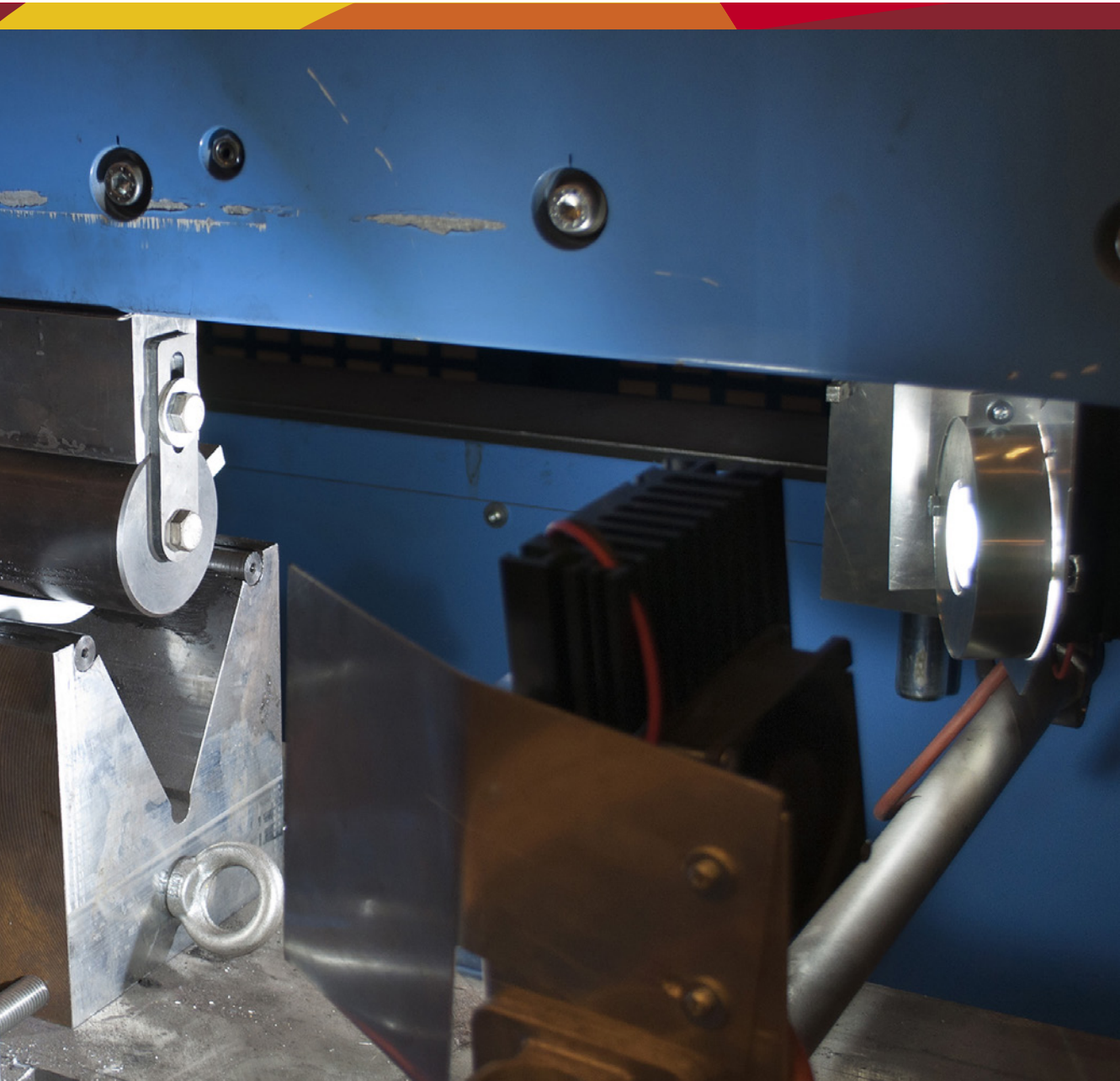


Timo Kauppi & Marko Ylitolva

# Ruostumattomien terästen särmättävyyden tutkiminen SFS-EN ISO 7438

Tekninen raportti





**Ruostumattomien terästen särmättävyyden  
tutkiminen SFS-EN ISO 7438**



Timo Kauppi & Marko Ylitolva

# **Ruostumattomien terästen särmättävyyden tutkiminen SFS-EN ISO 7438**

Tekninen raportti

**Sarja B. Raportit ja selvitykset 8/2013**

© Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu ja tekijät

ISBN 978-952-5897-64-7 (pdf)  
ISSN 1799-831X (verkkojulkaisu)

Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun julkaisuja  
Sarja B. Raportit ja selvitykset 8/2013

Rahoittajat: Euroopan Unioni Euroopan  
aluekehitysrahasto, Vipuvoimaa EU:lta  
2007-2013, Tekes

Kirjoittajat: Timo Kauppi & Marko Ylitolva  
Kannen kuva: Raimo Ruoppa  
Taitto: Pia Kuha

Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu  
PL 505  
94101 Kemi  
Puh. 010 353 50

[www.tokem.fi/julkaisut](http://www.tokem.fi/julkaisut)



Lapin korkeakoulukonserni LUC on  
yliopiston ja kahden ammattikorkea-  
koulun strateginen yhteenliittymä.  
Konserniin kuuluvat Lapin yliopisto,  
Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu ja  
Rovaniemen ammattikorkeakoulu.

[www.luc.fi](http://www.luc.fi)

# Sisällys

1	JOHDANTO . . . . .	7
2	TEORIAA . . . . .	9
	2.1 Ruostumattomat teräkset . . . . .	9
	2.2 Vapaataivutus . . . . .	9
	2.3 Laitteisto . . . . .	10
3	KOEMATERIAALIT JA TEHDYT KOKEET . . . . .	13
	3.1 Testatut materiaalit . . . . .	13
	3.2 Näytekoko . . . . .	13
	3.3 Tukitelojen välinen etäisyys . . . . .	13
	3.4 Painimen nopeus . . . . .	14
	3.5 Testien suoritus . . . . .	15
4	TULOKSET . . . . .	17
	4.1 Eri parametrien vaikutus taivutukseen tarvittavaan voimaan . . . . .	17
	4.2 Tilastollinen jatkokäsittely . . . . .	22
	4.3 Takaisinjousto taivutuksessa . . . . .	23
	4.4 Taivutusnopeuden vaikutus maksimivoimaan . . . . .	26
	4.5 Tilastollinen jatkokäsittely . . . . .	29
5	YHTEENVETO . . . . .	31
6	LÄHTEET . . . . .	33





# 1 Johdanto

Särmäys on yleisin ohutlevyn muovaamistapa, joka on käytössä suurimmalla osalla teräsrakentamiseen liittyvistä yrityksistä. Särmäyksen onnistumiseen vaikuttavat monet tekijät, kuten teräksen lujuus, muokkauslujittumistaipumus ja anisotropia.

Ferriittiset ruostumattomat teräkset muokkauslujittuvat huomattavasti austeniittisiä laatuja vähemmän, mikä tarkoittaa sitä, että teoriassa särmäykseen vaadittava voima on pienempi ja takaisinjousto vähäisempää.

Tässä raportissa esitetään tulokset tutkimuksesta, jossa selvitettiin Zwick - Roell Allround Floor 250kN vetokoneella tehtävän taivutustestin soveltuvuutta särmäytävyyden tutkimiseen. Työssä käytettiin vetokoneen kolmipistetaivutustestiin tarkoitettuja työkaluja ja SFS-EN ISO 7438 standardiin perustuvaa metallisten materiaalien taivutustestiä.

Tavoitteena oli tutkia ferriittisten ja austeniittisten ruostumattomien terästen särmäytävyyttä ja selvittää mahdollisia eroavaisuuksia.

Taivutustestejä tehtiin yhdelle ferriittiselle EN 1.4509 ja kolmelle austeniittiselle EN 1.4301, EN 1.4318 ja EN 1.4404 ruostumattomalle teräkselle.

Tutkimus tehtiin osana Jalosärämä -projektia. Projektin rahoittajana toimi TEKES ja Euroopan aluekehitysrahasto (EAKR).



# 2 Teoriaa

## 2.1 RUOSTUMATTOMAT TERÄKSET

Ruostumattomat teräkset ovat vähintään 10,5% kromia (Cr) sisältäviä erikoisseostereäksiä, joissa on enintään 1,2% hiiltä (C). Euroopassa on standardoitu 160 ruostumattomaa teräslaatua, jotka yleensä jaotellaan mikrorakenteen mukaan seuraavasti:

- Austeniittiset: Fe-Cr-Ni, hiili <0,1%, toimitustilassaan ei-magneettisia, kattavat <65% maailman ruostumattoman teräksen käytöstä
- Ferriittiset: Fe-Cr, hiili <0,1%, magneettisia, kattavat n. 20% maailman ruostumattoman teräksen käytöstä
- Martensiittiset: Fe-Cr, hiili > 0,1%, magneettisia ja karkaistavia
- Duplex: Fe-Cr-Ni-N, austeniittis – ferriittinen rakenne, magneettisia.

