

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
LUT-Metalli
BK10A0400 Kandidaatintyö ja seminaari

KYLMÄMUOVATUN NURKAN JÄÄNNÖSJÄNNITYSTEN MANIPULOINTI
THE MANIPULATION OF RESIDUAL STRESS IN A COLD FORMED CORNER

Lappeenrannassa 27.1.2010
Minna Salkinoja

SISÄLLYS

JOHDANTO	1
1 TEORIA	1
1.1 Jäännösjännitysten synty	1
1.2 Kylmämuovatusputken valmistus	3
1.3 Sinkitys.....	5
2 KOEJÄRJESTELYT	6
3 FE-ANALYYSI.....	8
3.1 Mallinnus.....	8
3.2 FE-analyysin tulokset.....	9
4 KOKEEN TULOKSET.....	18
5 TULOSTEN TARKASTELUA	20
6 SINKITYKSEN TULOKSET	22
7 JOHTOPÄÄTÖKSET.....	22
LÄHTEET.....	23
LIITTEET	

SYMBOLILUETTELO

\max	= suurin havaittu arvo
\min	= pienin havaittu arvo
δ	= siirtymä
F	= voima
σ	= nimellinen jännitys
R_p	= materiaalin myötöraja
R_m	= materiaalin murtoraja
d	= koekappaleen diagonaalin suuntainen pituus
r	= koekappaleen sisäpyöristyssäde
σ_y	= materiaalin myötöraja
M_p	= palkin plastinen momentti

.

JOHDANTO

Tämä kandidaatintyö on tehty Lappeenrannan teknilliselle yliopistolle. Työn tavoitteena oli tutkia kylmämuovatusnurkan jäännösjännitysten manipuloimista.

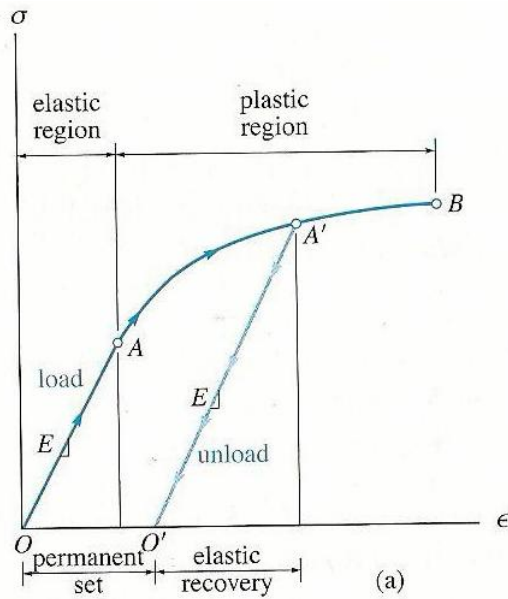
Kylmämuokkauksessa rakenteeseen syntyy jäännösjännityksiä. Kylmämuovatusnurkan sisänurkkiin syntyy vetojäännösjännityksiä, joilla on haitallisia vaikutuksia muun muassa rakenteen väsymis- ja sinkitysominaisuuksiin. Tässä kokeessa tutkittiin jäännösjännitysten muokkaamista ja jäännösjännityksen vaikutusta sinkityksen lopputulokseen. Kokeilla pyrittiin saamaan rakenneputken kahteen nurkkaan jäännösjännityksiksi puristusta alkuperäisen vedon sijaan. Koekappaleista mitattiin ennen koetta ja kokeen jälkeen jäännösjännitykset röntgendiffraktiolaitteella. Lujuusteknisten kokeiden jälkeen koekappaleet toimitettiin sinkitykseen neljälle eri sinkitysajalle. Lujuustekniset kokeet suoritettiin Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa, Teknillisessä tiedekunnassa, LUT-Metallissa, Teräsrakenteiden laboratoriossa.

Kokeiden lisäksi kappaleesta tehtiin FE-analyysi käyttäen Ansys-ohjelmaa.

1 TEORIA

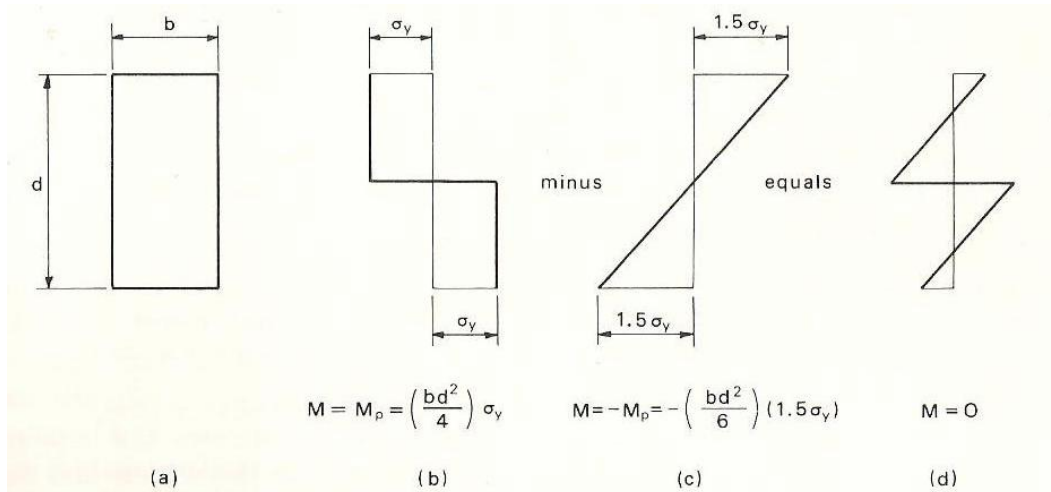
1.1 Jäännösjännitysten synty

Kun sitkeää materiaalia, kuten terästä, kuormitetaan myötörajan yli, se plastisoituu. Kun kuormitus poistetaan, kimmoinen venymä palautuu ja jäljelle jää plastinen venymä. Tämä on esitetty kuvassa 1. Jäljelle jäävää jännitystä kutsutaan jäännösjännitykseksi. (Hibbeler 2005, s. 95)



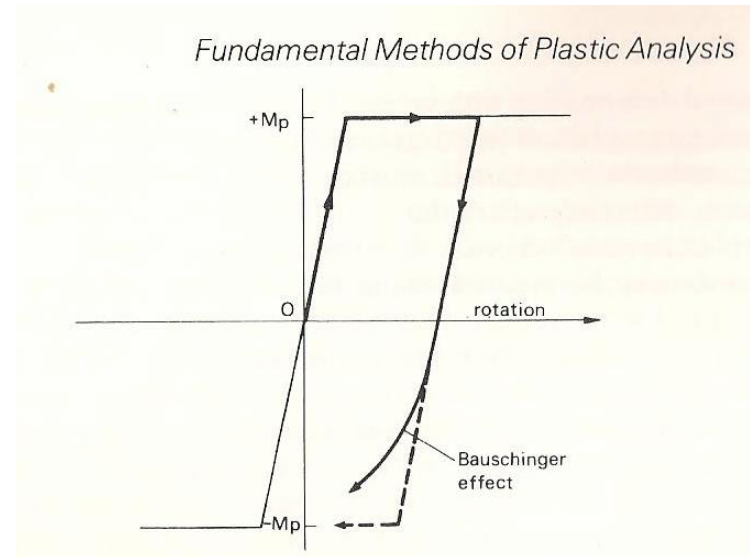
Kuva 1. Jännösvenymän synty. Kun materiaalia kuormitetaan myötörajan, pisteen A, yli pisteeseen A' ja kuorma vapautetaan, elastinen venymä palautuu pisteeseen O' ja jäljelle jää plastinen venymä. (Hibbeler 2005, s. 95)

Tarkastellaan esimerkkinä taivutuspalkkia. Palkkia taivutetaan momentilla, joka saa koko palkin plastisoitumaan. Tämän jälkeen momentti poistetaan ja kimmainen venymä pääsee palautumaan, mikä aiheuttaa vastakkaisuuntaisen momentin. Jännösjännitys on näitä kahta tilaa vastaavien jännitysten summa. Tämä näkyy kuvassa 2. (Horne et al. 1981, s. 137)



Kuva 2. Kun suorakaideprofiilista palkkia (a) taivutetaan plastisella momentilla M_p (b) ja momentti vapautetaan (c), jäljelle jää jännösjännitys (d). (Horne et al. 1981, s. 137)

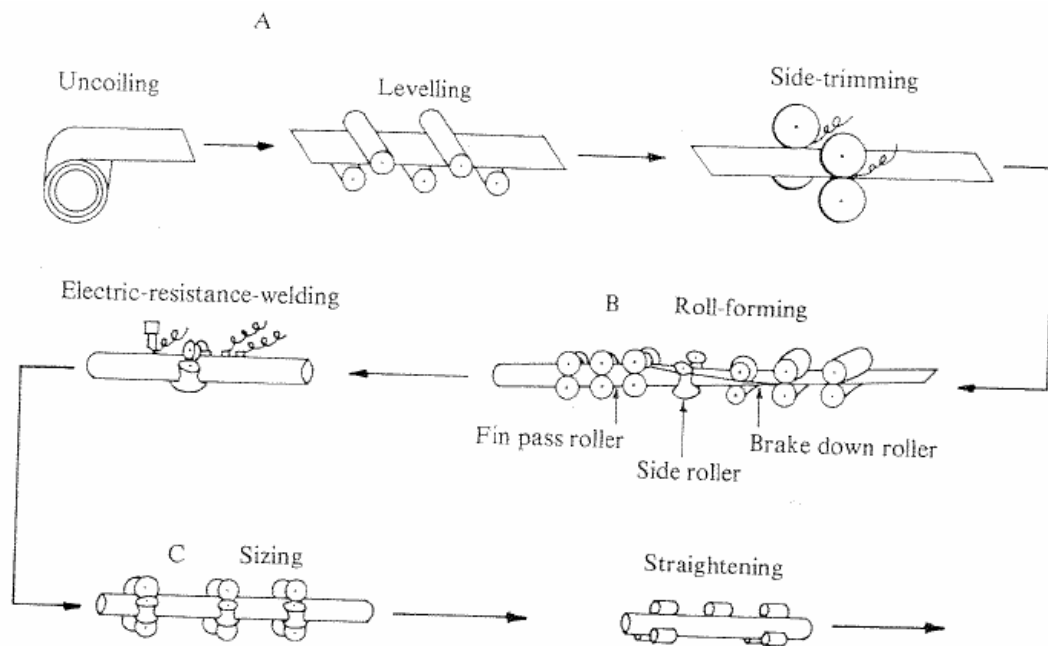
Mikäli rakenne kuormitetaan uudelleen alkuperäiseen suuntaan vastakkaisella momentilla, materiaali voi myötää vastakkaiseen suuntaan hieman aiemmin, mitä materiaalimalli ilmaisee. Tätä ilmiötä kutsutaan Bauschinger-efektiksi, joka on esitetty kuvassa 3. (Horne et al. 1981, s. 52-53) Tämä tarkoittaa sitä, että momentin suunnan muuttuessa, materiaali voi myötää toisella kuormituksella aiemmin.



