastin tai takavastimet, joita vasten levy paikoitetaan ennen jokaista taivutusta. Särmäyspuristimien pituus vaihtelee useimmiten 1 ja 10 metrin välillä ja niitä voidaan tarvittaessa asettaa rinnakkain. Koneiden puristusvoima tuotetaan yleensä hydraulisesti, ja se on useinmiten 100 – 25 000 kN. (Määttä 2009, 30.) Kuvassa 12 on tässä työssä käytetty hydraulinen särmäyspuristin.

Särmäyspuristimien työkaluina käytetään koneen yläpalkkiin kiinnitettyä paininta ja alapalkkiin kiinnitettyä vastinta. Työkalut voivat olla koko koneen levyisiä tai ne voivat koostua lyhyemmistä osista. Lyhyillä työkaluilla särmäyspuristimeen voidaan koota työkalusarja. Työkalusarja voidaan koota esimerkiksi tiettyä kappaletta varten, jolloin voidaan välttää ylimääräisiä työkalujen vaihtoja. Särmäyspuristimen työkalut kiinnitetään paikoilleen mekaanisesti, hydraulisesti tai pneumaattisesti. (Mäki-Mantila 2001, 6.)

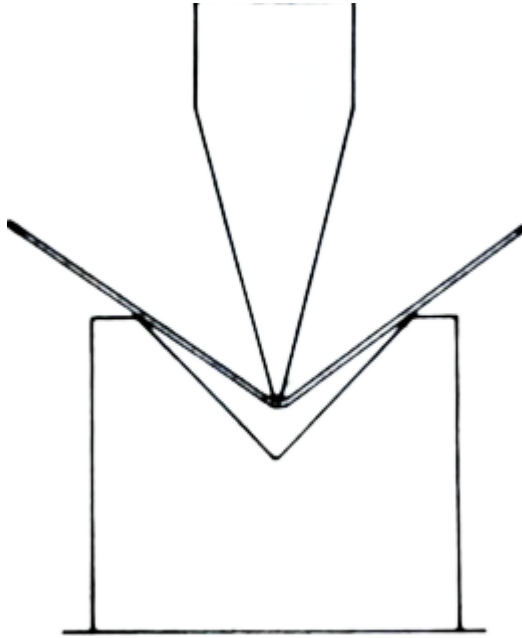


KUVA 12. Opinnäytetyössä käytetty särmäyspuristin. (Valokuva Tuomo Penttinen)

Särmäyspuristimilla voidaan taivuttaa vapaataivutuksena, pohjaaniskutaivutuksena tai käyttäen elastinta vastinta.

4.1.1 Vapaa taivutus

Vapaassa taivutuksessa levyaihiota taivutetaan niin sanottuna kolmipistetaivutuksena. Tässä taivutuksessa levyaihiota painetaan painimella V-muotoista vastinta vasten. Aihiota ei paineta kokonaan kiinni vastimeen, vaan aihion ja vastimen väliin jää ilmarako. Vapaan taivutuksen periaate on esitetty kuviossa 8. Vapaassa taivutuksessa käytettävien työkalujen kulmat ovat yleensä teräviä, alle 90 astetta. Koska työkalujen kulmat ovat teräviä, saadaan haluttu taivutuskulma pelkästään painimen iskunpituutta säätämällä. Levyaihion takaisinjousto kompensoidaan riittävällä ylitaivutuksella. Menetelmän etuja ovat yksinkertaiset työkalut, vähäinen voiman tarve sekä yksinkertainen automatisointimahdollisuus. (Ihalainen 2003, 269.; Karppinen 1986, 25.)

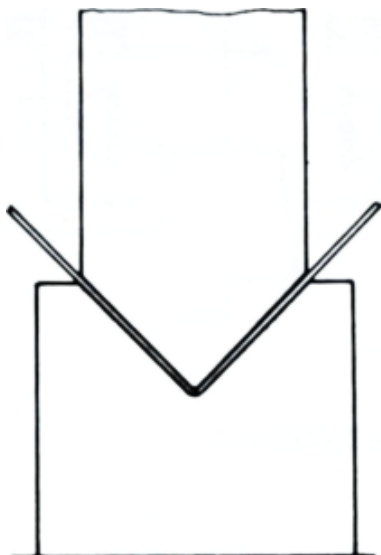


KUVIO 8. Vapaa taivutuksen periaate. (Haikonen 1979, 22)

4.1.2 Pohjaaniskutaivutus

Pohjaaniskutaivutuksessa levyaiho painetaan kokonaan vastinta vasten, jolloin siihen syntyy täysin sama kulma kuin vastimessa on. Aiho muokkautuu tällöin kokonaan plastisesti, jolloin takaisinjousto ei pääse syntymään. Pohjaaniskutaivutuksen periaate on esitetty kuviossa 9.