Austeniittisille ruostumattomille teräksille ominainen piirre on kylmämuovauksen yhteydessä esiintyvä voimakas muokkauslujittuminen. Tämä tarkoittaa sitä, että muokkausasteen kasvaessa materiaali vastustaa myötymistä mikä näkyy voimakkaana muokkausvoiman kasvuna. /1/

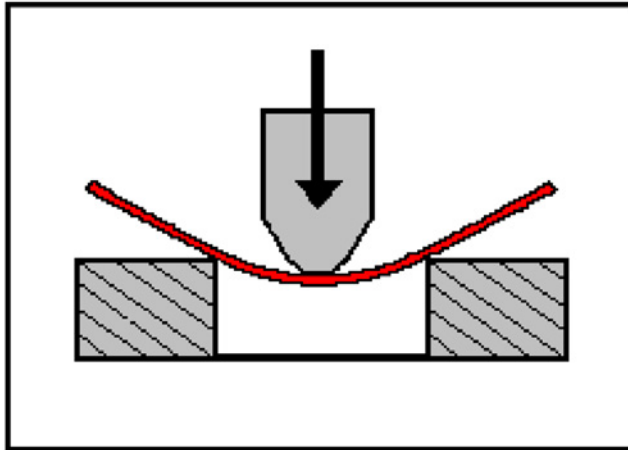
Muokkauslujittumisella on käytännön merkitystä esim. levyn särmäyksessä, jossa materiaalia taivutetaan yleensä 90° kulmaan.

## 2.2 VAPAATAIVUTUS

Vapaataivutuksella eli ilmvälitaivutuksella tarkoitetaan kolmipistetaivutusta, jossa ei suoriteta työstöliikkeen pohjaaniskua. Tässä taivutustavassa levyaihiota taipuu kolmipistetaivutuksena siten, että painin ei kosketa kokonaisuudessaan levyaihiota, vaan painimen ja vastimen väliin jää jonkinasteinen ilmarako. Yleisesti vapaataivutuksessa on käytetty teräviä (< 90°) kulmia painimen ja vastimen välillä, jolloin tavoiteltu kulma saadaan pelkästään säätämällä painimen iskunpituutta. /2/

Vapaataivutuksessa pyritään kompensoimaan takaisinjoustoja suorittamalla tarvittavan suuri ylitaivutus. Tässä tavassa taivutettava levy ei kosketa vastimen pohjaa, minkä johdosta muokkaus tapahtuu taivutuskaaren alueella ja takaisinjousto on suu- rempaa kuin pohjaaniskussa /3/.

Vapaataivutuksessa kappaleen lopulliseen muotoon vaikuttavat materiaalin lujuusominaisuudet, työkalujen asema suhteessa toisiinsa sekä levyn paksuus. Yksittäisen työkalun geometrisilla ominaisuuksilla ei ole kappaleen lopullisen muodon kannalta merkitystä, vaan merkittävämpää on niiden suhteellinen asema toisiinsa nähden. Kuvassa 2.2.1 on esitetty vapaataivutuksen periaate. /4/

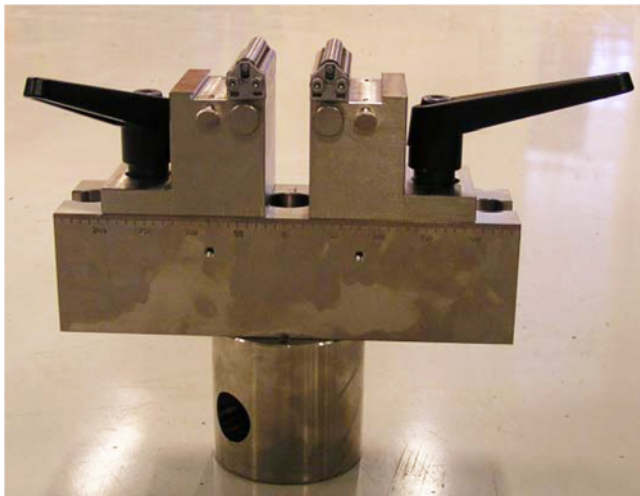


**Kuva 2.2.1**  
Vapaataivutuksen periaatekuva. /4/

## 2.3 LAITTEISTO

Taivutustestit tehtiin Kemi-Tornion ammattikorkeakouluun hankitulla Zwick-Roell Allround Floor 250kN vetokoneella (kuva 1.3.1). Sen korkeus on 2924 mm, testausalueen syvyys 1030 mm ja leveys 924 mm. Painoa laitteella on noin 2650 kg. Testauslämpötila alue on  $-60^{\circ}\text{C}...+250^{\circ}\text{C}$

Kuvassa 2.3.1 on esitetty vetokoneen leukoihin vaihdettava alaosan puristustyökalu, jolla voidaan suorittaa kolmipistetaivutustestausta. Kuvan työkalussa tukitelojen väli on säädettävä, joten se soveltuu hyvin erilaisten taivutuskokeiden tekemiseen.



**Kuva 2.3.1** Vetokoneen kolmipistetaivutustestien alatyökalu.

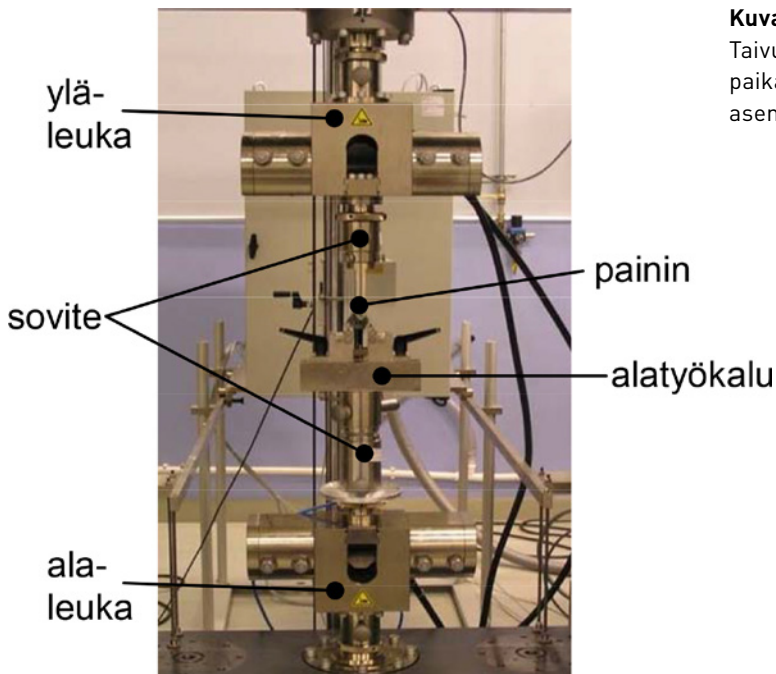
Kuvassa 2.3.2 nähdään vetokoneeseen asennettava ylätyökalu eli painin, jolla testattavat näytteet taivutetaan kulmiin. Painimen säde  $r = 5\text{ mm}$  ja se on suuri todellisiin särmästyökaluihin verrattuna.



**Kuva 2.3.2**  
Taivutustuurna  $r = 5$   
mm pyörityksellä

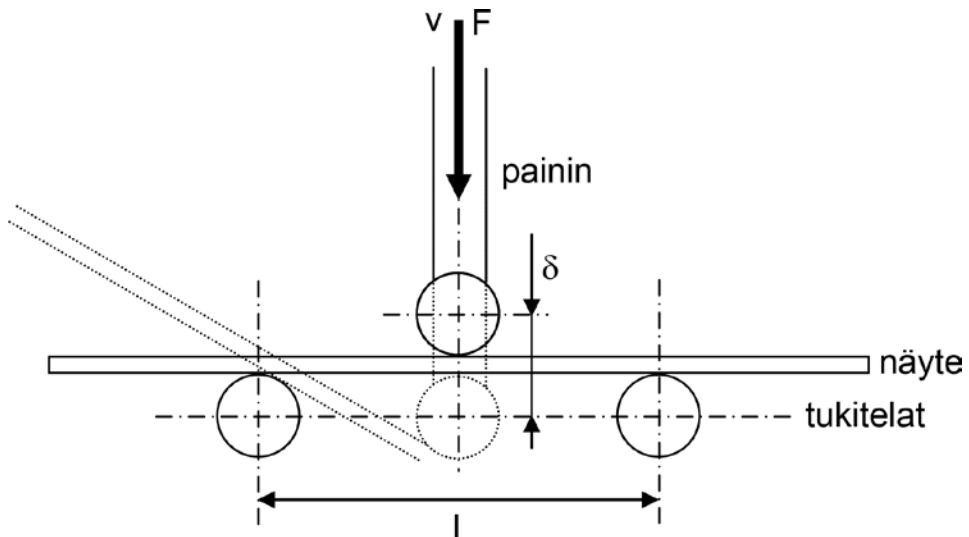
Tulevia särmäystä jäljitteleviä taivutuskokeita varten on suunniteltu ja valmistetaan aivan uusi yläpainin, jossa pyörivä rulla on korvattu särmästyökalua muistuttavalla yhtenäisellä rakenteella ja halutulla terän pyörityksellä. Tällöin koe vastaa enemmän todellista särmäystapahtumaa.

Kuvassa 2.3.3 nähdään taivutustyökalut paikoillaan vetokoneessa. Kuvasta käy ilmi myös millaiset sovitekappaleet tarvitaan, jotta taivutustyökalut saadaan kiinnitettyä vetokoneeseen.



**Kuva 2.3.3**  
Taivutustyökalut  
paikalleen  
asennettuna.

Kuvassa 2.3.4 on esitetty kolmipistetaivutustestin periaate. Taivutettava näyte laitetaan alatyökalan tukitelojen päälle. Testin aikana levyä painetaan taivutustuurnalla voimalla  $F$  ja nopeudella  $v$  siten, että tuurna siirtyy matkan  $f$  verran, jolloin levy alkaa taipumaan. Testissä voidaan määrittellä siirtymä  $f$  (mm), jonka painin laskeutuu tai haluttu tavoitekulma  $\alpha$  (°), esim.  $90^\circ$ . Tavoitekulma vaihtoehto valittaessa vetokoneen TestXpert II-ohjelmisto laskee tarvittavan painimen siirtymän  $f$ .