Kuva 3. Bauschinger-efektin vuoksi materiaali myötää vedon jälkeisellä puristuksella aiemmin, kuin suoraan puristamalla. (Horne et al. 1981, s. 53)

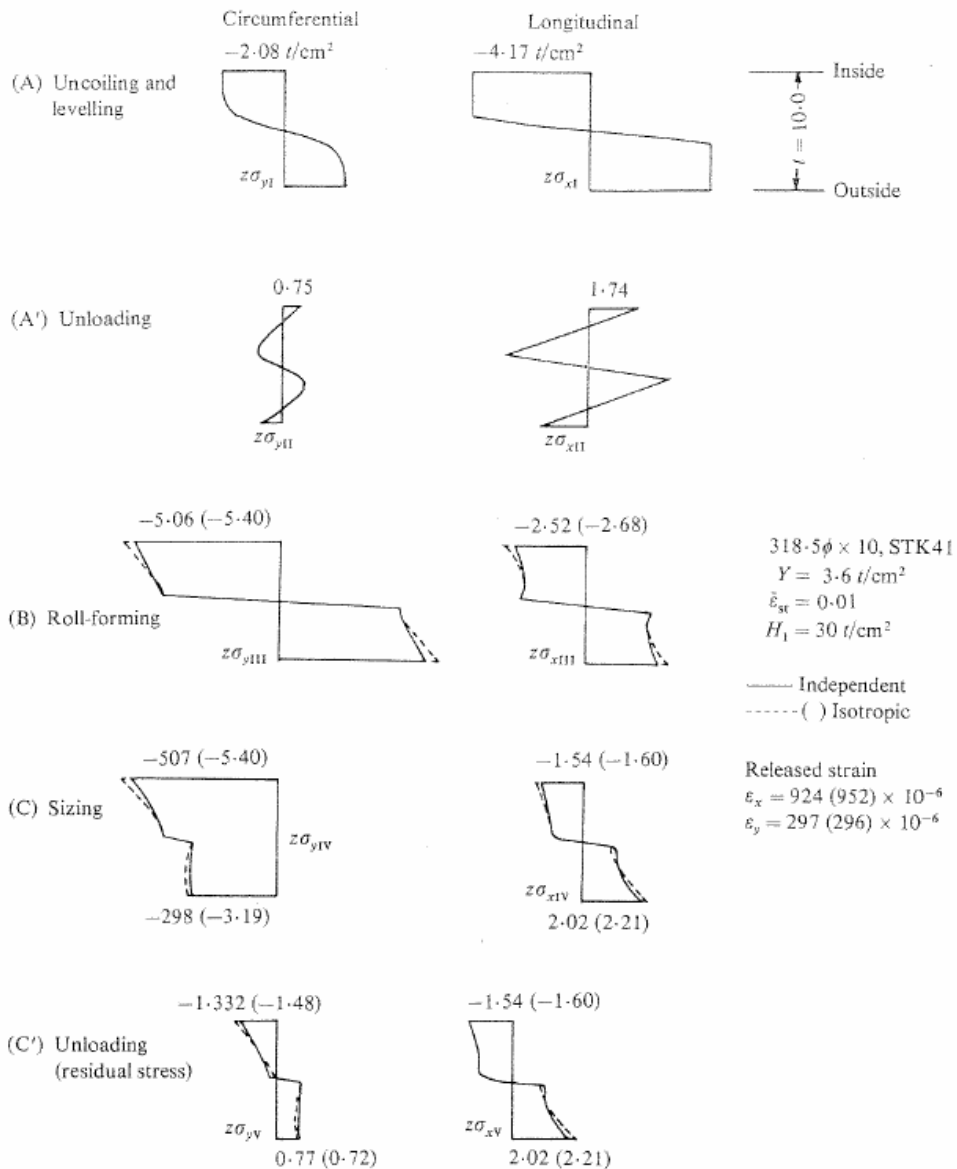
1.2 Kylmämuovatus putken valmistus

Kylmämuovatus putken valmistus on esitetty kuvassa 4. Valmistuksen vaiheet ovat levykelan avaus ja suoristus, muovaus ympyräksi ja lopullinen muovaaminen mittoihin. Oletetaan, että kun levy on rullattu kelalle, siinä ei ole jäännösjännityksiä ja levy on tasovenymätilassa. Näin ollen suoristuksessa levyyn muodostuu jäännösjännityksiä. Tämän jälkeen levy muovataan pituussuuntaisesti ympyräksi ja levyn reunat hitsataan yhteen. Edelleen tasovenymätilassa olevaan levyyn muodostuu sekä plastisia että elastisia venymiä, jotka eivät pääse purkautumaan. Lopuksi putkea puristetaan radiaalisuunnassa oikean koon saavuttamiseksi. Kun putki on kulkenut prosessin läpi, siihen ei kohdistu enää radiaalista kuormitusta ja elastinen venymä pääsee purkautumaan. Putkeen jää kuitenkin plastinen venymä ja jäännösjännitys. (Kato et al. 1978, s.192)



Kuva 4. Kylmämuovatus putken valmistuksen vaiheet. Levykelan avaus ja suoristus (A), rullaaminen ympyräksi ja hitsaus (B) ja lopullinen muovaaminen mittoihin (C). (Kato et al. 1978, s.193)

Kuvassa 5 on kylmämuovatus putken jännitysten kehittyminen muovauksen aikana. Huomataan, että jännitykset muuttuvat paljon prosessin aikana. (Kato et al. 1978, s. 191)



Kuva 5. Kylmämuovatus putken jännitysten kehittyminen muovauksen aikana tangentiaali- ja pituussuunnassa. (Kato et al. 1978, s. 201)

Kylmämuovattu RHS-rakenneputki valmistetaan pyöreästä putkesta kylmämuovaamalla. Näin ollen siihen syntyvät jännitykset ovat vielä vaikeammalla määrittää.

1.3 Sinkitys

Teräsrakenneteollisuudessa kuumasinkitys on yleisesti käytetty menetelmä korroosiolta suojaamiseksi. Sinkityksessä esiintyy usein virheitä, joilla voi joissain tapauksissa olla vakavia seurauksia. Joskus virheet ovat helposti havaittavissa, kuten makrosäröt, jolloin vaurioitunutta rakennetta ei oteta käyttöön. Toisinaan särö jää huomaamatta ja valmiilla rakenteella on suuri

riski vaurioitua väsymällä tai pahemmassa tapauksessa hauraasti. (Zgraggen et al. 2005, s. 184-185)

Vedyn ja metallin, esimerkiksi teräksen, vuorovaikutus voi aiheuttaa muutoksia metallin ominaisuuksissa. Tällaisia muutoksia voivat olla esimerkiksi lujuuden väheneminen tai säröjen syntyminen. Vetyä voi päästä metalliin ulkopuolelta esimerkiksi teräksen tuotannossa tai käsittelyssä, kuten peittauksessa tai hitsauksessa. Vety voi absorboitua teräkseen vain atomaarisessa muodossa. Vety hakeutuu metallissa hilavikoihin, raerajoihin ja sisävikoihin. Atomaarinen vety menee ei-metallisiin sulkemiin, joissa vety muodostaa molekyyli-rakenteita. Tällöin vedyn tilantarve kasvaa moninkertaiseksi ja paine metallin sisällä kasvaa, jolloin materiaaliin syntyy halkeama. Ulkoinen veto edesauttaa särönkasvua, mutta se ei ole edellytys särön muodostumiselle. Tällaisen ulkoisen vedon aiheuttaa esimerkiksi kylmämuovaus ja hitsaus. (Katzung et al. 2005, s. 260- 261)

Liquid Metal Embrittlement (LME) eli sulametallihauraus aiheuttaa myös säröjä. Korrodoituneen systeemin myötölujuus laskee ja materiaaliin syntyy säröjä. Sulametallihaurauteen vaikuttaa muun muassa staattinen tai dynaaminen veto, metallisulan koostumus ja kriittisen metalliparin liukoisuus toisiinsa. (Katzung et al. 2005, s. 261)

2 KOEJÄRJESTELYT

Jokaisesta koekappaleesta mitattiin tangentiaalisuuntaiset jäännösännitykset jokaisesta sisänurkasta 100 mm päästä A-päädystä röntgendiffraktio-laitteella. Koekappaleista mitattiin myös lävistäjät ja kulmien pyörityssäteet (LIITE 1).