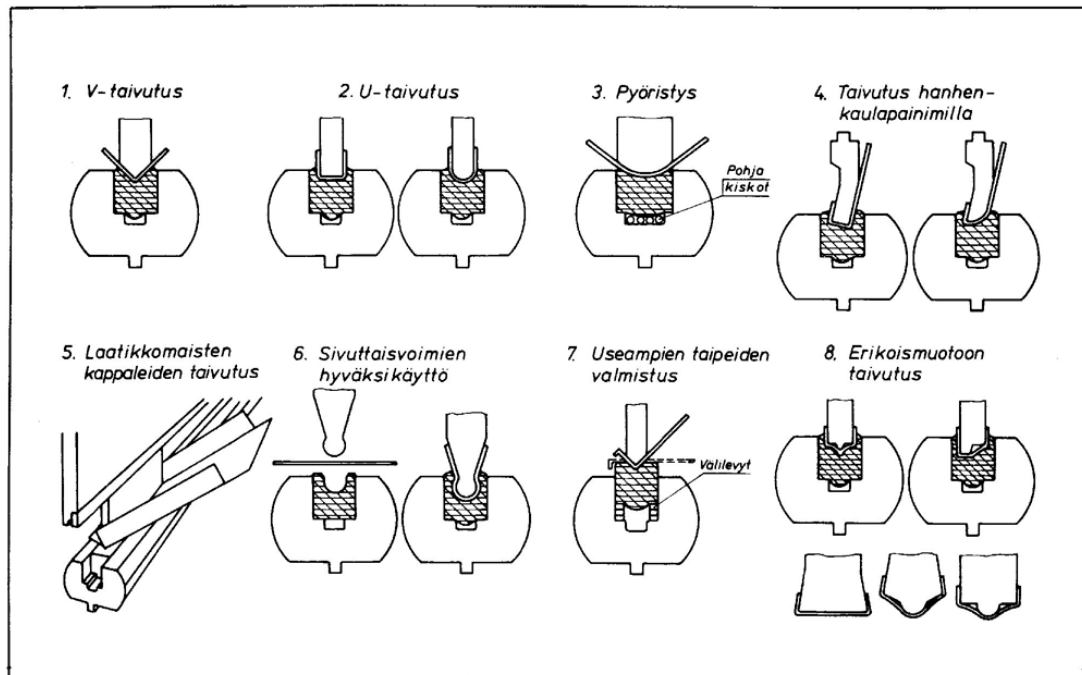
Pohjaaniskutaivutuksen etuina ovat sen mittatarkkuus ja taivutettu jäykkyys. Haittana ovat suuri voiman tarve, joka on 3-5-kertainen vapaaseen taivutukseen verrattuna. Lisäksi työkalujen täytyy olla taivutuskohtaisesti oikeisiin mittoihin valmistettuja. Menetelmää ei suositella yli 2 mm levynpaksuuksille ja sitä käytetään yleensä suurien sarjojen valmistukseen. (Ihalainen 2003, 270.;Karppinen 1986, 25.)



KUVIO 9. Pohjaaniskutaivutuksen periaate. (Haikonen 1979, 22)

4.1.3 Elastisen vastimen avulla taivutus

Elastisen vastimen avulla taivututtaessa levyaihion särmä muodostuu painimen mukaan. Elastisella vastimella saatavia etuja ovat monimutkaisten kappaleiden muotojen valmistaminen nopeasti sekä työkappaleen säästyminen naarmuilta vastimen puolelta. Haittoja ovat kallis hinta, sen kuluminen nopeasti ja voiman tarpeen lisääntyminen. Elastisen vastimen käyttö sopii varsinkin pienten ja keskisuurten sarjojen valmistukseen alle 1 mm:n levynpaksuuksille. Kuvassa 13 on esitetty esimerkkejä elastisen vastimen käytöstä. (Karppinen 1986, 30; Mäki-Mantila 2001, 32.)



KUVA 13. Elastisen vastimen käyttöesimerkkejä. (Karpinen 1986, 31)