**Kuva 2.3.4** Kolmipistetaivutustestin periaatekuva.

# 3 Koemateriaalit ja tehdyt kokeet

## 3.1 TESTATUT MATERIAALIT

Koemateriaalien standardin SFS-EN 10088-2 mukaiset koostumukset on annettu taulukossa 3.1.1. Mekaaniset ominaisuudet on annettu taulukossa 3.1.2.

**Taulukko 3.1.1** Testeissä käytettyjen materiaalien kemialliset koostumukset. /5/

EN	AISI	%C	%N	%Cr	%Ni	%Mo	muut
1.4301	304	0.04	-	18.1	8.3	-	-
1.4318	301LN	0.02	0.14	17.7	6.5	-	-
1.4404	316L	0.02	-	17.2	10.1	2.1	-
1.4509	441	0.02	-	18.0	-	-	Ti+Nb=0.6%

**Taulukko 3.1.2** Testimateriaalien mekaaniset ominaisuudet. /5/

EN	AISI	Rp0.2	Rm	A%
1.4301	304	230	540...750	45
1.4318	301LN	350	650...850	35
1.4404	316L	240	530...680	40
1.4509	441	230	430...630	18

## 3.2 NÄYTEKOKO

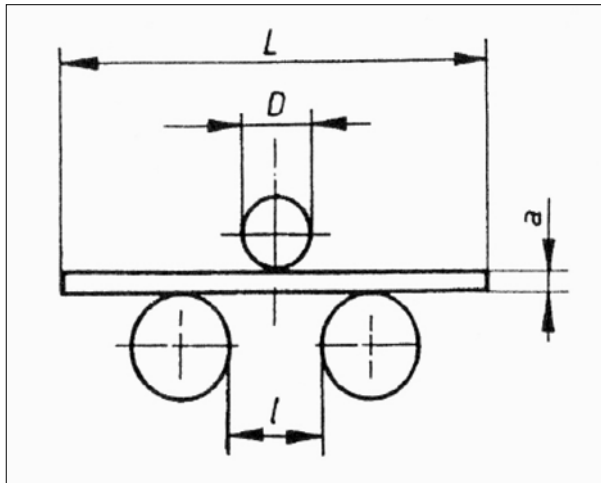
Taivutustestejä varten leikattiin JaloteräsStudiolla mekaanisella leikkurilla jokaisesta materiaalista 20 x 200 mm<sup>2</sup> kokoisia näytteitä.

## 3.3 TUKITELOJEN VÄLINEN ETÄISYYS

SFS-standardin /6/ mukaan tukiteلوjen välinen etäisyys kolmipistetaivutuksessa saadaan laskettua kaavasta:

$$I = (D + 3a) \pm a/2 \quad (1)$$

missä  $l$  = tukitelojen välinen etäisyys,  $D$  = painimen halkaisija ja  $a$  = levyn paksuus (kts. kuva 3.3.1).



**Kuva 3.3.1**  
Kolmipistetaivutuksen periaatekuva /6/

Kaavan mukaan tukitelojen välinen etäisyys eri näytepaksuuksilla  $a$  pitäisi olla taulukossa 3.3.1 esitetyn mukainen ( $l_{\min}$  ja  $l_{\max}$ ).

**Taulukko 3.3.1** Standardin mukainen tukitelojen välinen etäisyys.

D	t	l	$\pm t/2$	$l_{\min}$	$l_{\max}$	välys min	välys max
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
10	0.8	12.4	0.4	12.0	12.8	1.0	1.4
10	1.0	13.0	0.5	12.5	13.5	1.3	1.8
10	1.5	14.5	0.8	13.8	15.3	1.9	2.6
10	2.0	16.0	1.0	15.0	17.0	2.5	3.5

Näin pienten tukitelojen välisten etäisyyksien käyttäminen oli mahdotonta käytettyillä työkaluilla. Tässä yhteydessä päätettiin testata huomattavasti suurempia tukitelojen välin  $l$  arvoja. Kokeet tehtiin käyttäen arvoja  $l = 50$  mm,  $60$  mm,  $70$  mm tai  $80$  mm.

### 3.4 PAINIMEN NOPEUS

Painimen liikenopeuden ( $v$ ) vaikutusta tarvittavaan voimaan ja takaisinjousto-  
tattiin käyttämällä nopeuksia  $v = 1$  mm/s,  $5$  mm/s ja  $10$  mm/s.

Edellisen kohdan testien perusteella valittiin tukitelojen väliseksi etäisyydeksi  $l = 50$  mm. Vetokoneen kaikki muut asetusarvot säilytettiin samanlaisina kuin edellisen kohdan testeissä. Näin saatiin tietoa siitä, millainen vaikutus pelkästään taivutusnopeudella voisi olla halutun kulman aikaansaamiseksi.



### 3.5 TESTIEN SUORITUS

Kaikki testit tehtiin siten, että näytteet taivutettiin 90°:een kulmaan (parametri testiohjelmassa) ja kokeen aikana mitattiin taivutuksen vaatimaa voimaa (F) sekä taivutustuurnan siirtymää (f).



# 4 Tulokset

## 4.1 Eri parametrien vaikutus taivutukseen tarvittavaan voimaan

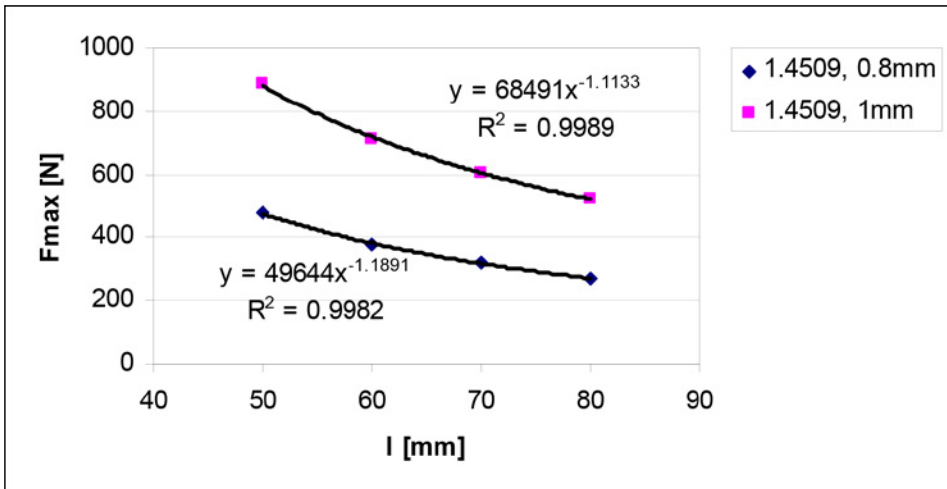
Taulukossa 4.1.1 on annettu taivutus-testien välittömät tulokset. Taulukosta nähdään, että taivutukseen vaadittu maksimivoima ( $F_{max}$ ) vaihteli välillä 225...3760N tehdyissä kokeissa.

Kuvissa 4.1.1 – 4.1.4 on esitetty maksimitaivutusvoiman ( $F_{max}$ ) riippuvuus tukitelojen välistä  $l$  eri materiaaleilla. Kuvista nähdään, että taivutusvälillä on selkeä vaikutus tarvittavaan voimaan. Mitä suurempi väli on, sitä vähemmän tarvitaan voimaa 90°:een kulman saavuttamiseksi.

Kuvan 4.1.1 regressiomallien avulla laskettuna ferriittisellä ruostumattomalla teräksellä EN 1.4509 tarvitaan keskimäärin 47.4% pienempi voima 90°:een taivutukseen paksuuden pienessä 1mm  $\rightarrow$  0.8mm.

**Taulukko 4.1.1** Testattu materiaali (LAATU), paksuus (a), tukitelojen välinen etäisyys (l) ja mitattu taivutuksen maksimivoima ( $F_{max}$ ).

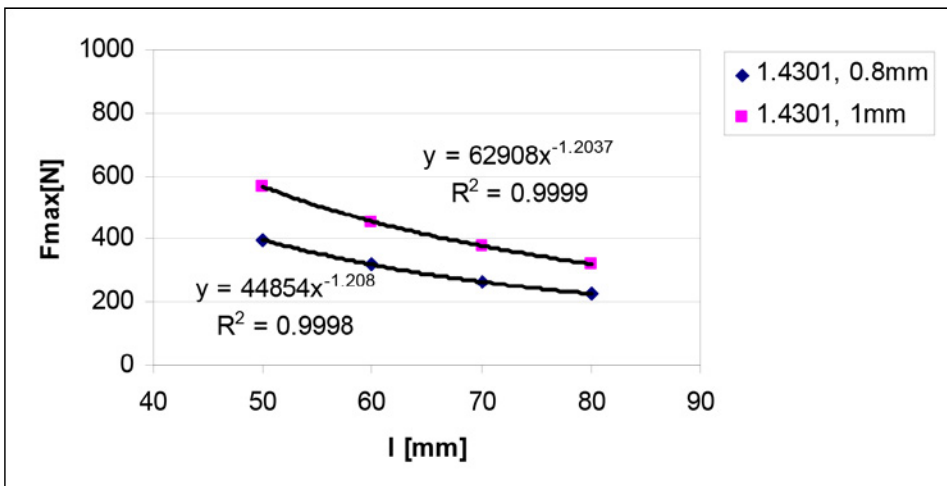
Laatu	a [mm]	l [mm]	$F_{max}$ (N)
EN 1.4509	0.80	50	477
EN 1.4509	0.80	60	376
EN 1.4509	0.80	70	320
EN 1.4509	0.80	80	271
EN 1.4509	1.00	50	885
EN 1.4509	1.00	60	710
EN 1.4509	1.00	70	605
EN 1.4509	1.00	80	523
EN 1.4301	0.80	50	398
EN 1.4301	0.80	60	318
EN 1.4301	0.80	70	266
EN 1.4301	0.80	80	225
EN 1.4301	1.00	50	568
EN 1.4301	1.00	60	455
EN 1.4301	1.00	70	377
EN 1.4301	1.00	80	323
EN 1.4318	1.50	50	2097
EN 1.4318	1.50	60	1646
EN 1.4318	1.50	70	1364
EN 1.4318	1.50	80	1150
EN 1.4318	2.00	50	3760
EN 1.4318	2.00	60	2923
EN 1.4318	2.00	70	2422
EN 1.4318	2.00	80	2070
EN 1.4404	1.50	50	1330
EN 1.4404	1.50	60	1023
EN 1.4404	1.50	70	850
EN 1.4404	1.50	80	743
EN 1.4404	2.00	50	3170
EN 1.4404	2.00	70	2070
EN 1.4404	2.00	80	1700