Puristuskoe suoritettiin kuvan 6 mukaisella laitteistolla. Voimakehän sylinterin päähän kiinnitettiin painin, jossa on ura koekappaleen paikallaan pitämiseksi. Kehän alla olevaan pöytään kiinnitettiin levy, jossa oli samanlainen ura kuin yläpainimessa. Koekappale asetettiin laitteistoon ja sitä litistettiin diagonaalisuunnassa. Kokeesta tallennettiin voima-siirtymä-käyrät. Kolmeen koekappaleeseen liimattiin tangentiaaliset venymäliuskat rakenneputken yhteen sisänurkkaan. Näistä koekappaleista on lisäksi voima-venymä-käyrät.

Kappaleista mitattiin staattisen kokeen jälkeen jäännösjännitykset samasta kohtaa kuin ennen puristusta. Kappaleista, joissa oli venymäliuskat, mitattiin jäännösjännitykset myös vastaavasta kohtaa ulkoreunasta.



Kuva 6. Koejärjestelyt

Taulukossa 1 on esitetty koekappaleiden litistys suunnat ja nurkat, joissa venymäliuskat sijaitsivat. Venymäliuskat liimattiin 80 mm päähän putken A-päästä. Liuskat asetettiin nurkkaan, johon muokkausten jälkeen jää jäännösjännitykseksi puristusta. Kappaleiden puristussuunnat valittiin siten, että nurkkaan, jossa on suurin jäännösjännitys vetoa, pyritään saamaan suurin puristusjännitys.

Taulukko 1. Koekappaleet, venymäliuska, litistysuunnat ja puristusasteet

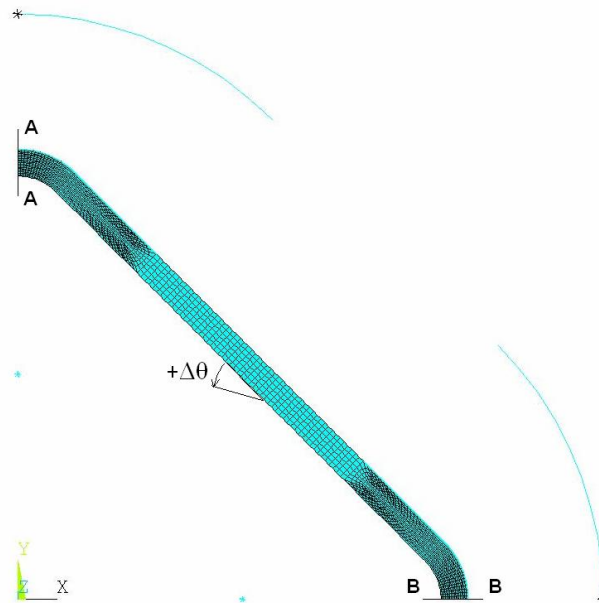
Koekappale	Liuska nurkassa	I litistys	II litistys	Puristus [mm]
P1-A-S550-D1	-	2-4	1-3	10
P1-E-S550-D1	-	1-3	2-4	10
P1-K-S550-D1	-	1-3	2-4	20
P1-Y-S550-D1	-	1-3	2-4	20
P1-A-S550-D2	-	2-4	1-3	20
P2-E-S550-D2	3	2-4	1-3	20
P2-K-S550-D2	1	2-4	1-3	10
P2-Y-S550-D2	2	1-3	2-4	6

3 FE-ANALYYSI

3.1 Mallinnus

Rakennetta tutkittiin myös FE-analyysillä Ansys-ohjelmalla. Litistystä analysoitiin 2D-mallin avulla tasovenymätilassa. Malli on esitetty kuvassa 7. Oikeasta rakenteesta mallinnettiin vain neljäsosa ja mallissa käytettiin symmetriareunaehtoja. Materiaalimalli oli bi-lineaarinen ja materiaaliominaisuuksiksi asetettiin myötörajaksi $R_p = 710$ MPa ja murtorajaksi $R_m = 760$ MPa vastaamaan rakenneputken laipan pituussuuntaisissa vetokokeissa saatuja materiaaliarvoja. Nurkkiin laitettiin 1,2-kertaiset lujuusarvot kuvaamaan muovauksen aiheuttamia muutoksia materiaaliominaisuuksissa. Sisänurkkiin asetettiin 200 MPa suuruinen vetojäännös jännitys jäljittelemään valmistusprosessissa syntyvää jäännös jännitystä. Elementtikokoa pienennettiin nurkkiin laskentatarkkuuden parantamiseksi.

Analyysi toteutettiin epälineaarisenä analyysinä siten, että ensin painettiin ylempi painin joko 5 tai 10 mm profiilin ulkoreunasta alaspäin. Symmetrian vuoksi todellinen painimen kulkema matka on kaksinkertainen. Jatkossa tässä työssä käytetään painimen todellista kulkemaa matkaa. Painin poistettiin ja seuraavaksi painettiin sivulla oleva painin niin pitkälle, että painimen poiston jälkeen malli oli alkuperäisissä mitoissaan.

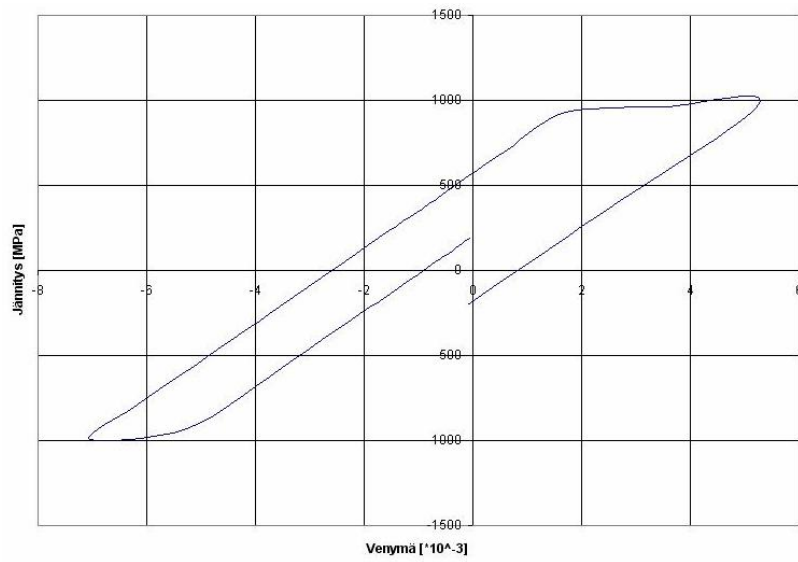
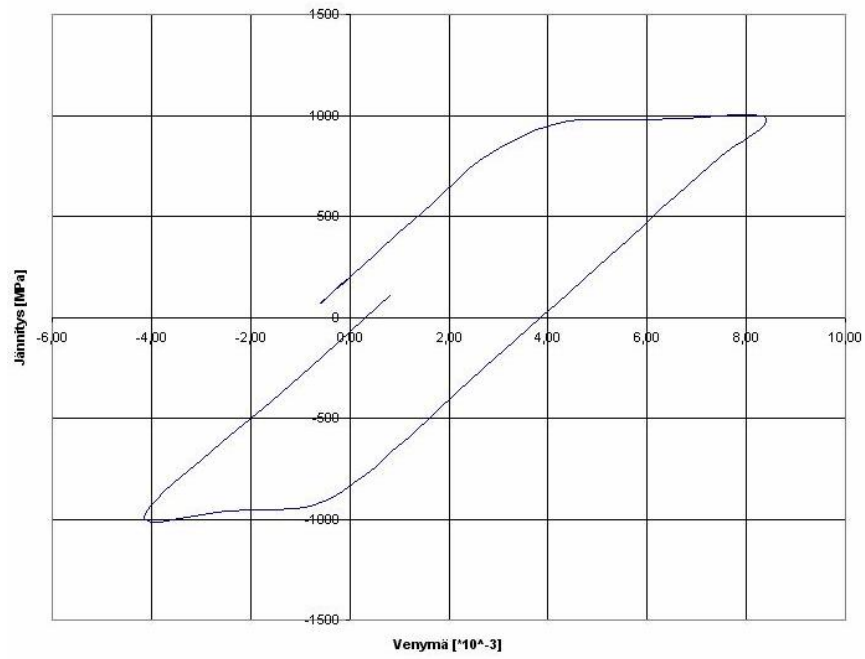