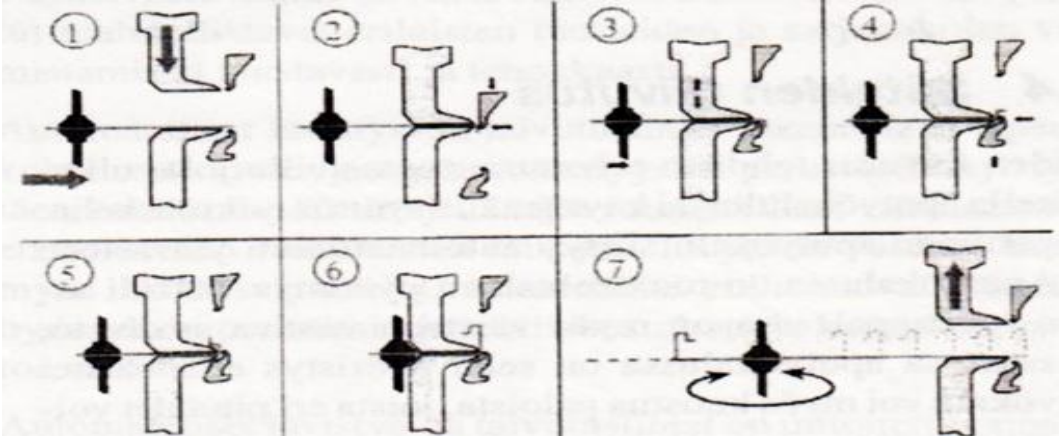
4.2 Taivutuskone

Taivutuskonetta käytetään useinmiten suurten ja pitkien levyjen taivutukseen. Taivutuskoneessa taivutettava levy lasketaan vaakasuoralle pöydälle, asemoidaan takavasteisiin ja puristetaan ylä- ja alapalkin väliin. Taivutuspalkilla taivutetaan vapaaksi jäänyt levyosa alhaalta ylöspäin. Suurten koneiden voimansiirto on yleensä hydraulinen ja pienempien sähkömekaaninen. Taivutuskoneella käytettävien levyjen maksimipaksuudet vaihtelevat 1,5 ja 10 mm:n välillä. Särmäyspuristimeen verrattuna taivutuskoneen etuja ovat samojen työkalujen käyttö vapaammin eri levynpaksuuksille, pienempi materiaalin vaurioituminen taivutuksessa, edullinen hankintahinta ja nopeus. (Leiviskä 2006, 47.)

4.3 Taivutusautomaatti

Taivutusautomaattia käytettäessä levy makaa pöydällä liikkumatta taivutuksien aikana ja vain taivutettavat osat liikkuvat. Työkappaletta liikuttaa koneen manipulaattori. Manipulaattori kuljettaa levyn taivutettavaksi taivutuskitaan, jossa levyä voidaan taivuttaa ylös- ja alaspäin. Taivutusautomaatti on monipuolinen, ja sillä voidaan korvata joissain tapauksissa särmäyspuristin, taivutuskone, erikoistyövaiheet, rullamuovaus ja liittäminen. Koneen täydellinen hyödyntäminen vaatii kappaleiden uudelleensuunnittelemisen konetta varten. Särmäyspuristimeen

verrattuna mittatarkkuus on parempi ja sillä voidaan vähentää tuotteiden osien määrää. Taivutusautomaatilla taivutettaessa taivuttamisessa on tietyt rajoitukset ja sille sopivia työkappaleita ovat esimerkiksi paneelilevyt. (Leiviskä 2006, 48.) Kuvassa 14 on esimerkki taivutusautomaatin työkierrosta.



KUVA 14. Taivutusautomaatin esimerkkityökierto. (Mäki-Mantila 2001,17)

5 MATERIAALIT

5.1 Lujat teräkset

Teollisuudessa käytetään nykyään yhä enemmän lujia ja ultralujia teräksiä. Näillä teräksillä saadaan rakenteista kevyempiä ja kompaktimpia. Lujat ja ultralujat teräkset ovat tavanomaisia teräksiä kalliimpia, mutta materiaalin vähäisemmän tarpeen ansiosta materiaalikustannukset voivat olla pienemmät.

5.2 Lujien terästen taivutus

Lujia materiaaleja särmättäessä työkalut ja laitteistot joutuvat kovemmalle materiaalin lujuuden kasvaessa. Särmättävän kappaleen kokonaisvenyminen on myös pienempää lujilla teräksillä. Ruukin lujien terästen särmäysoppaassa annetaan ohjeeksi taivuttaa särmä kertapainalluksella (Rautaruukki Oyj 10.2.2012). Antti Määtän diplomityössä tutkittiin lujien terästen särmäystä inkrementaalisesti. Diplomityössä taivutettiin särmät vaiheittain 150°:n, 130°:n, 110°:n ja 90°:n kulmaan. Tutkimuksessa tultiin siihen tulokseen, ettei inkrementaalisella särmäyksellä saavuteta parempia särmäystuloksia, muttei siitä ole mitään haittaakaan. (Määttä 2009, 65.)

5.3 Lujien terästen taivutuksessa esiintyvät ongelmat

Lujien materiaalien muovausvoimat ovat suurempia kuin vastaavan vahvuisien heikompien materiaalien. Lujia materiaaleja ei yleensä pystytä taivuttamaan niin pienelle säteelle kuin vastaavan vahvuisia pienemmän lujuuden omaavia materiaaleja. Lujia materiaaleja särmättäessä takaisinjousto kasvaa, säröjä syntyy helpommin ja työkalut joutuvat kovemmalle rasitukselle kuin pienempi lujuisia materiaaleja särmättäessä. Ongelmia on myös levyn reunojen kuroutumisessa ja levyn irtoamisessa painimesta. Pienien ainevahvuuksien ongelmaksi voi muodostua myös rakenteen jäykkyyden puute. Lujien terästen tyypillisiä ongelmia on esitetty taulukossa 1. (Leiviskä 2006, 52.)