**Kuva 4.1.1** EN 1.4509, tukitelojen välimatkan vaikutus taivutusvoimaan  $F_{max}$ .

Austeniittisella EN 1.4301:llä maksimi taivutusvoimat jäivät keskimäärin pienemmiksi kuin ferriittisellä EN 1.4509 teräksellä. Ne olivat paksuudesta riippuen keskimäärin 16.6% ( $a = 0.8\text{mm}$ ) tai 37.3% ( $a = 1\text{mm}$ ) pienempiä.

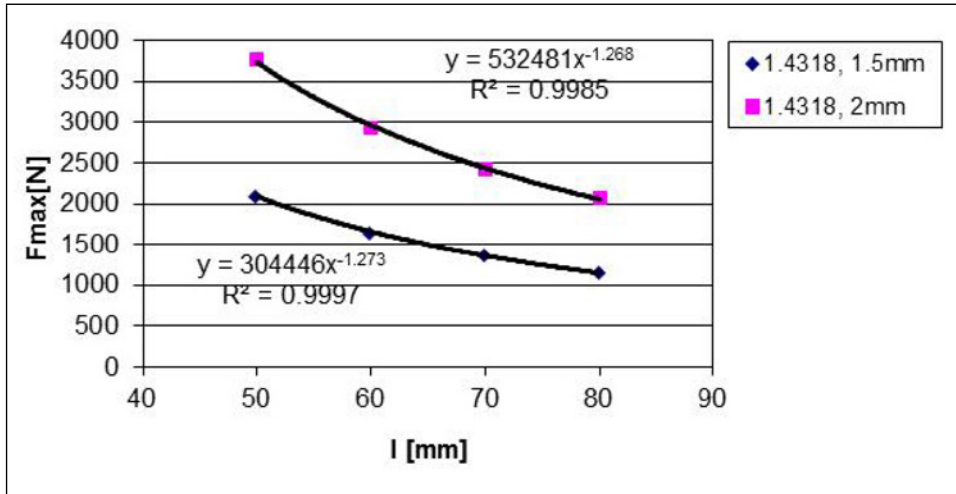
Kuvan 4.1.2 regressiomallien avulla laskettuna austeniittisella ruostumattomalla teräksellä EN 1.4301 tarvitaan keskimäärin 30.0% pienempi voima  $90^\circ$ :een taivutukseen paksuuden pienetessä  $1\text{mm} \rightarrow 0.8\text{mm}$ .



**Kuva 4.1.2** EN 1.4301, tukitelojen välimatkan vaikutus taivutusvoimaan  $F_{max}$ .

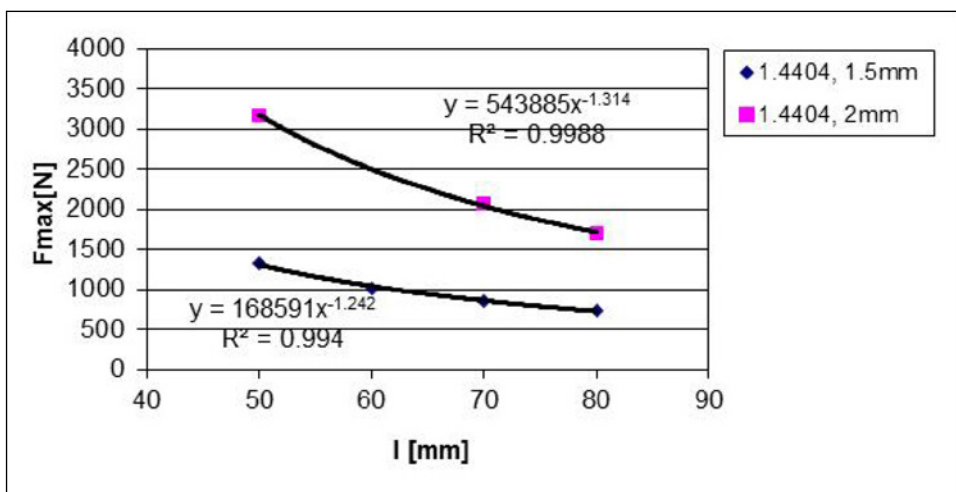
Koemateriaalit EN 1.4318 ja EN 1.4404 olivat selvästi paksumpia ( $a = 1.5$  tai  $2\text{mm}$ ), joten niitä vertaillaan omna ryhmänään.

Kuvan 4.1.3 mukaan voimakkaasti muokkauslujittuvalla EN 1.4318 teräksellä taivutusvoimat olivat huomattavasti suurempia kuin ohuemmissä näytteillä. Kuvan 4.1.3 regressiomallien avulla laskettuna austeniittisella ruostumattomalla teräksellä EN 1.4318 tarvitaan keskimäärin 57.9% pienempi voima 90°:een taivutukseen paksuuden pienetessä 2.0mm → 1.5mm.



Kuva 4.1.3 EN 1.4318 tukitelojen välimatkan vaikutus taivutusvoimaan.

Molybdeeniseosteisen EN 1.4404 teräksen taivutusvoimien riippuvuus tukitelojen välimatkasta on esitetty kuvassa 4.1.4. Tällä teräksellä voiman paksuusriippuvuus näyttää olevan voimakkainta. Regressiomallin mukaan laskettuna tarvitaan keskimäärin 57.3% pienempi voima, kun paksuus muuttuu 2.0mm → 1.5mm.



Kuva 4.1.4 EN 1.4404 tukitelojen välimatkan vaikutus taivutusvoimaan.

Taulukossa 4.1.2 on annettu kuvissa 4.1.1 – 4.1.4 olevien  $y = kx^n$  tyyppisten regressioyhtälöiden termien  $k$  ja  $n$  arvot.

**Taulukko 4.1.2** Regressioyhtälöiden  $k$  ja  $n$  arvot.

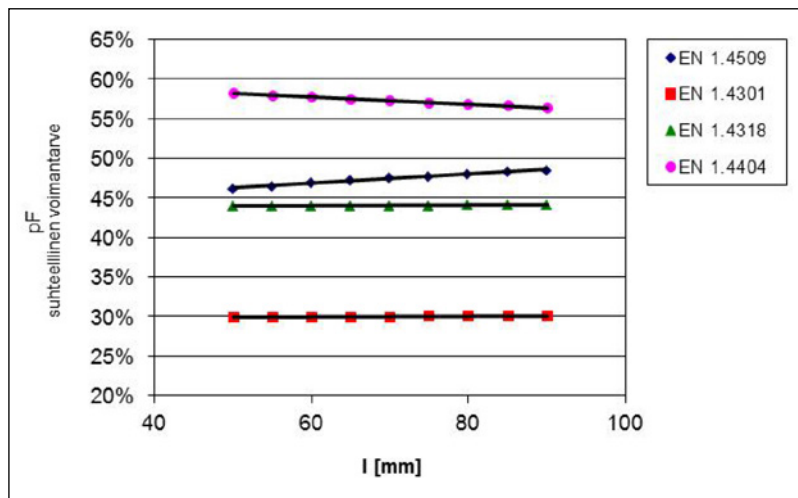
Teräs	a[mm]	k	n
EN 1.4301	0.8	44854	-1.208
EN 1.4301	1.0	62908	-1.2307
EN 1.4404	1.5	168591	-1.242
EN 1.4404	2.0	534885	-1.314
EN 1.4318	1.5	304446	-1.273
EN 1.4318	2.0	532481	-1.268
EN 1.4509	0.8	49644	-1.1891
EN 1.4509	1.0	68491	-1.1133

Jos lasketaan suhteellista voimantarvetta eli sitä kuinka paljon vähemmän voimaa tarvitaan pienemmän ainespaksuuden ( $a_{min}$ ) taivutukseen paksumpaan verrattuna, saadaan kuvan 4.1.5 mukainen esitys.