Kuva 7. Käytetty FE-malli

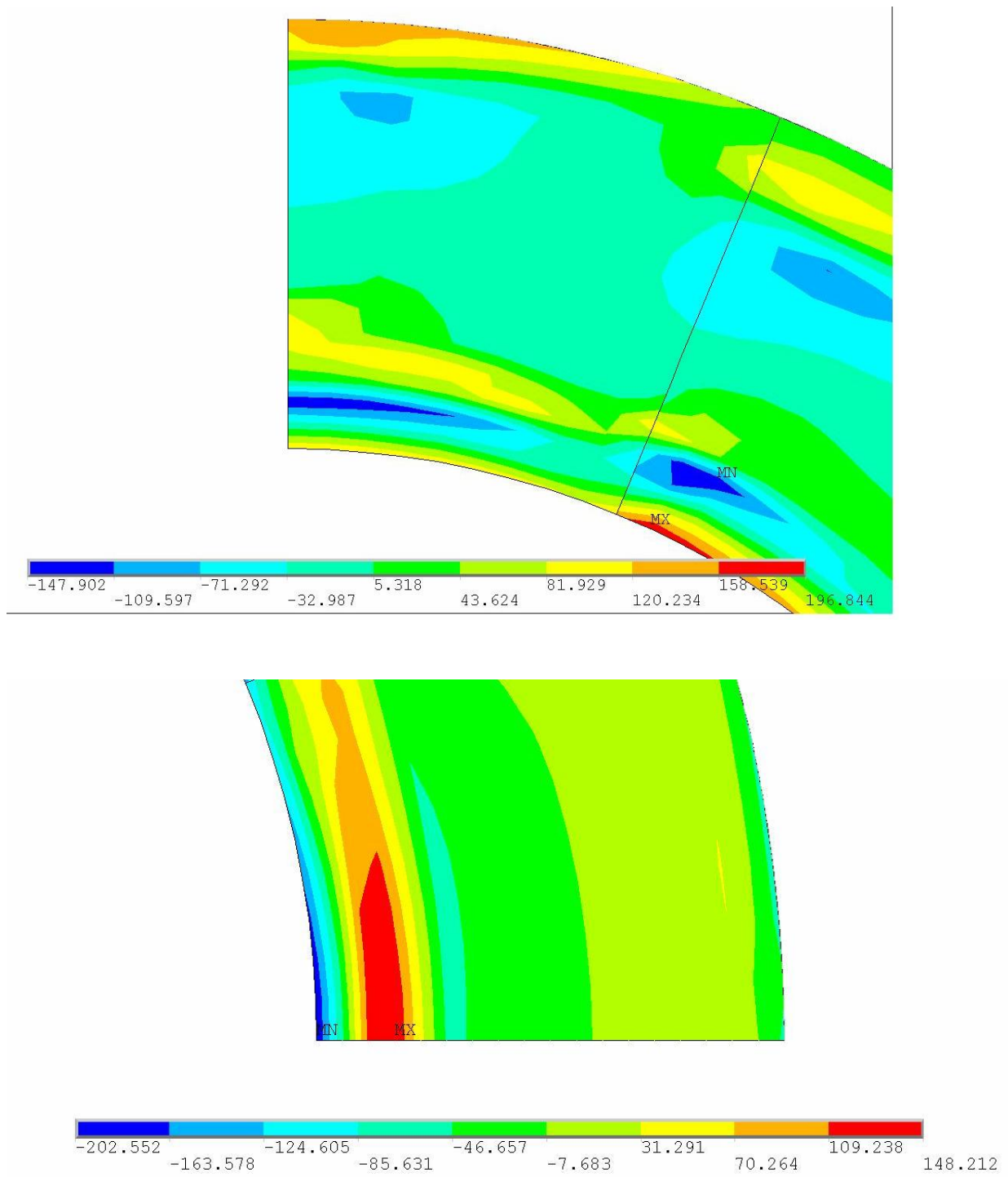
Mallinnuksessa varioitiin useita eri materiaalimalleja. Materiaalin muuttaminen ei vaikuttanut merkittävästi jäännösjännitysten suuruuteen vaan enemmänkin venymien suuruuteen. Lopulliseen materiaalimalliin päädyttiin yritysten ja erehdysten kautta. Vaikka materiaalin nimellinen myötöraja on $R_p = 550$ MPa, todellinen rakenne on huomattavasti tätä lujempaa. Analyysillä pyrittiin saavuttamaan mahdollisimman lähellä todellista rakennetta oleva malli.

3.2 FE-analyysin tulokset

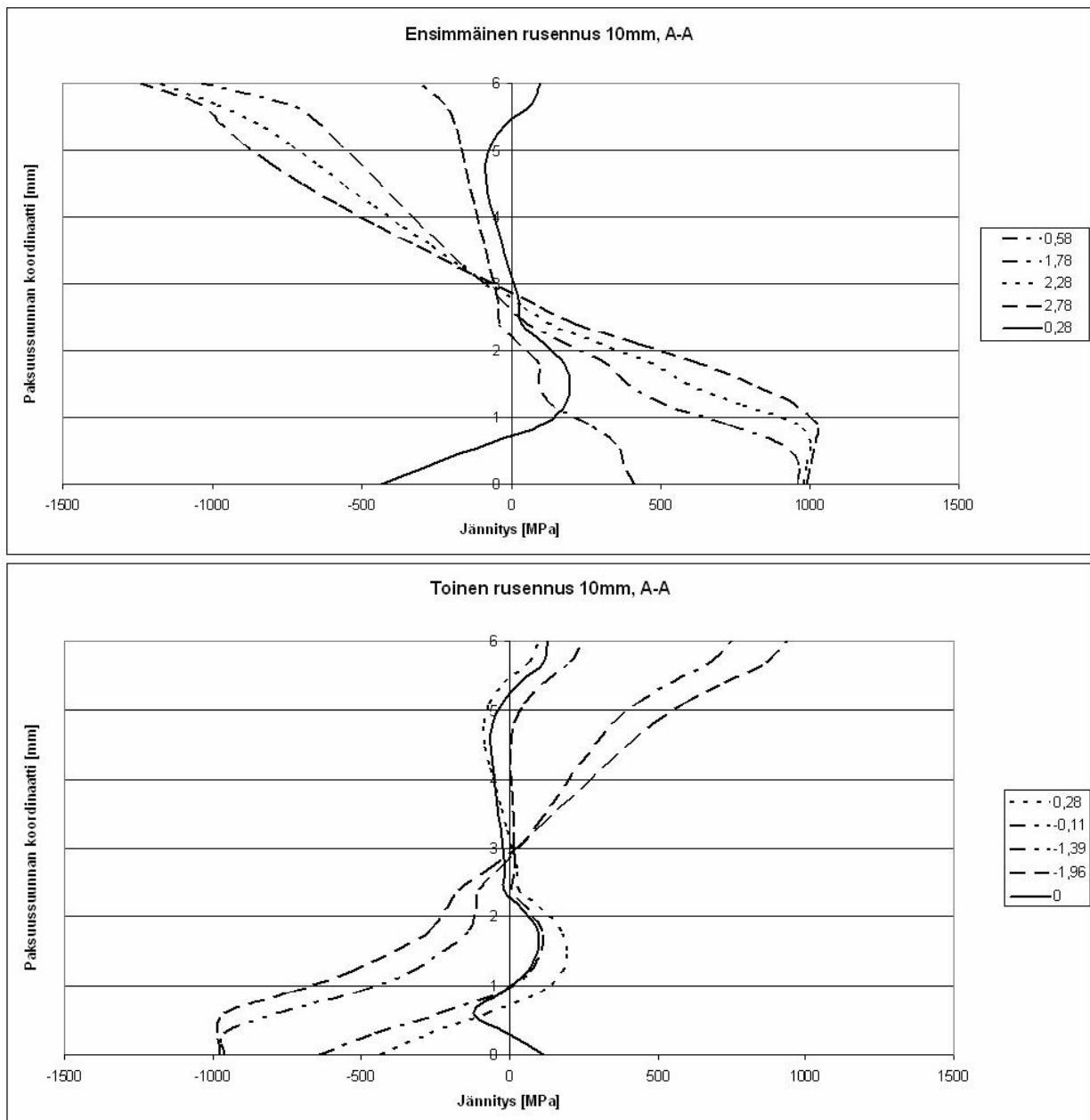
Kuvissa 8 ja 12 on esitetty FE-mallin leikkauksista A-A ja B-B, jännitys-venymä –piirroksia rakenneputken sisänurkasta. Kuvissa 9 ja 13 on jäännösjännitykset molempien litistysten jälkeen. Kuvissa 10 ja 11 sekä 14 ja 15 on esitetty plastisoitumisen kehittyminen kohdissa A-A ja B-B eri kulman muutoksilla $\Delta\theta$ [°] rakenneputken paksuuden yli. Paksuuden koordinaatti 0 tarkoittaa sisäreunaa.