TAULUKKO 1. Lujien terästen käytön ongelmia (Leiviskä 2006, 53)

Suurlujuusteräs	Suuri murtolujuus	Pieni materiaalin paksuus	Vähäinen jäykkyys	Suuri taipuma	Lisäjäykkyyttä muovaamalla
					Mittojen kasvattaminen
				Rakenteellinen epästabiileetti	Lisäjäykkyyttä muovaamalla
					Levykentän jako osakenttiin
					Valmistusepätar-kuudet
				Värähtelyherkkyys	Lisäjäykkyyttä muovaamalla
				Levykentän jako osakenttiin	
			Pieni massa	Pienet dynaamiset voimat	
			Voimien tuonti hankalaa	Pieni taara ajoneuvoissa	
			Liittäminen ongelmallista	Liitoselementit, vahvistukset	
	Suuret voimat mekaanisessa leikkauksessa	Paikallinen lämpökäsittely	Leikkauksen aikana		
			Ennakkoon		
		Riittävät välykset	Ongelma, jos iso murtovenymä		
	Muovausongelmat	Suuri takaisinjousto			
		Suuret muovausvoimat			
		Tarkkuusongelmat			
		Pieni murtovenymä			
		Muokkauslujittuminen			
	Lämpövaikutus	Hankala hitsattavuus	Lujuuden aleneminen		
			Prosessin hallinta		
Paikallinen lämpökäsittely					
Terminen leikkaus hankalaa		Lämpömuutosvyöhyke	Laserleikkaus		
		Vesileikkaus			

6 SÄRMÄTTÄVÄT KAPPALEET

Työssä särmättävät kappaleet koostuivat 1,5 mm:n ohutlevystä aina 12 mm:n levynpaksuuteen. Ensimmäiseksi testattiin laitteiston tarkkuus ohutlevyllä, minkä jälkeen siirryttiin varsinaisiin analysoitaviin kappaleisiin. Analysoitavat kappaleet olivat HT Laserin tuotannossa olevia kappaleita, joista oli saatu sisäisiä ja ulkoisia reklamaatioita. Työssä tutkittiin AutoPOL-ohjelman mittatarkkuuden lisäksi kappaleiden särmäämistä kappalekohtaisesti.

7 KOKEELLINEN OSUUS

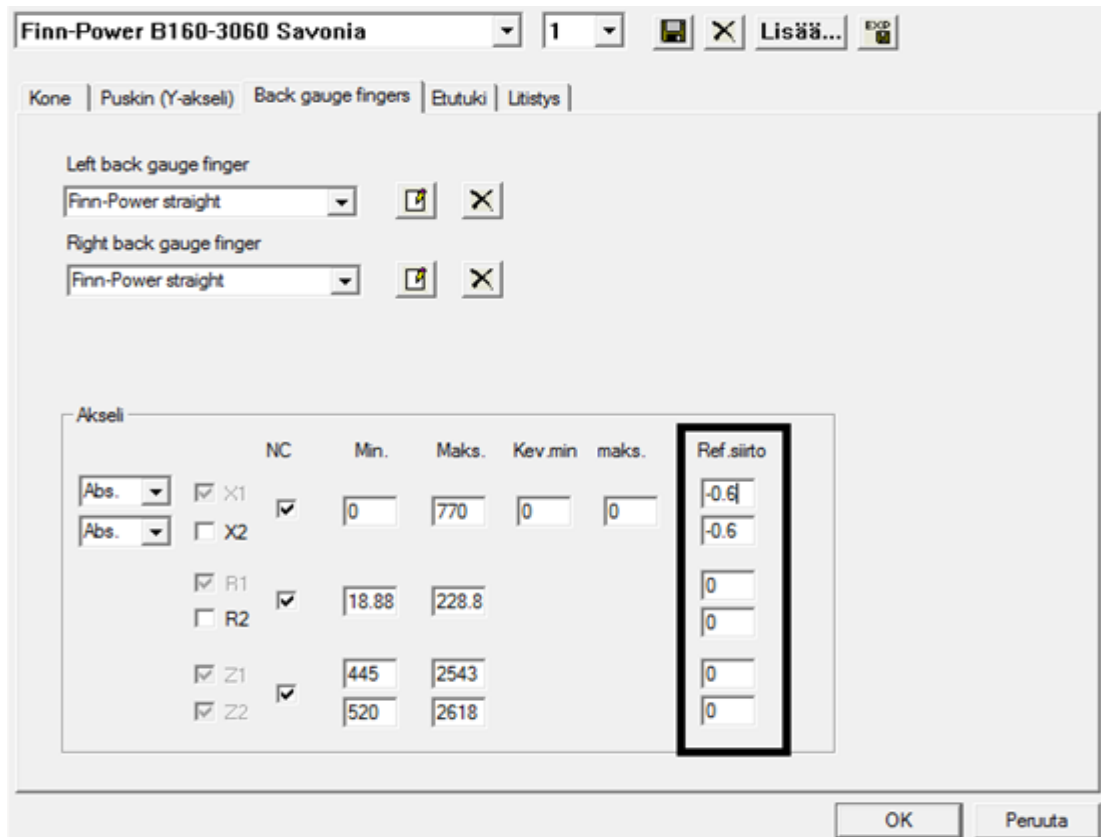
Kokeellisessa osuudessa tutkittiin käytännössä AutoPOL-ohjelmalla tehtyjä särmäysohjelmia ja niiden mittatarkkuutta. Työssä käytetyistä kappaleista laadittiin kappalekohtaiset analyysit, joissa tarkasteltiin kappaleiden särmättävyyttä.