Arvot on laskettu kuvien 4.1.1 – 4.1.4 regressiomallien avulla ja yksittäisen pisteen arvo voidaan laskea kaavasta:

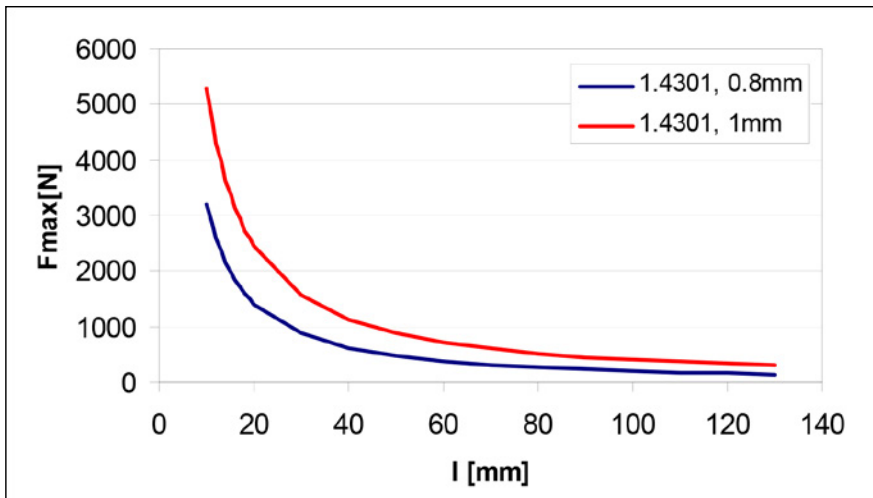
$$pF_{ENxxxx} = (F_{maxamax} - F_{maxamin}) / F_{maxamax} \quad (2)$$

Kuvasta 4.1.5 nähdään, että Mo -seosteisella austeniittisella EN 1.4404 teräksellä  $pF$ :n arvot ovat suurimpia ( $pF$  vaihtelee välillä 56.4...58.2%). Muilla teräksillä se vaihtelee välillä 29.9%...30.1% (EN 1.4301), 44.0%...44.1% (EN 1.4318) tai 46.1%...48.5% (EN 1.4509). Millään teräksellä alatyökalojen välimatkalla  $l$  ei juurikaan ole vaikutusta suhteelliseen voimantarpeeseen



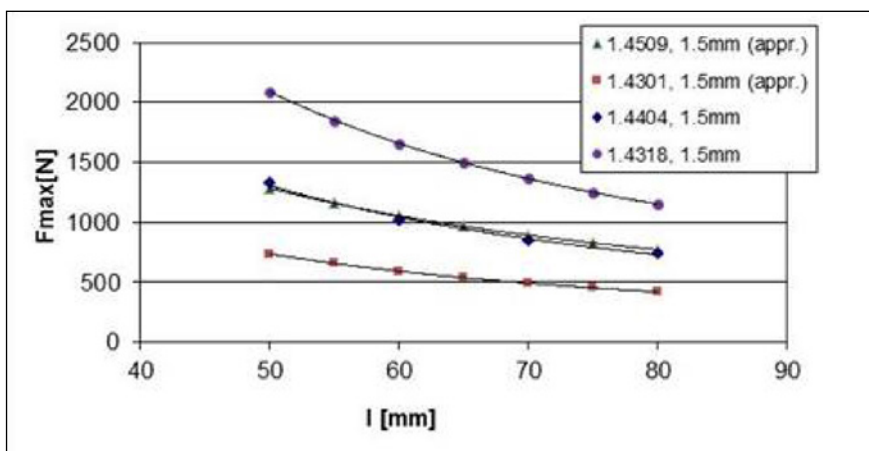
**Kuva 4.1.5** Suhteellisen voimantarpeen  $pF$  riippuvuus tukitelojen välimatkasta  $l$ .

Saaduilla regressiomalleilla voidaan tarkastella teoreettisesti miten taivutusvoima kasvaa tukitelojen välin lyhentyessä. Kuvassa 4.1.6 on esitetty  $F_{max} - l$  -käyrät EN 1.4318 teräkselle, kun  $a = 1.5$  tai  $2.0$  mm. Kuvasta nähdään, että maksimivoima kasvaa rajusti  $l$ :n pienetessä alle  $40$  mm:n.



**Kuva 4.1.6**  $F_{max}$ :n riippuvuus tukitelojen välimatkasta  $l$  EN 1.4318 teräksen taivutuksessa.

Kuvassa 4.1.7 nähdään eri materiaalien voimantarpeen riippuvuus tukitelojen välistä, kun EN 1.4509 ja 1.4301 terästen arvot on approksimoitu käyttäen kuvan 4.1.5 tietoja voiman paksuusriippuvuudesta. Austeniittisten terästen kohdalla järjestys on looginen. Ferriittisen EN 1.4509 teräksen arvot ovat lähes yhtenevät Mo-seosteisen EN 1.4404 kanssa.



**Kuva 4.1.7** Tutkittavien terästen voimantarpeen riippuvuus tukitelojen välimatkasta  $l$ , kun näytteen paksuus  $a = 1.5$  mm.

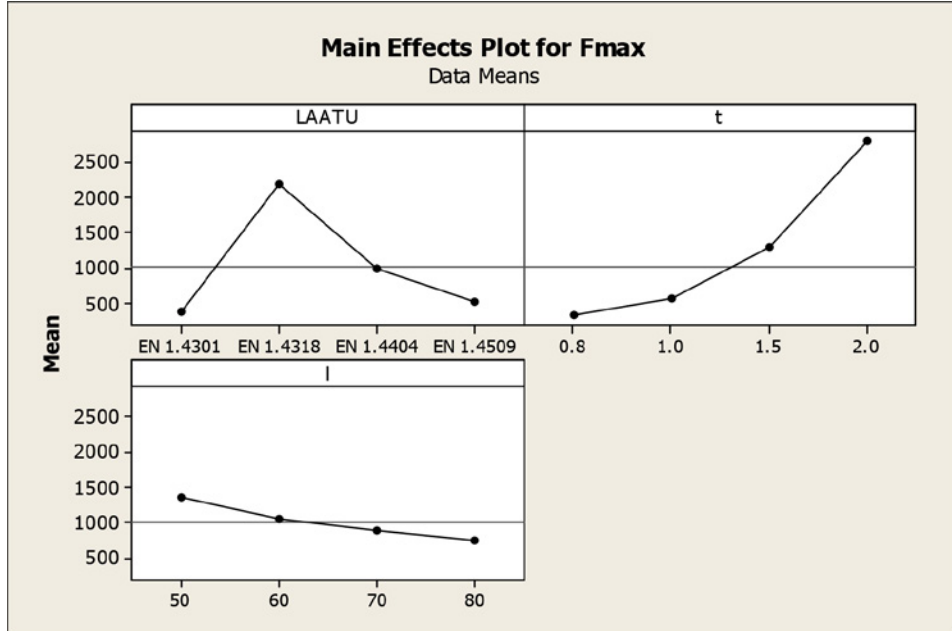
## 4.2 TILASTOLLINEN JATKOKÄSITTELY

Mittausdata käsiteltiin myös Minitab™15 -ohjelmistolla. Tulokset on esitetty kuvassa 4.2.1. Siitä nähdään, kuinka paljon eri tekijöillä on vaikutusta taivutuksessa vaadittavaan maksimivoimaan (Fmax).

Testatuista laaduista EN 1.4318 näyttäisi tarvitsevan suurimman kokonaisvoiman taipuakseen tavoitekulmaan verrattuna muihin testattuihin laatuihin. Mikä on luonnollista, koska paksuudet ovat suurimmat ja kyseessä on kylmämuokkauksessa voimakkaasti lujittuva materiaali. Tulos on yhteneväinen kuvien 4.1.1 – 4.1.4 liittyvien tarkastelujen kanssa.

Myös näytteiden paksuudella näyttäisi olevan suuri merkitys siihen minkälaisen kokonaisvoiman levyt tarvitsevat taipuakseen. Kuvasta nähdään selvästi, että mitä paksumpaa levyä taivutetaan, sitä suurempi voima tarvitaan näytteen taivuttamiseen. Tässä yhteydessä on syytä huomata se, että analysointi on kohdistettu koko aineistoon, kun taasen aiemmin se tehtiin teräslaaduittain. Tästä syystä ei voida olla varmoja päteekö kuvassa näkyvä näytepaksuus – taivutuksen maksimivoima riippuvuus yksittäiselle materiaalille. Niinpä esim. paksuuksilla  $a = 1.5 - 2$  mm voimantarpeen kasvaminen ei muilla laaduilla kuin EN 1.4318 ole kuvan mukaista.

Tukitelojen välimatkalla on vaikutusta siihen, mikä on taivutuksen maksimivoima tavoitekulma saavutettaessa. Kuvasta (VÄLI) nähdään, että maksimivoima pienenee tukitelojen välimatkan kasvaessa.



**Kuva 4.2.1** Taivutuksen maksimivoiman (Fmax) riippuvuus teräslaadusta (LAATU), näytteen paksuudesta (a) ja tukitelojen välimatkasta (l).



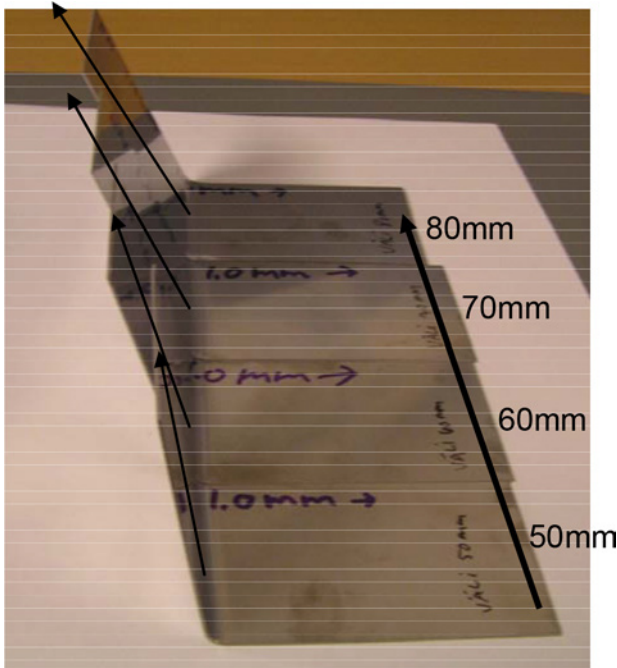
### 4.3 TAKAISINJOUSTO TAIVUTUKSESSA

Kaikista taivutetuista näytteistä mitattiin niihin syntynyt taivutuskulma ja laskettiin sen avulla takaisinjoustokulma  $\beta$ . Tulokset on annettu taulukossa 4.3.1. Takaisinjouston määrä vaihteli koko aineistossa välillä 2.0 - 22.9°. Pienintä takaisinjousto oli EN 1.4318 näytteillä (keskimäärin 6.6°) ja suurinta EN 1.4509 näytteillä (keskimäärin 16.4°). Austeniittisen EN 1.4301 laadun näytteillä takaisinjousto oli keskimäärin 12.3° ja haponkestävällä 8.1°.