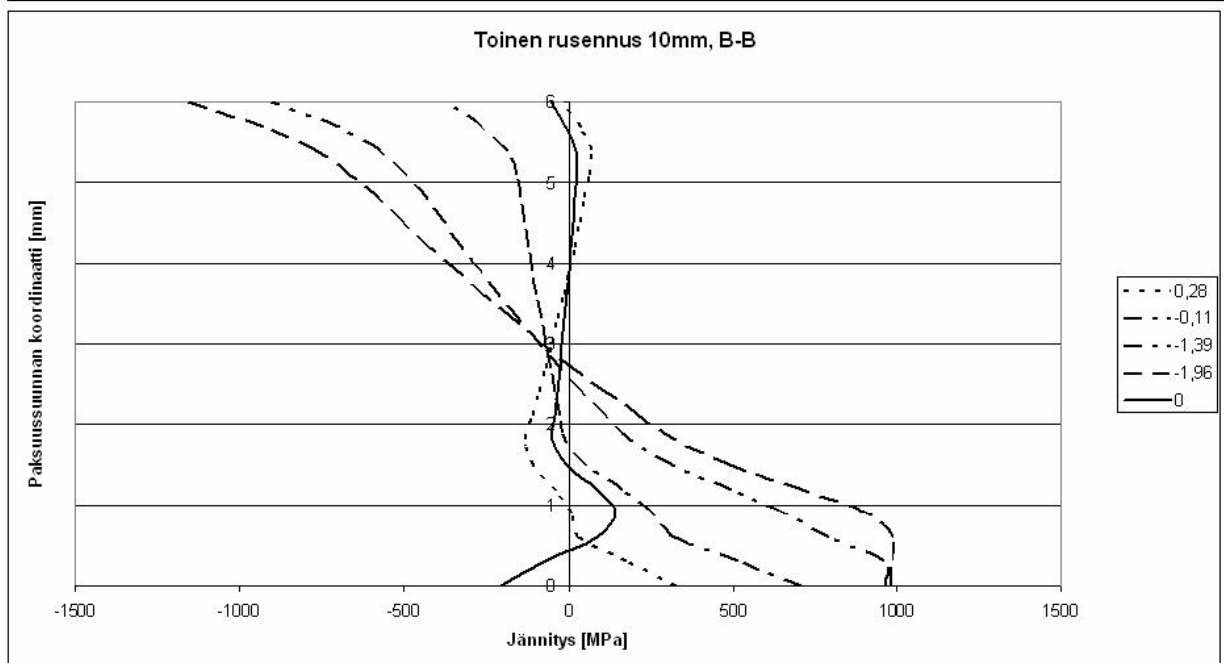
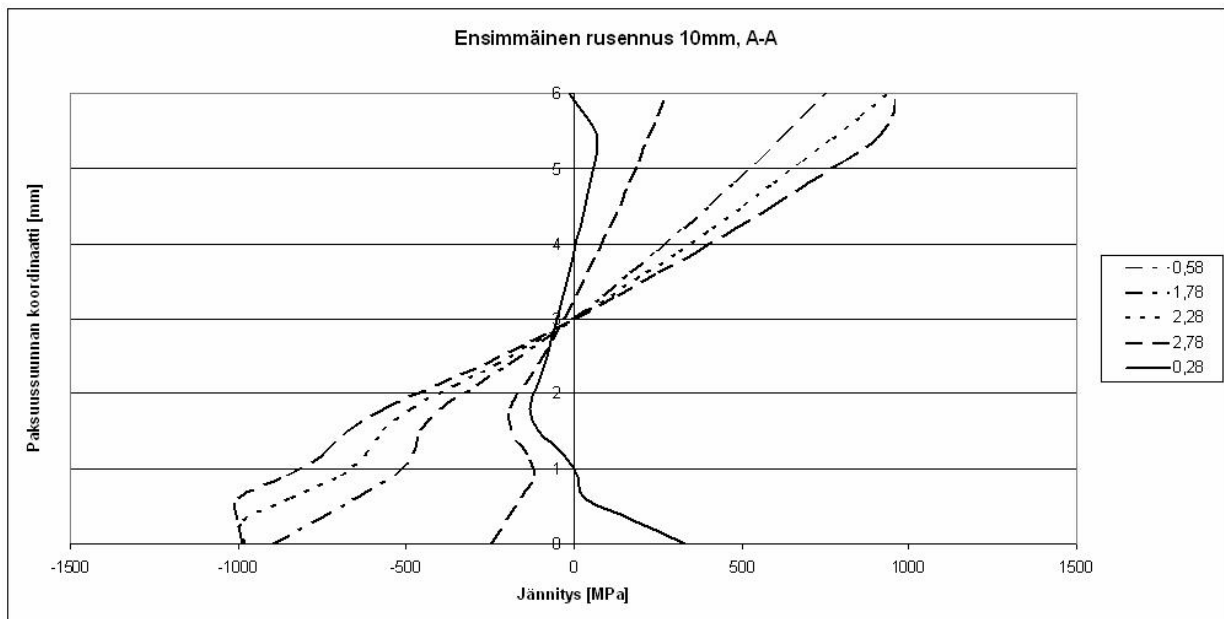
Kuva 8. FE-analyysin mukaiset jännitys-venymä -piirroksat 10 mm litistysmuovauksen jäljiltä.



Kuva 9. FE-analyysin mukaiset jäännösännitykset 10 mm litistystasolla.

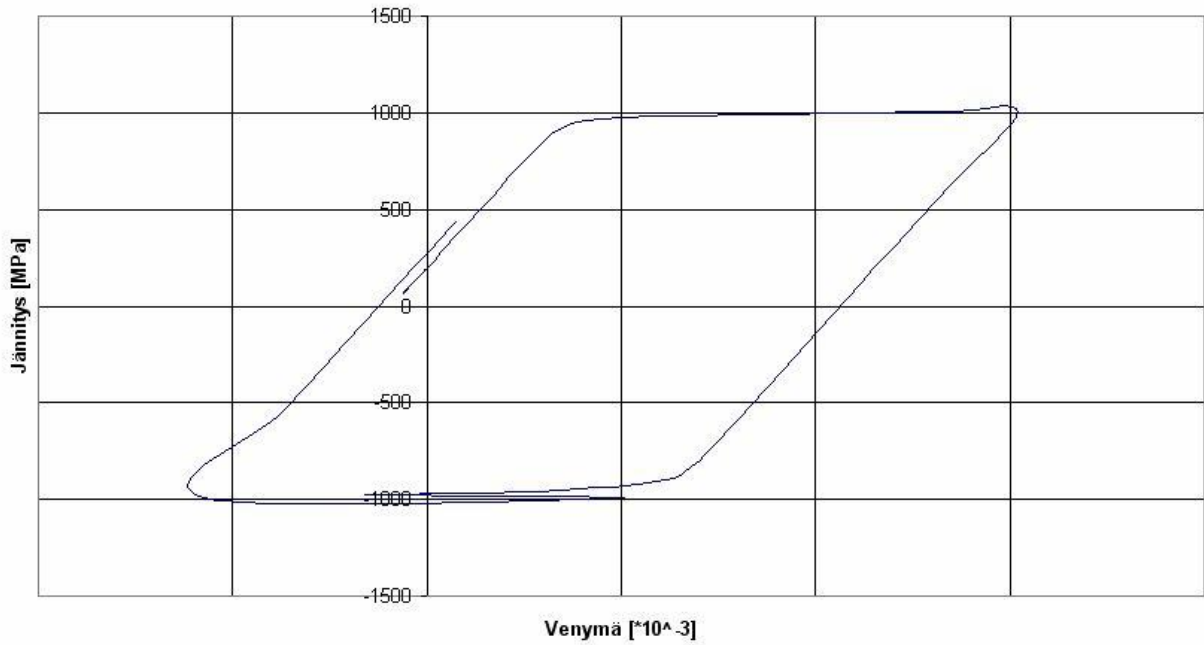


Kuva 10. Plastisoitumisen kehittyminen leikkauksessa A-A, 10mm litistystasolla. Kulman muutos yksikössä [°].

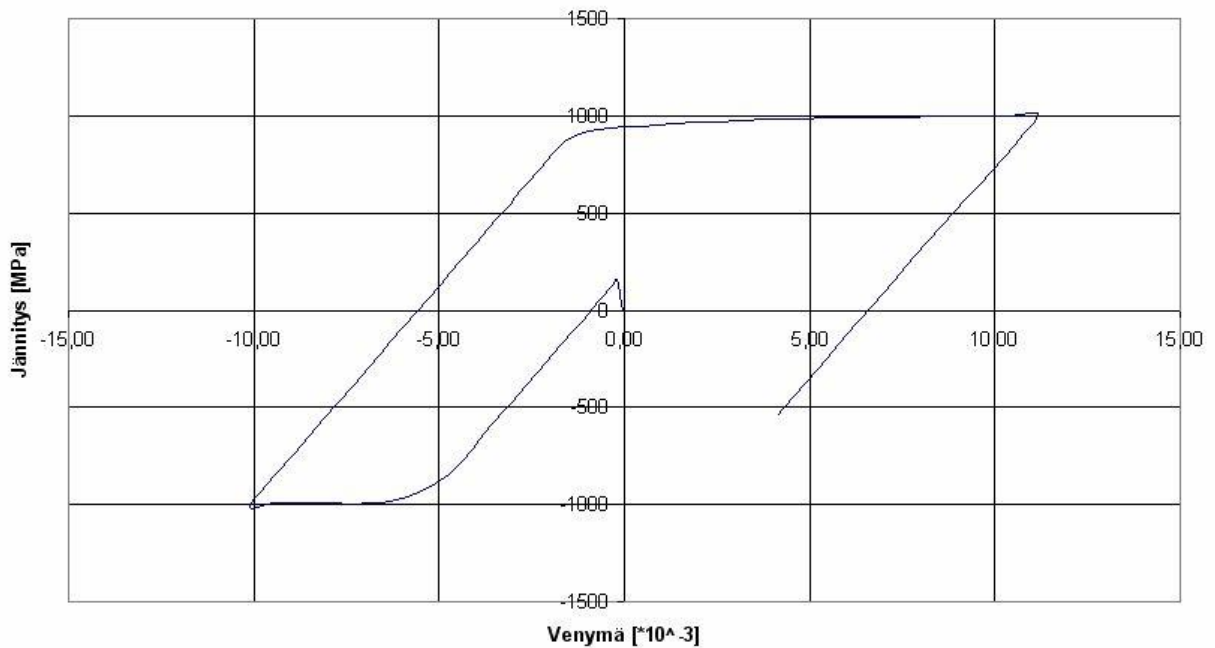


Kuva 11. Plastisoitumisen kehittyminen leikkauksessa B-B, 10 mm litistystasolla.