7.1 Tavoitteet

Tavoitteena oli selvittää, soveltuuko AutoPOL-ohjelma ohutlevyjä paksummille levytuotteille sekä saadanko ohjelmaa käyttämällä merkittäviä hyötyjä särmäykseen. Kokeiden avulla pyrittiin selvittämään, saadanko ohjelmaa käyttämällä särmätyistä kappaleista mittatarkkoja. Tavoitteena oli myös saada huomioita kappaleiden särmäyksen laadun parantamiseen.

7.2 Alkujärjestelyt

Työn aluksi perehdyttiin AutoPOL-ohjelman käyttöön ja ominaisuuksiin, minkä jälkeen tarkastettiin hitsauslaboratoriossa olevan laitteiston tarkkuus. Tarkastus suoritettiin tekemällä pieniä testikappaleita, jotka särmättiin ja sen jälkeen ne mittattiin. Tarkastusta tehtäessä tarkastettiin särmäimen Delem-ohjauksella ja AutoPOL-ohjelmalla tehdyt särmäysohjelmat. Tarkastuksessa huomattiin särmäimen takavasteiden jäävän millimetrin liian kauaksi, joten särmätessä sivun pituudesta tuli liian pitkä. Asia korjattiin säätämällä särmäimen takavasteen paikoitusta. AutoPOL-ohjelmalla tehtyjen ohjelmien mittatarkkuus oli epätarkka edelleen. AutoPOL-ohjelman asetuksista jouduttiin säätämään takavasteiden asetusta -0,6 mm, jotta mittatarkkuus saatiin kohdalleen (kuva 15).



KUVA 15. Takavasteen referenssi siirto

Alkujärjestelyissä kalibroitiin myös AutoPOL-ohjelma paksummille levynpaksuuksille. Kalibroniti tehtiin tekemällä kahdesta tietynpituisesta rainasta kalibroitikappaleet ja särmäämälle ne 90° kulmaan eri taivutussäteellä. Kalibroitikappaleet mitattiin ja niiden mittaustulokset syötettiin ohjelman materiaalikirjastoon.

7.3 Käytetyt laitteet, ohjelmat ja materiaalit

Tässä työssä käytetyt laitteet, ohjelmat ja materiaalit selviävät alla olevista luettelista.

Käytetyt ohjelmat:

- SolidWorks Education Edition 2011 SP4.0
- Autopol Release Version 01.21.0012 – 2011-10-17 (Win32).

Käytetyt laitteet:

- Finn-Power B160-3060 särmäin
- digitaalinen työntömitta, tarkkuus 0.02 mm.

Käytetyt materiaalit:

- ohutlevy 1,5 mm
- Ruukki Laser 355 MC 4-12 mm.

7.4 Särjäsohjelmien luonti

Särjättävien kappaleiden 3D-kuvat saatiin HT Laser Oy:ltä Vieremältä. Tiedostot olivat SolidWorksin part-tiedostoformaattissa. Kuvat käännettiin SolidWorks-ohjelmalla Acis (*.sat)-tiedostomuotoon, jotta ne voitiin tuoda AutoPOL-ohjelmaan. AutoPOL-ohjelmalla muutettiin kappaleiden sisäsaiteet työkalujen mukaiseksi, minkä jälkeen kappaleet levitettiin. Levityskuvat tallennettiin dxf-tiedostoiksi, joiden mukaan ne leikattiin HT Laser Oy Vieremällä.

AutoPOL-ohjelmalla luotiin myös särjäsohjelmat; särjäsohjelmien luonti tehtiin Bend Simulator-moduulilla. Valmiit särjäsohjelmat siirrettiin särjäimelle nc-tiedostoina.

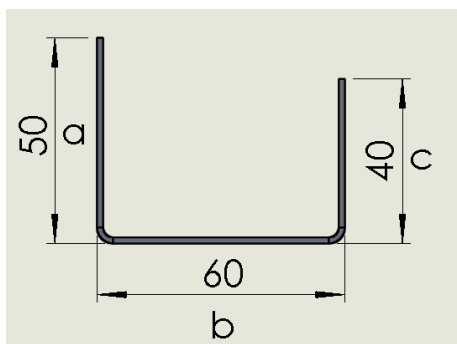
7.5 Kappaleiden särjäys

Kappaleet särjättiin Finn-Power B160-3060-särjäimellä. Analysoitavia kappaleita oli kahdeksan ja jokaista kappaletta särjättiin viisi kutakin. Ensimmäiset kappaleet särjättiin suoraan AutoPOL-ohjelmasta saadulla särjäsohjelmalla. Kappaleen kulmat mitattiin ja säädettiin tarvittavat kulmakorjaukset. Kun ensimmäinen kappale oli särjäetty, mitattiin sen sivujen pituudet ja tarvittavat korjaukset lisättiin seuraavan kappaleen särjäsohjelmaan. Vaaditut kappalekohtaiset asetukset ja korjaukset selviävät kappalekohtaisissa mittaustuloksissa, jotka ovat liitteessä 1-8.