**Taulukko 4.3.1** Taivutustesteistä määritetyt takaisinjoustokulmat ( $\beta$ ).

Laatu	a [mm]	l [mm]	$\alpha_{\text{mitattu}}$	$\alpha_{\text{nom}}$	$\beta$
EN 1.4509	0.8	50	98.0	90	8.0
EN 1.4509	0.8	60	105.4	90	15.4
EN 1.4509	0.8	70	109.2	90	19.2
EN 1.4509	0.8	80	111.1	90	21.1
EN 1.4509	1.0	50	98.1	90	8.1
EN 1.4509	1.0	60	105.8	90	15.8
EN 1.4509	1.0	70	110.8	90	20.8
EN 1.4509	1.0	80	112.9	90	22.9
EN 1.4301	0.8	50	97.3	90	7.3
EN 1.4301	0.8	60	98.2	90	8.2
EN 1.4301	0.8	70	109.8	90	11.8
EN 1.4301	0.8	80	101.8	90	19.9
EN 1.4301	1.0	50	95.1	90	5.1
EN 1.4301	1.0	60	102.2	90	12.2
EN 1.4301	1.0	70	106.0	90	16.0
EN 1.4301	1.0	80	107.8	90	17.8
EN 1.4318	1.5	50	93.5	90	3.5
EN 1.4318	1.5	60	94.8	90	4.8
EN 1.4318	1.5	70	96.0	90	6.0
EN 1.4318	1.5	80	97.5	90	7.5
EN 1.4318	2.0	50	92.7	90	2.7
EN 1.4318	2.0	60	94.5	90	4.5
EN 1.4318	2.0	70	97.9	90	7.9
EN 1.4318	2.0	80	105.8	90	15.8
EN 1.4404	1.5	50	92.0	90	2.0
EN 1.4404	1.5	60	93.5	90	3.5
EN 1.4404	1.5	70	101.6	90	11.6
EN 1.4404	1.5	80	105.3	90	15.3

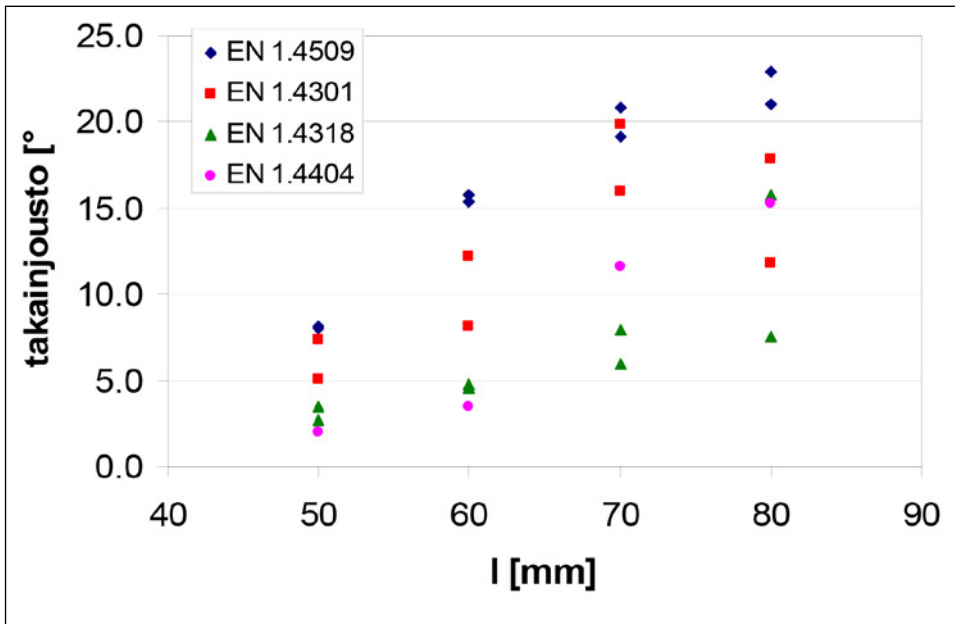
Kuvassa 4.3.1 nähdään esimerkki siitä mitä takaisinjousto käytännössä merkitsee. Kuvassa nähdään ferriittisen EN 1.4509 teräksen ( $a = 1\text{mm}$ ) näytteet kuvattuna taivutustestin jälkeen. Kuvan perusteella tukitelojen välimatka vaikuttaa merkittävästi takaisinjousto. Kuvassa tukitelojen välimatka  $l$  kasvaa ( $50 \rightarrow 60 \rightarrow 70 \rightarrow 80\text{mm}$ ) ensimmäisestä viimeiseen näytteeseen siirryttäessä.



**Kuva 4.3.1** EN 1.4509, paksuus  $a = 1.0\text{mm}$ , näytteet kuvattuna taivutustestin jälkeen.

Kuvassa 4.3.2 nähdään takaisinjouston riippuvuus tukitelojen välimatkasta  $l$  eri materiaaleilla. Yhden materiaalin data sisältää molemmat tutkitut paksuudet. Kuvasta nähdään selvästi, että ferriittisen EN 1.4509:n tapauksessa takaisinjousto on ollut suurinta. Austeniittisen EN 1.4301 näytteiden takaisinjousto on hieman vähäisempää ja hajonta selvästi suurempaa. Teräksen EN 1.4318 takaisinjousto on ollut pienintä näytepaksuuden vaikuttaessa siten, että sen kasvaessa takaisinjousto oli vähäisempää. EN 1.4404 teräksen kaikki näytteet edustivat yhtä paksuutta ( $a = 1.5\text{mm}$ ), joten paksuuden aiheuttamasta hajonnasta ei ole tietoa.

Aiemmassa tutkimuksessa [7] havaittiin, että teräksillä EN 1.4301 ja 1.4509 näytepaksuuden kasvaminen pienensi takaisinjousto ja EN 1.4301 teräksellä se oli vähäisempää. Esitetyt tulokset ovat yhteneviä tämän kanssa.



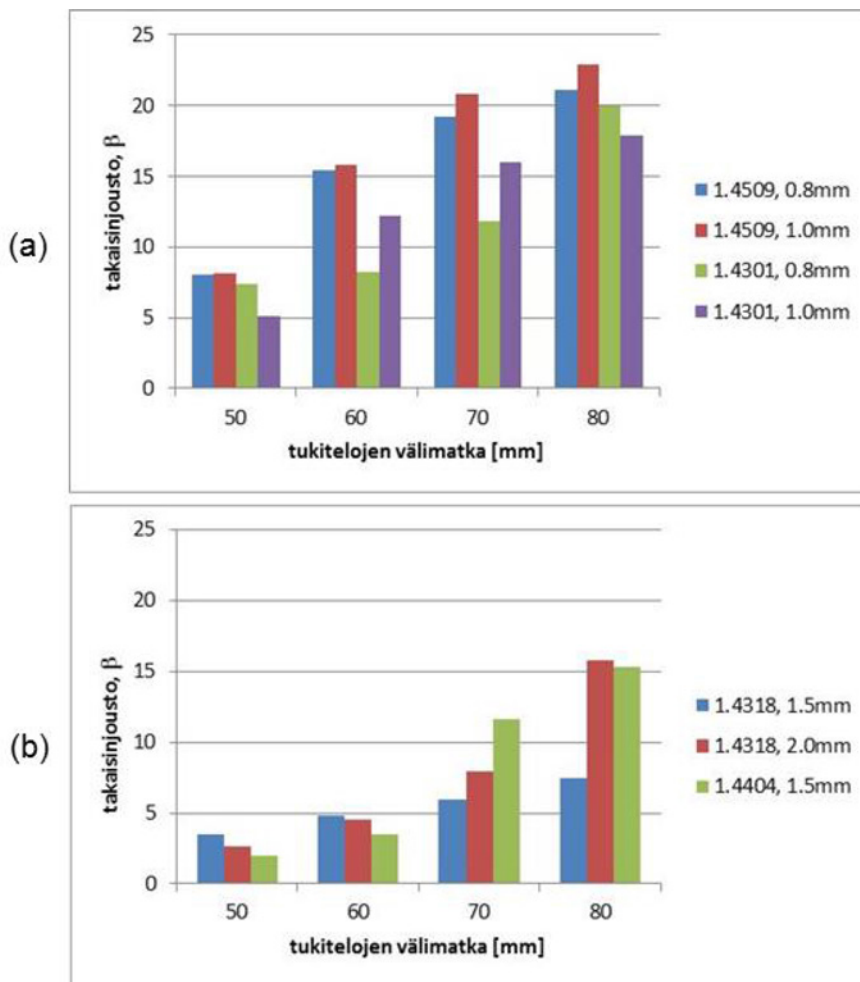
**Kuva 4.3.2** Tukitelojen välimatkan l vaikutus takaisinjousto on eri materiaaleilla.