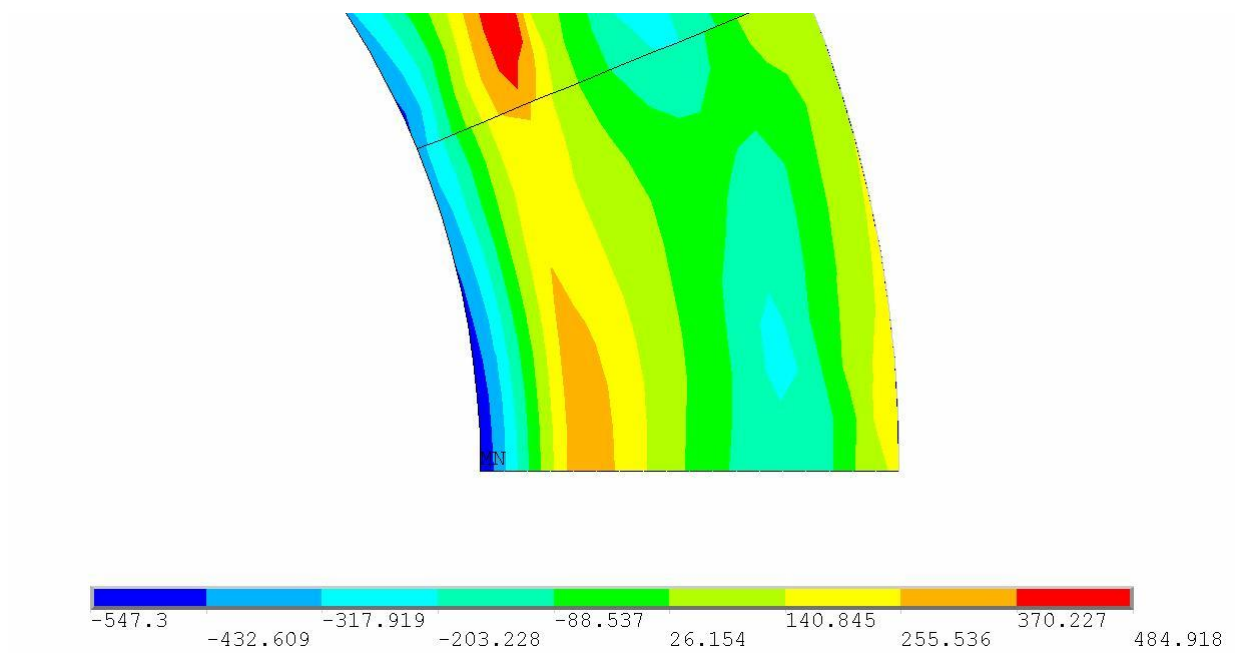
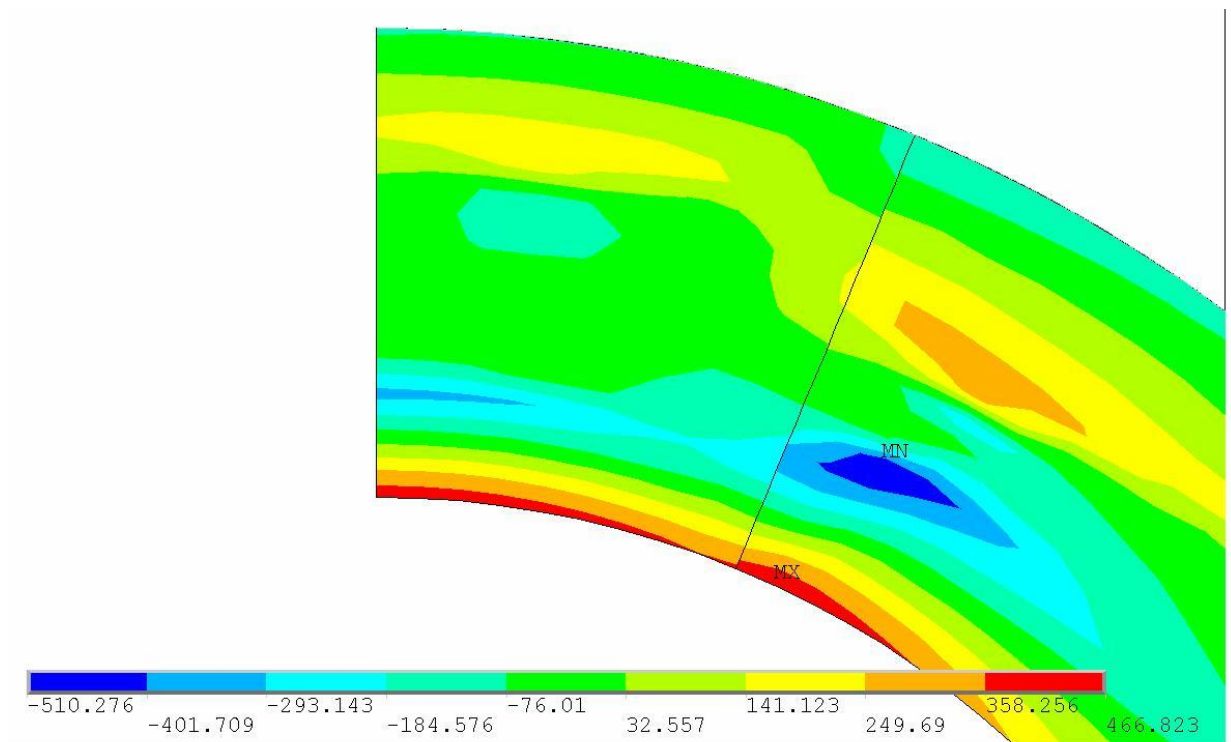
Yläreunassa



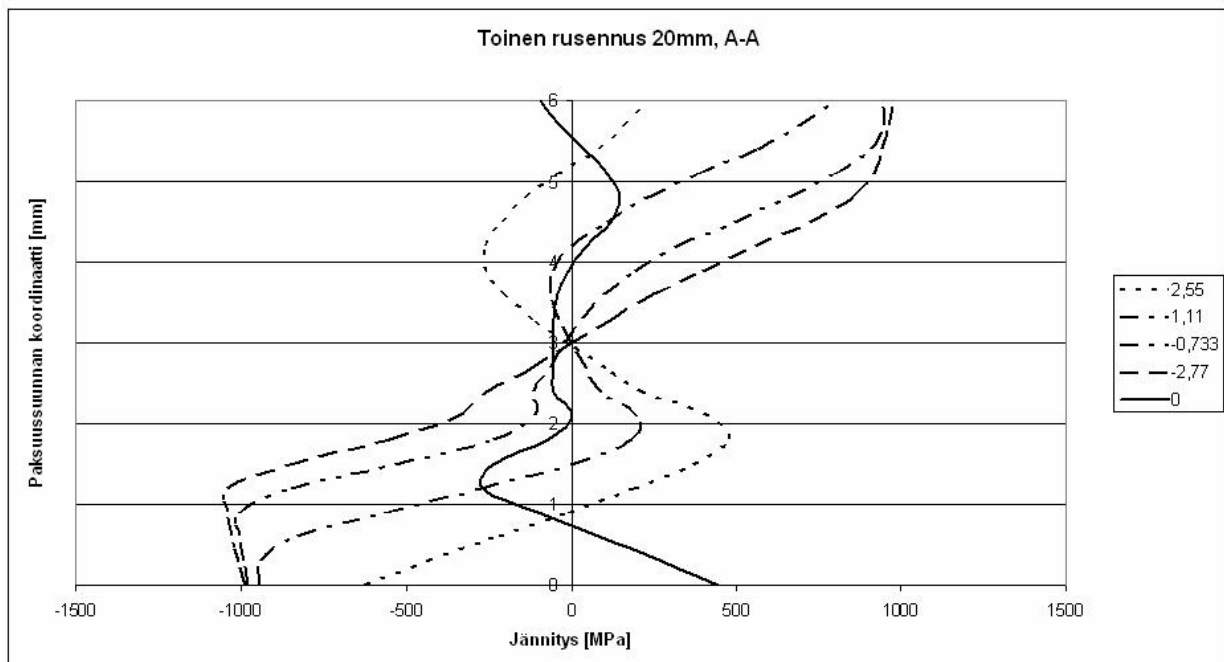
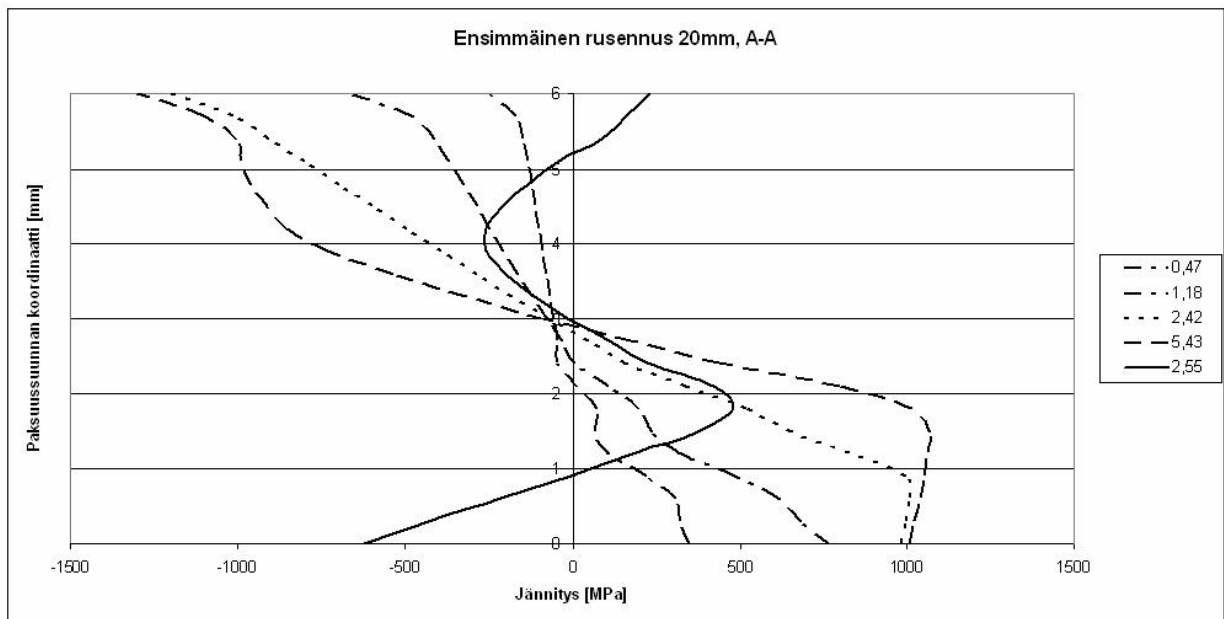
Sivussa