8 TULOKSET

8.1 Mittatarkkuus ohutlevyillä

Ensimmäiset testikappaleet mallinnettiin SolidWorksilla, jolla laadittiin käytettävästä ohutlevykappaleesta 3D-malli. Sen jälkeen 3D-malli vietiin AutoPOL-ohjelmaan, jolla 3D-malli levitettiin. Levitetystä kuvannosta tehtiin särmäysohjelma. Särmäysohjelma tulostettiin nc-koodina särmäimelle. Levykappaleet leikattiin plasmaleikkurilla, jonka jälkeen kappaleet särmättiin ja mitattiin. Tuloksista tehtiin johtopäätökset vaadittaville korjauksille. Työssä tarkastettiin myös Finn-Power-särmäimen Delem-ohjauslaitteiston tarkkuus. Testissä käytetty materiaali oli 1,5 mm ohutlevy ja testissä käytetty kappale on esitetty kuvassa 16.



KUVA 16. Ohutlevyllä käytetty testikappale

Kappaleiden oikaistunpituuden laskentaan käytettiin AutoPOL-ohjelmassa jo olemassa olevia materiaaliarvoja, käytetystä materiaalista kalibroituja materiaaliarvoja AutoPOL-ohjelmalle sekä SolidWorksin laskemaa arvoa. Hitsauslaboratoriossa oli aiemmin huomattu Delem-ohjauksen antavan virheellisen oikaistunpituuden kappaleille, joten Delem-ohjauksen sijasta ohjelmassa käytettiin SolidWorksin antamaa oikaistunpituuden arvoa. Taulukossa 2 on eri ohjelmien laskemat oikaistut pituudet.

TAULUKKO 2. Ohjelmien laskema oikaistunpituus

Delem	Autopol 1.*	Autopol 2. **	Solidworks	Din 6935
141.5	143.56	143.42	143.48	142.61

*AutoPOL 1. Käytössä olleet Fe-materiaaliarvot

**AutoPOL 2. Käytetystä materiaarista kalibroidut materiaaliarvot.

8.1.1 Mittaustulokset

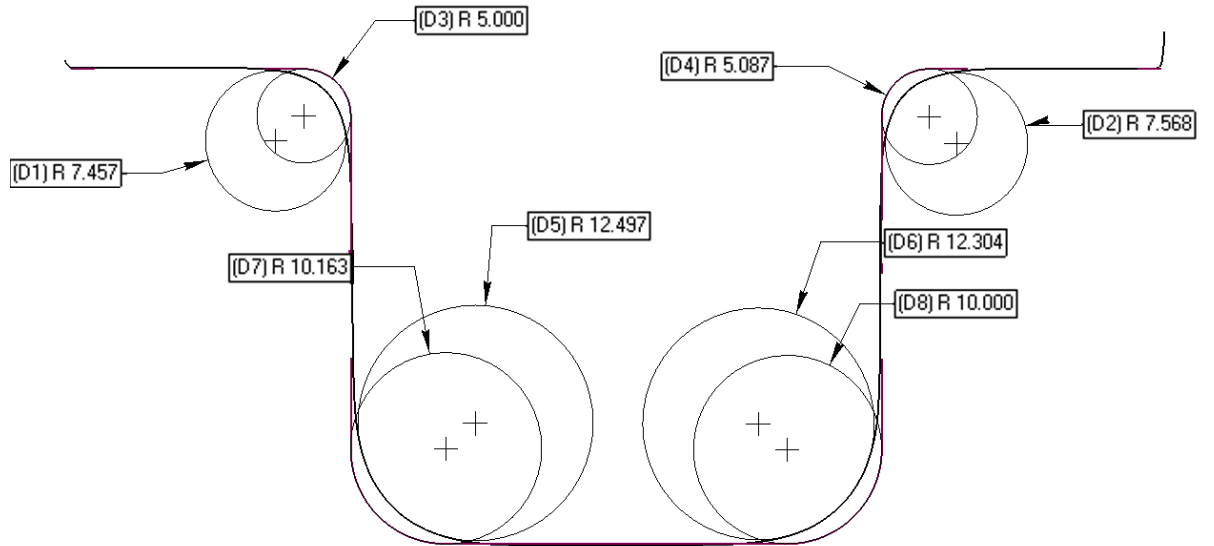
Mittaustuloksista (taulukko 3) nähdään Delem-ohjaimella laaditun mallin olevan kohtuullisen tarkka ja tarkkuuden riittävän normaaleihin levynsärmäyksiin. Pitää kuitenkin muistaa, että Delem-ohjaus laskee oikaistun pituuden väärin; tulos vääristyy tapausittain noin kaksi millimetriä. AutoPOL-ohjelmalla laaditut mallit olivat tarkempia, kun takavasteiden referenssejä siirrettiin $-0,6$ millimetriä. Särmätyksen kappaleen taivutuskulmat poikkesivat suunnitellusta noin $1,5^\circ$, joka korjattiin särmäyspuristimella särmäysohjelmaan.