Kuvan 4.3.2 datasta johdetut lineaariset regressiomallit on annettu taulukossa 4.3.2. Sen mukaan EN 1.4509 näytteillä takaisinjousto ei juurikaan riipu näytepaksuudesta ja hajonta on siis pientä. Tämän osoittaa mallin hyvä korrelaatiokerroin ( $R^2 = 92\%$ ), EN 1.4404 hyvä korrelaatiokerroin johtuu siitä, että ao. teräksen näytteet olivat samanpaksuisia ( $a = 1.5\text{mm}$ ). Sen sijaan austeniittisten EN 1.4301 ja EN 1.4318 terästen tapauksessa paksuuden vaihtelu aiheuttaa hajontaa takaisinjoustoissa.

**Taulukko 4.3.2** Takaisinjousto regressiomallit,  $\beta = f(l)$ .

näyte	$y = f(x)$	$R^2$
EN 1.4509	$0.461x - 13.557$	0.92
EN 1.4301	$0.335x - 9.5125$	0.58
EN 1.4318	$0.280x - 11.647$	0.65
EN 1.4404	$0.481x - 23.159$	0.94

Erot takaisinjousto määrässä näkyvät selvemmin kuvasta 4.3.3. Sen mukaan tukitelojen välimatkan kasvaminen suurentaa takaisinjousto ja suurin se on ferriittisellä EN 1.4509 –teräksellä. Tämä johtuu todennäköisesti osaksi siitä, että paksuus vaikuttaa voimakkaasti takaisinjousto suuruuteen. Kuten edellä todettiin, paksuuden kasvu pienentää takaisinjousto. /7/



**Kuva 4.3.3** Takaisinjousto a) 1.4509 ja 1.4301 –teräkset; b) 1.4318 ja 1.4404 –teräkset.

#### 4.4 TAIVUTUSNOPEUDEN VAIKUTUS MAKSIMIVOIMAAN

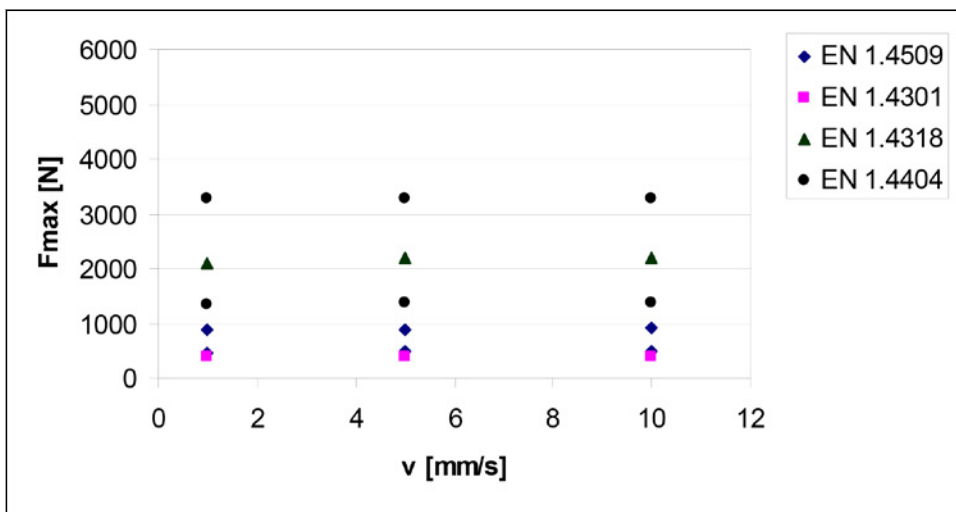
Taivutusnopeuden vaikutusta maksimivoimaan ja takaisinjoustoön testattiin siis vaihtelemalla ylätyökalan iskunopeutta. Nopeudelle  $v$  käytettiin kolme arvoa: 1 mm/s, 5 mm/s ja 10 mm/s.

Taulukossa 4.4.1 on annettu testin välittömät mittaustulokset sekä lasketut takaisinjouston arvo. Taivutuksen maksimivoima vaihtelee välillä 390...3290N ja takaisinjoustokulmavälillä  $-10...13^\circ$ . Miinusmerkkinen takaisinjousto merkitsee sitä, että taivutuskulma on ylittänyt tavoitellun  $90^\circ$  kulman.

**Taulukko 4.4.1** Toisen koesarjan välittömät mittaustulokset ja niiden perusteella laskettu  $\beta$ :narvo.

Laatu	s [mm]	v (mm/s)	l [mm]	Fmax [N]	$\alpha_{\text{mitattu}}$	$\beta$
EN 1.4509	0.8	1	50	475	96	5.62
EN 1.4509	0.8	5	50	479	93	3.15
EN 1.4509	0.8	10	50	483	93	2.9
EN 1.4509	1.0	1	50	890	103	12.78
EN 1.4509	1.0	5	50	889	100	9.7
EN 1.4509	1.0	10	50	927	95	5.25
EN 1.4301	0.8	1	50	390	95	5.32
EN 1.4301	0.8	5	50	403	93	3.25
EN 1.4301	0.8	10	50	402	89	-0.55
EN 1.4318	1.5	1	50	2110	93	2.52
EN 1.4318	1.5	5	50	2183	89	-0.77
EN 1.4318	1.5	10	50	2186	85	-4.52
EN 1.4404	1.5	1	50	1328	91	1.37
EN 1.4404	1.5	5	50	1373	87	-2.77
EN 1.4404	1.5	10	50	1383	80	-9.73
EN 1.4404	2.0	1	50	3290	90	0.12
EN 1.4404	2.0	5	50	3286	86	-3.55
EN 1.4404	2.0	10	50	3272	80	-9.73

Kuvassa 4.4.1 on esitetty taivutusnopeuden vaikutus maksimivoimaan (Fmax) eri teräksillä. Siitä nähdään, että taivutusnopeudella ei ole vaikutusta ao. parametriin. Paksuuden vaikutus (EN 1.4509 ja EN 1.4404) on yhdenmukainen aiemmin esitettyjen tulosten kanssa.

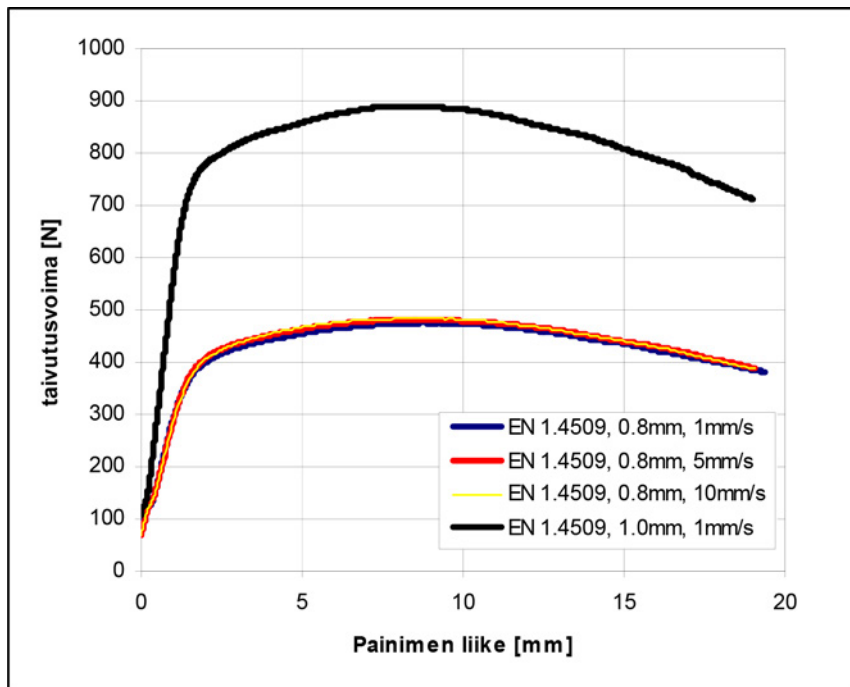


**Kuva 4.4.1** Taivutusnopeuden (v) vaikutus maksimivoimaan (Fmax) koeteräksillä.

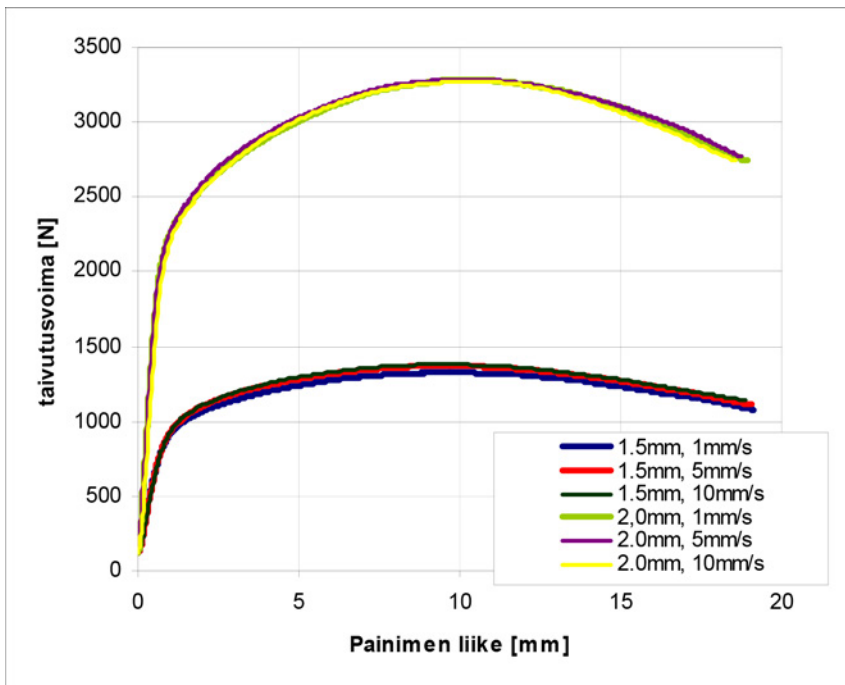
Vielä selkeämmin tämä on nähtävissä kuvissa 4.4.2 ja 4.4.3.