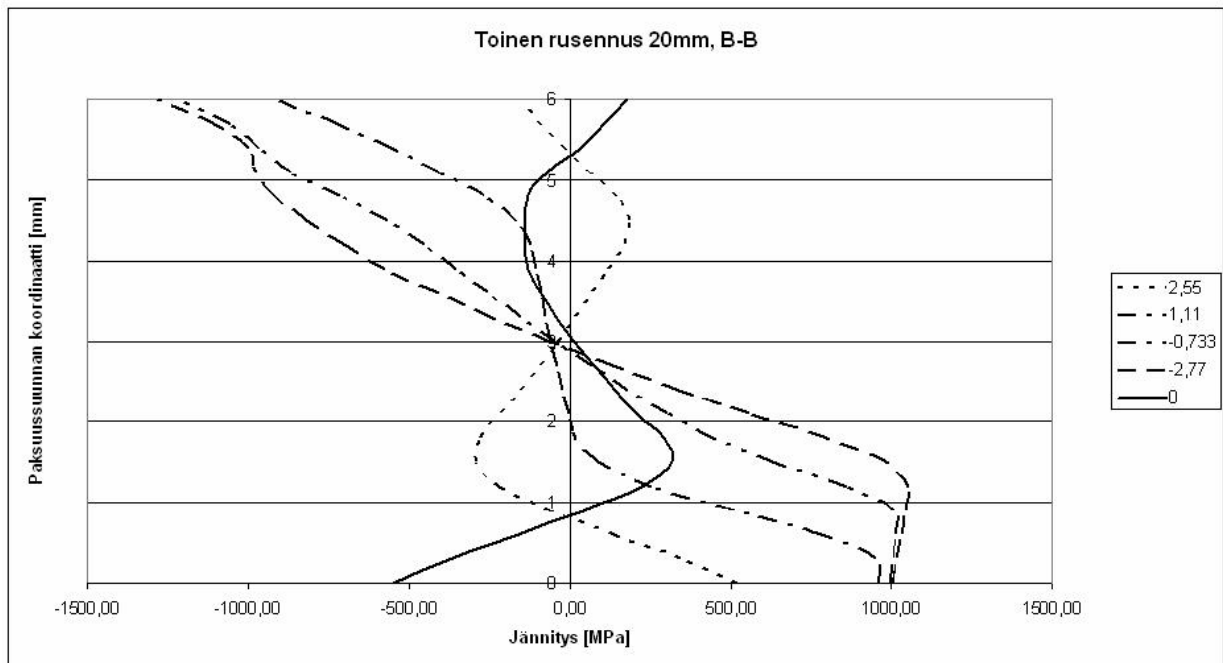
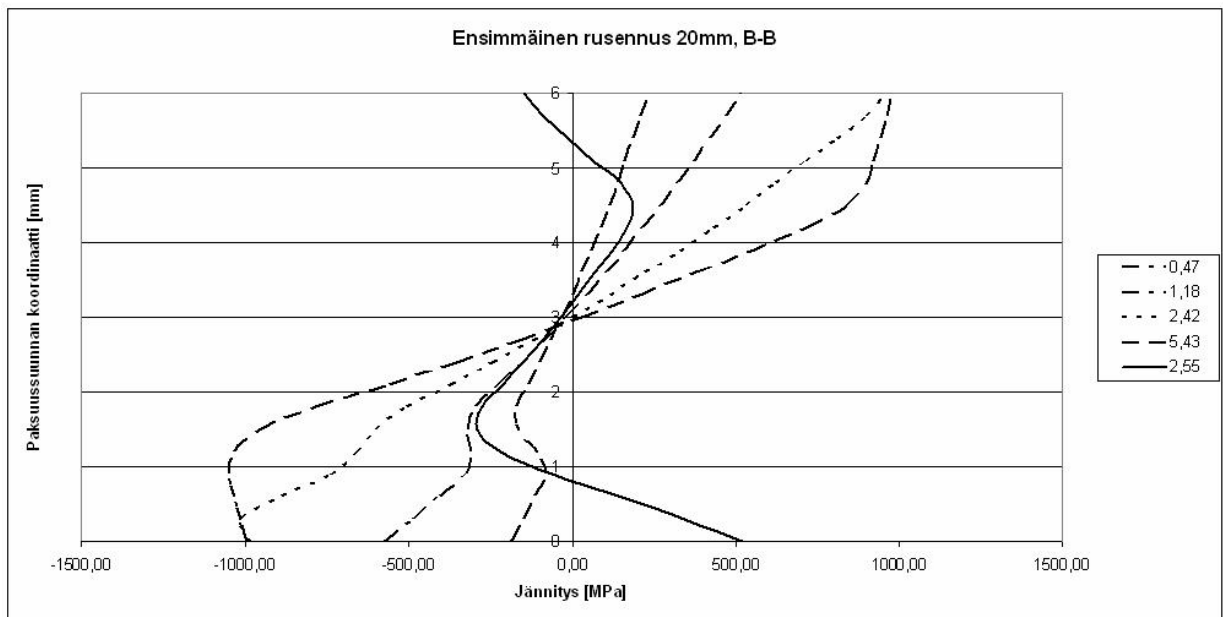
Kuva 12. FE-analyysin mukaiset jännitys-venymä -piirrokset 20 mm litistystasolla.



Kuva 13. FE-analyysin mukaiset jännösjännitykset 20 mm litistystasolla.



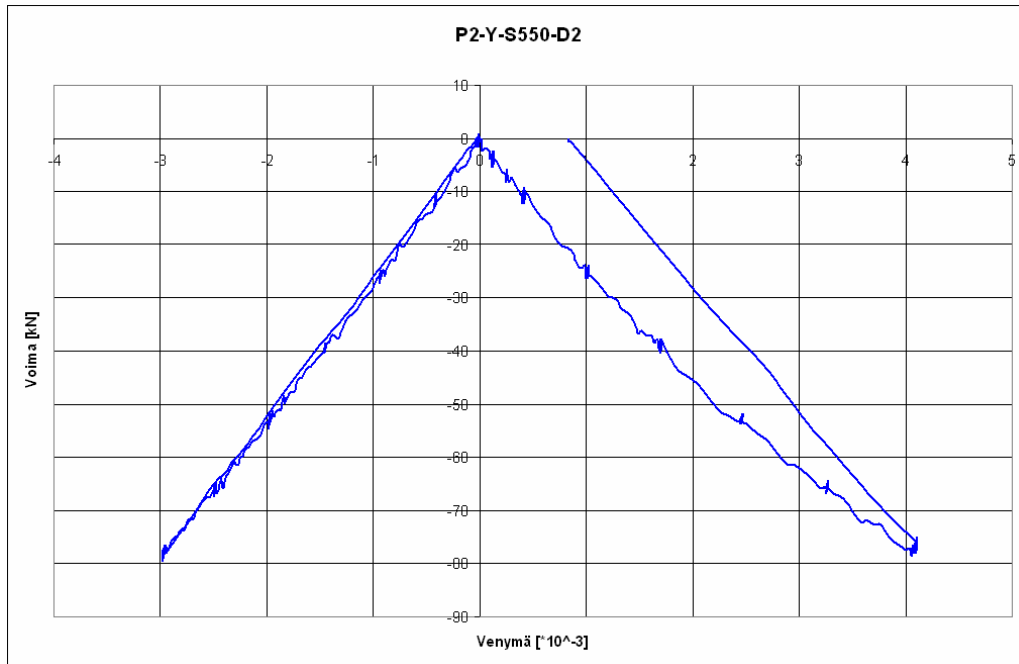
Kuva 14. Plastisoitumisen kehittyminen leikkauksessa A-A, 20 mm litistystasolla.



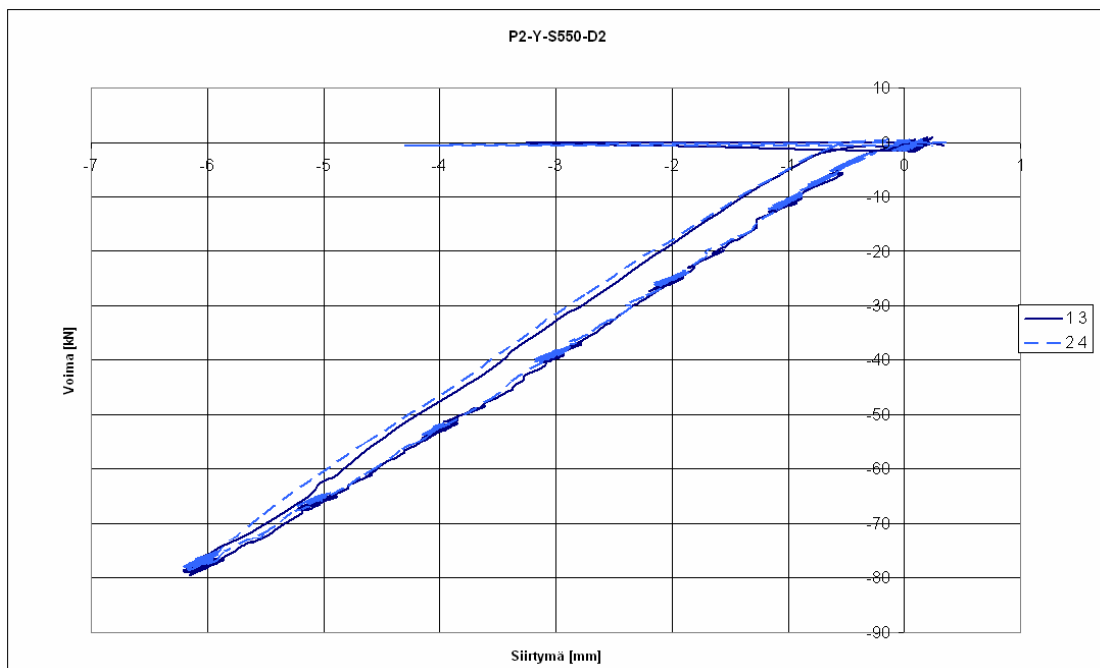
Kuva 15. Plastisoitumisen kehittyminen leikkauksessa B-B, 20 mm litistystasolla.