TAULUKKO 3. Mittaustulokset 1,5 mm ohutlevy

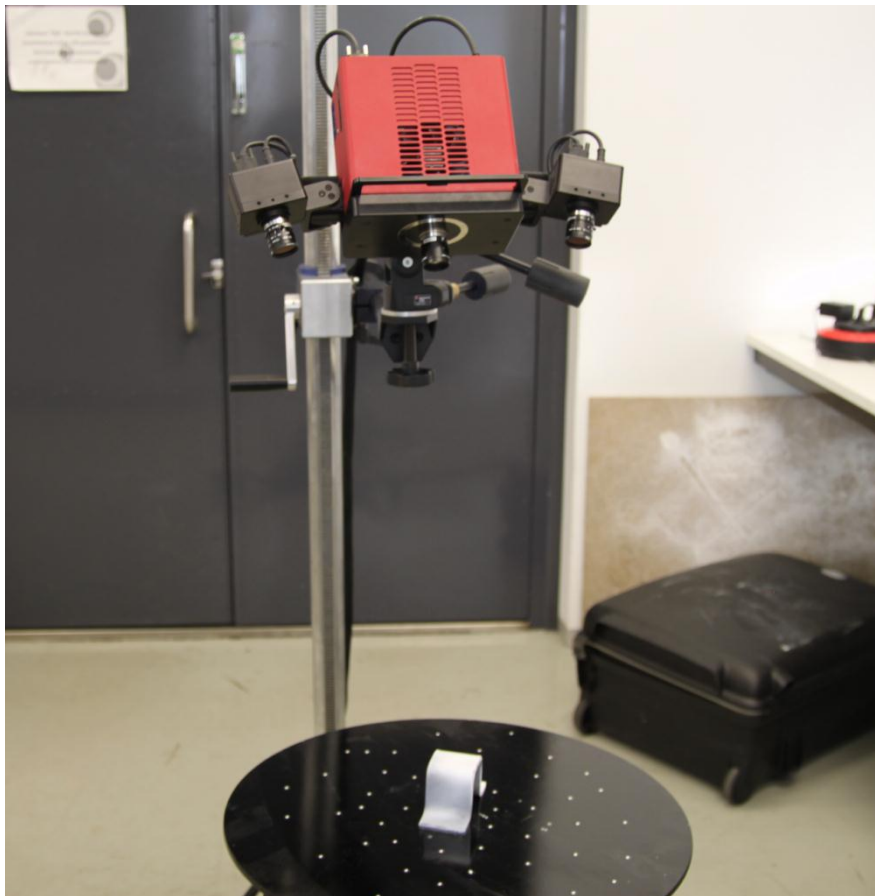
Kappale	Sivut			Mitattu oik.pit.	Kulma
	a	b	c		
Delem	50.24	60.25	40.16	143.80	88.5
Autopol 1	50.18	59.80	40.18	143.70	88.5
Autopol 2	50.03	60.20	50.01	143.47	88.5

8.1.2 Työkalujen mukaan laskettu sisäsäde

AutoPOL-ohjelmassa on ominaisuus, jolla särmättävään kappaleeseen voidaan määrittää sisäsäde työkalujen mukaan, jotta kappaleen dimensiot olisivat kohdallaan särmättyinä. Huomattavaa tässä on se, että kappaleesta on tehtävä uusi leikkauskuvanto, johon on laskettu sisäsäteiden muutoksien vaikutus. Tässä tutkimuksessa oletettiin suunniteltavan kappaleen olevan sisäsäteillä, joita ei saada suoraan käytettävissä olevilla työkaluilla. Kuviossa 1 on päällekkäin asetettu suunniteltu 2D-malli ja 3D-skannattu särmätty kappale. Kappaleen kulmissa huomataan olevan dimensioissa eroja, mikä johtuu siitä, ettei työkaluilla pystytty taivuttamaan kappaletta suunnitelluille sisäsäteille. Kappale on suunniteltu sisäsäteille $r5$ (D3, D4) ja $r10$ (D7, D8). AutoPOL-ohjelman mukaan käytettävissä olevilla työkaluilla saatiin sisäsäteiden säteiksi $7,5$ ja $12,5$. Kappaleeseen muutettiin sisäsäteet työkalujen mukaisiksi, luotiin leikkauskuvanto, leikattiin raina ja kappale särmättiin. Tutkimuksissa kuvattiin särmätty kappale 3D-skannauksella (kuva 26) ja siitä tutkittiin sisäsäteet 3D-mallina tietokoneella. Tulosten perusteella nähdään, että AutoPOL-ohjelman laskema sisäsäde pitää paikkansa.



KUVIO 10. Geomagic Qualify 2D-analyysi



KUVA 17. 3D-skannaus testikappaleelle. (Valokuva, Tuomo Penttinen)

8.2 Paksujen materiaalien särmäys AutoPOL-ohjelmalla

Testeissä huomattiin AutoPOL-ohjelman soveltuvan ohutlevyjen lisäksi paksummille materiaaleille. Ohjelman mittatarkkuutta saatiin lisää, kun paksuista materiaaleista tehtiin omat materiaaliasetukset ohjelman kirjastoon. Työssä käytetyt materiaaliasetukset jäivät hitsauslaboratorion käyttöön.