Kuvassa 4.4.2 on esitetty EN 1.4509 teräksen taivutustesteistä mitatut taivutusvoima – painimen liike ( $F - \delta$ ) käyrät. Kuvan käyrien mukaan painimen liikenopeudella ei ole mitään vaikutusta  $a = 0.8$  mm paksun materiaalin taipumiseen tarvittavaan voimaan. Sen sijaan näytepaksuuden kasvaessa  $a = 1.0$  mm:iin tarvitaan selvästi lisää voimaa saman painimen liikkeen ( $f$ ) eli näytteen taipuman aikaansaamiseksi.

Sama on nähtävissä kuvasta 4.4.3, jossa on esitetty teräksen EN 1.4404  $F - f$ -käyrät. Paksuuden vaikutus on selkeä ja painimen liikenopeudella ei ole mitään vaikutusta kummallakaan näytepaksuudella ( $a = 1.5$  tai  $2.0$  mm).



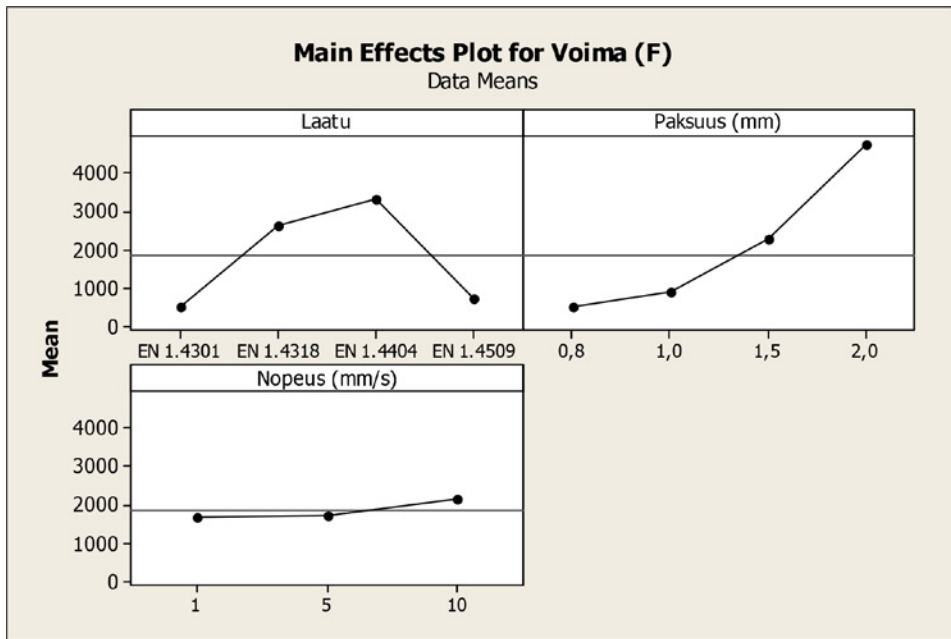
**Kuva 4.4.2** EN 1.4509 teräksen taivutusvoima – taivutustuurnan liike ( $F - f$ ) -käyriä.



**Kuva 4.4.3** EN 1.4404 teräksen taivutusvoima – taivutustuurnan liike (F - f) –käyriä.

#### 4.5 TILASTOLLINEN JATKOKÄSITTELY

Testeistä saadut tulokset syötettiin myös tällä kertaa Minitab™15 -ohjelmistoon, josta saatiin kuvan 4.5.1 mukainen eroavaisuuksien yhteisvaikutustarkastelu. Kuvasta nähdään kuinka suuri vaikutus laadulla, paksuudella ja painimen nopeudella on vaadittavaan taivutusvoimaan. Tämä sama asia on todettu niin ikään jo aikaisemmin taulukossa 4.1.1. Sen sijaan tarkasteltavan painimen nopeudella ei näyttäisi olevan kovinkaan suurta merkitystä vetokoneen käyttämään maksimivoiman tarpeeseen. Erot ovat hyvin pieniä tarkastelun alaisilla nopeuksilla.



**Kuva 4.5.1** Tärkeimpien muuttujien vaikutus voiman tarpeeseen.



# 5 Yhteenvedo

Tässä raportissa on tarkasteltu vapaataivutukseen perustuvan metallisten materiaalien taivutustestin SFS-EN ISO 7438 soveltuvuutta ruostumattomien terästen särmättävyyden tutkimiseen.

Tutkimukset tehtiin TEKES/EAKR –rahoitteisessa Jalosärämä –projektissa syksyllä 2009.

Tehdyissä kokeissa selvisi, että standardin mukainen koejärjestely oli mahdoton toteuttaa tukitelojen liian pitkän välimatkan takia. Kokeissa käytettiin tukitelojen välisenä etäisyytenä  $l = 50, 60, 70$  ja  $80\text{ mm}$ . Standardin mukainen etäisyys  $l$  olisi ollut  $12 \dots 17\text{ mm}$ .

Koejärjestely soveltui kuitenkin hyvin vapaataivutuksen testaamiseen. Tulosten perusteella taivutuksessa eniten voimaa tarvitsi EN 1.4318 tyyppinen teräs.

Taivutusvoiman riippuvuus tukitelojen välimatkasta oli looginen, voiman tarve nousi voimakkaasti välin pienetessä  $80 \rightarrow 50\text{ mm}$ . Testatulla välillä taivutusvoiman riippuvuus välimatkasta  $l$  noudatti kaikilla tutkituilla teräksillä lähes täydellisesti  $y = kx^n$  –tyyppistä funktiota.

Tilastollinen tarkastelu osoitti, että voimakkaimmin voimantarpeeseen vaikutti näytelevyn paksuus, sitten tukitelojen välimatka ja vähiten teräslaatu.

Takaisinjousto oli suurinta ferriittisessä EN 1.4509 ja austeniittisessä EN 1.4301 –teräksissä. Tämä tulos yhteneväinen Ylitolvan työssään tekemien havaintojen kanssa. /7/ Absoluutti takaisinjoustokulman arvot olivat suurempia tässä tutkimuksessa. Tämä johtuu siitä, että Ylitolvan koejärjestelyt perustuivat pohjaaniskutaivutukseen, jossa takaisinjousto on pienempää. /3/ Paksuilla EN 1.4404 ja 1.4318 –näytteillä ( $a = 1.5$  ja  $2.0\text{ mm}$ ) takaisinjousto oli pienintä. Tämä vastaa Ylitolvan työssä havaittua paksuusriippuvuutta. /7/

Taivutusnopeudella ei ollut vaikutusta taivutukseen vaadittavaan voimaan. Tosin tarkasteltu muodonmuutosnopeusväli oli pieni ( $1, 5$  ja  $10\text{ mm/s}$ ).

# 6 Lähteet

- /1/ What is Stainless Steel?, web -julkaisu, Euro-Inox, 2013, <URL>; [http://www.euro-inox.org/pdf/map/What\\_is\\_Stainless\\_Steel\\_FI.pdf](http://www.euro-inox.org/pdf/map/What_is_Stainless_Steel_FI.pdf), 6 s.
- /2/ Leiviskä, Anu, Lujien terästen särmäys, Diplomityö, Oulun yliopisto, 2006
- /3/ Jussila, Henna-Riitta, Austeniittisen ruostumattoman teräksen takaisinjousto, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2006
- /4/ Mäki-Mantila, Jani, Ohutlevyjen taivutus ja muovaus, Metalliteollisuuden keskusliitto, tekninen tiedotus, 11/01, Metalliteollisuuden kustannus Oy Helsinki, 2001,
- /5/ ”Ruostumattomat teräokset. Osa 2: Yleiseen käyttöön tarkoitettut korroosionkestävät levyt ja nauhat. Tekniset toimitusehdot. SFS-EN 10088-2, kansallinen standardi, 2005, 63 s.
- /6/ SFS-käsikirja 52-1, Suomen standardisoimisliitto SFS ry, teräs aineenkoetusstandardit osa 1 veto-, isku- ja taivutuskokeet 2005.
- /7/ Ylitolva M., 2009, ”Tutkimus ruostumattomien EN 1.4301 ja EN 1.4509 teräosten särmättävyydestä”, Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu, opinnäytetyö, 67 s.



Tässä raportissa esitetään tulokset tutkimuksesta, jossa selvitettiin Zwick - Roell Allround Floor 250kN vetokoneella tehtävän taivutustestin soveltuvuutta särmättävyyden tutkimiseen. Työssä käytettiin vetokoneen kolmipistetaivutustestiin tarkoitettuja työkaluja ja SFS-EN ISO 7438 standardiin perustuvaa metallisten materiaalien taivutustestiä. Tavoitteena oli tutkia ferriittisten ja austeniittisten ruostumattomien terästen särmättävyyttä ja selvittää mahdollisia eroavaisuuksia. Taivutustestejä tehtiin yhdelle ferriittiselle EN 1.4509 ja kolmelle austeniittiselle EN 1.4301, EN 1.4318 ja EN 1.4404 ruostumattomalle teräkselle. Tutkimus tehtiin osana Jalosärämä -projektia. Projektin rahoittajana toimi TEKES ja Euroopan aluekehitysrahasto (EAKR).