8.3 HT-Laser Oy Vieremän kappaleet

HT-Laser Oy Vieremän kappaleista laadittiin kappalekohtaiset analyysit, joista selviävät särmäyksessä käytetyt asetukset, korjaukset, särmäyksen ongelmakohdat ja mittaustulokset. Nämä mittaustulokset ovat esitetty liitteissä 1-8. Yrityksen kappaleista on tehty salassapitosopimus, joten nämä liitteet ovat salaisia.

8.4 AutoPOL-käyttöohjeet

AutoPOL-ohjelmasta laadittiin yksinkertaiset käyttöohjeet, joista selviää kappaleen työkierto ohjelmassa. Ohjeita laadittiin myös ohjelman niistä ominaisuuksista, jotka katsottiin olevan tärkeitä. Ohjeista luotiin yksinkertainen raportti ja videoita (Liite 9).

9 YHTEENVETO JA TYÖN ARVIOINTI

Työn tavoitteena oli selvittää AutoPOL-ohjelman toiminta ja tarkkuus teollisessa ympäristössä. Työn teoriaosuudessa esiteltiin AutoPOL-ohjelma ja käsiteltiin taivutuksen teoriaa, särmäystä yleisesti, taivutuslaitteistoja ja lyhyesti lujien terästen särmäystä. Kokeellisessa osuudessa tutkittavana oli AutoPOL-ohjelman avulla tehtyjen särmäysohjelmien mittatarkkuus eri levyn paksuuksilla.

Opinnäytetyössä tehtyjen kokeiden perusteella AutoPOL-ohjelma soveltuu särmäyksen apuvälineeksi. AutoPOL-ohjelman avulla päästään tarkempaan särmäystulokseen, se soveltuu ohutlevyjen lisäksi myös paksummille materiaaleille ja sillä voidaan havaita jo suunnitteluvaiheessa ongelmia, jotka tulisivat normaalisti ilmi vasta särmätessä.

Työssä törmättiin erilaisiin ongelmatilanteisiin, jotka pystyttiin ratkaisemaan olemalla yhteydessä laitteiston ja ohjelman valmistajiin. Ongelmia oli esimerkiksi AutoPOL-ohjelman tukisivuston ja työssä käytettävän kannettavan Windows-käyttöjärjestelmän yhteensopivuudessa. Ongelma saatiin rajattua Microsoft Runtime-kirjastoihin ja se saatiin korjattua kokeilemalla eri kirjastoja.

10 JATKOTOIMENPITEET

Työssä huomattiin AutoPOL-ohjelman soveltuvan särmäyksen apuvälineeksi ja sillä päästään tarkempaan särmäystulokseen kuin särmäimen omalla ohjelmalla. Jatkotoimenpiteenä olisi hyvä tutkia tietyn yrityksen mahdollisia konkreettisia ajan ja rahan säästöjä, joita saataisiin AutoPOL-ohjelman avulla. AutoPOL-ohjelman avulla voitaisiin havaita jo suunnitteluvaiheessa mahdollisia myöhemmässä vaiheessa esiintyviä ongelmia, jotka mahdollisesti vaativat kappaleen uudelleen suunnittelun.

LÄHTEET

Aaltonen, K., Andersson, P. & Kauppinen, V. 1997. *Levytyö- ja työvälinetekniikat*. 1. painos. Porvoo: WSOY.

FCC Software AB, AutoPOLohjelman WWW-sivu. [viitattu 20.2.2012]. Saatavissa: <http://www.autopol.com/>

Erkkilä, T, 1985. *Takaisinjousto särmäyksessä*. Helsinki: Metalliteollisuuden keskusliitto, Tekninen tiedotus 27/1985.

Karppinen, A. 1986. *Ohutlevyjen taivutus*. Helsinki: Metalliteollisuuden keskusliitto, Tekninen tiedotus 23/1986.

Leiviskä, A. 2006. *Lujien terästen särmäys*. Oulun yliopisto, Konetekniikan osasto. Diplomityö.

Lindroos, V, Sulonen, M. & Veistinen, M. 1986. *Uudistettu Miekk-Ojan metallioppi*. Helsinki: Teknillisten tieteiden akatemia.

Määttä, A. 2009. *Lujien terästen inkrementaalinen särmäys*. Oulun yliopisto, Konetekniikan osasto. Diplomityö.

Rautaruukki Oyj. *Kuumavalssatut teräslevyt ja -kelat. Särmäys, Raex® kulutusteräokset, ultralujat Optim® QC teräokset*, [verkkodokumentti]. [Viitattu 10.2.2012] Saatavana: <http://www.ruukki.fi/~media/Finland/Files/Terastuotteet/Ruukki-Kuumavalssatut-ter%C3%A4okset-S%C3%A4rm%C3%A4ysohje.pdf>

Valorinta, V. 1993. *Koneenrakentajan metallioppi*. Kolmas painos. Tampere: Pressus Oy.