4 KOKEEN TULOKSET

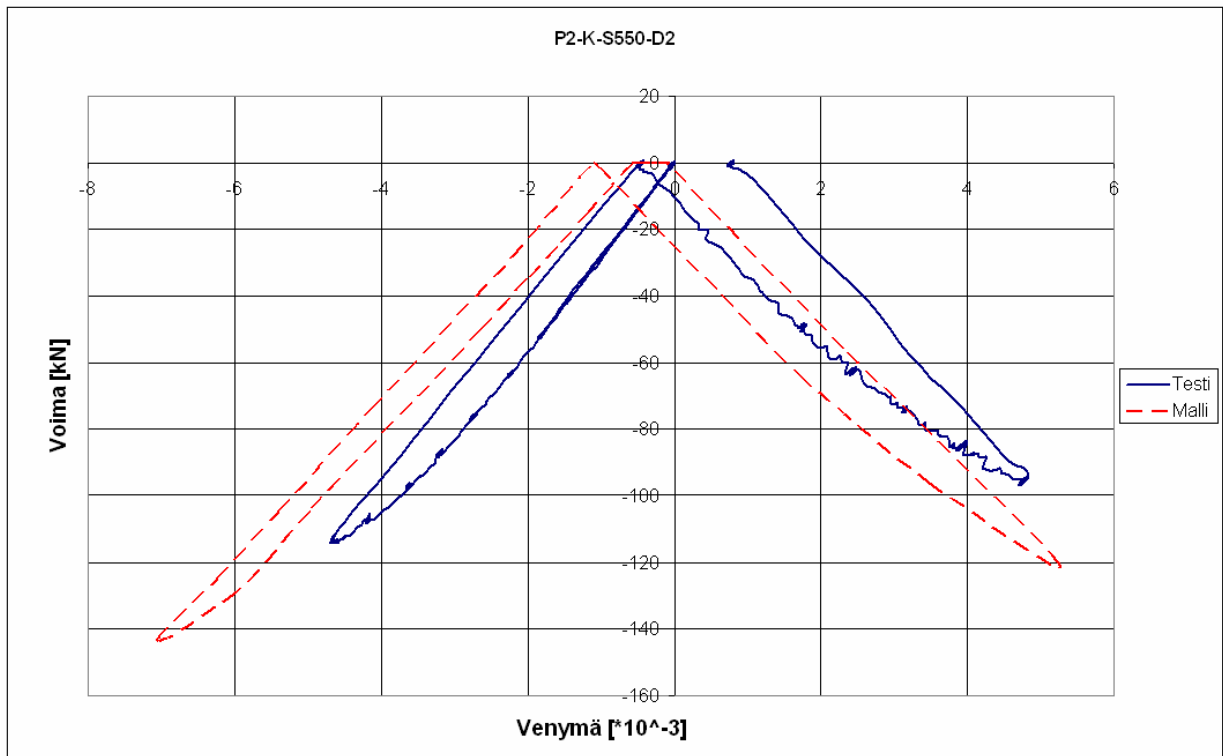
Kuvissa 16-21 on esitetty koekappaleiden P2-E-S550-D2, P2-K-S550-D2 ja P2-Y-S550-D2 voima-venymä sekä voima-siirtymä –piirrokset. Koekappaleiden P2-E-S550-D2 ja P2-K-S550-D2 voima-venymä piirroksessa on lisäksi FE-analyysin tulos. Muiden koekappaleiden voima-siirtymä –piirrokset ovat liitteessä B.



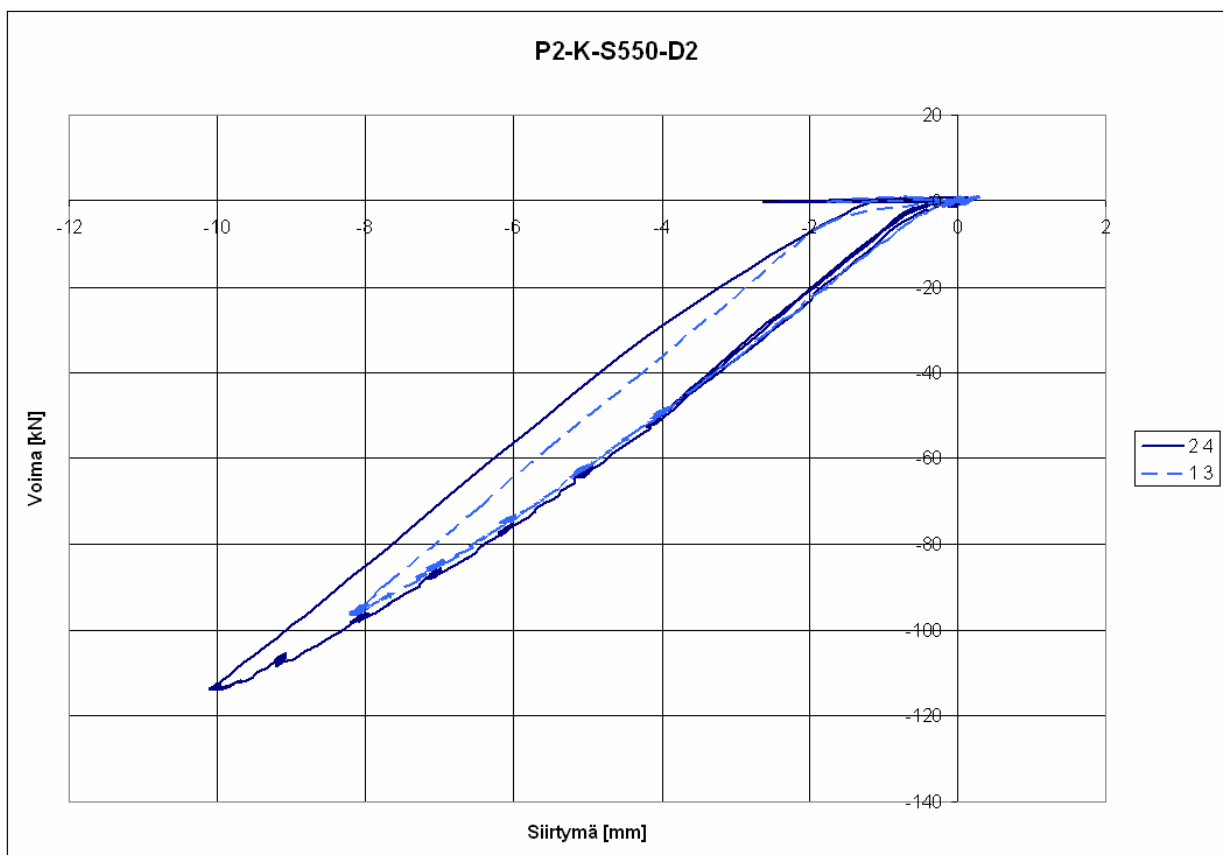
Kuva 16. P2-Y-S550-D2: Voima-venymä –piirros oikeasta rakenteesta 6 mm litistystasolla.



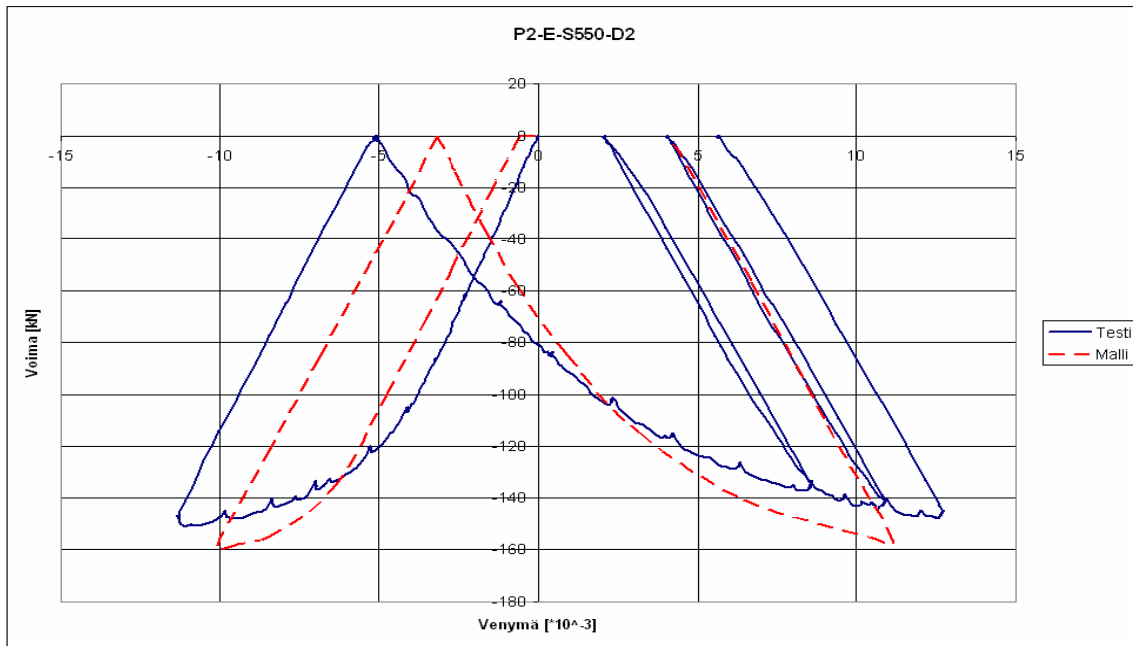
Kuva 17. P2-Y-S550-D2: Voima-siirtymä –piirros oikeasta rakenteesta.



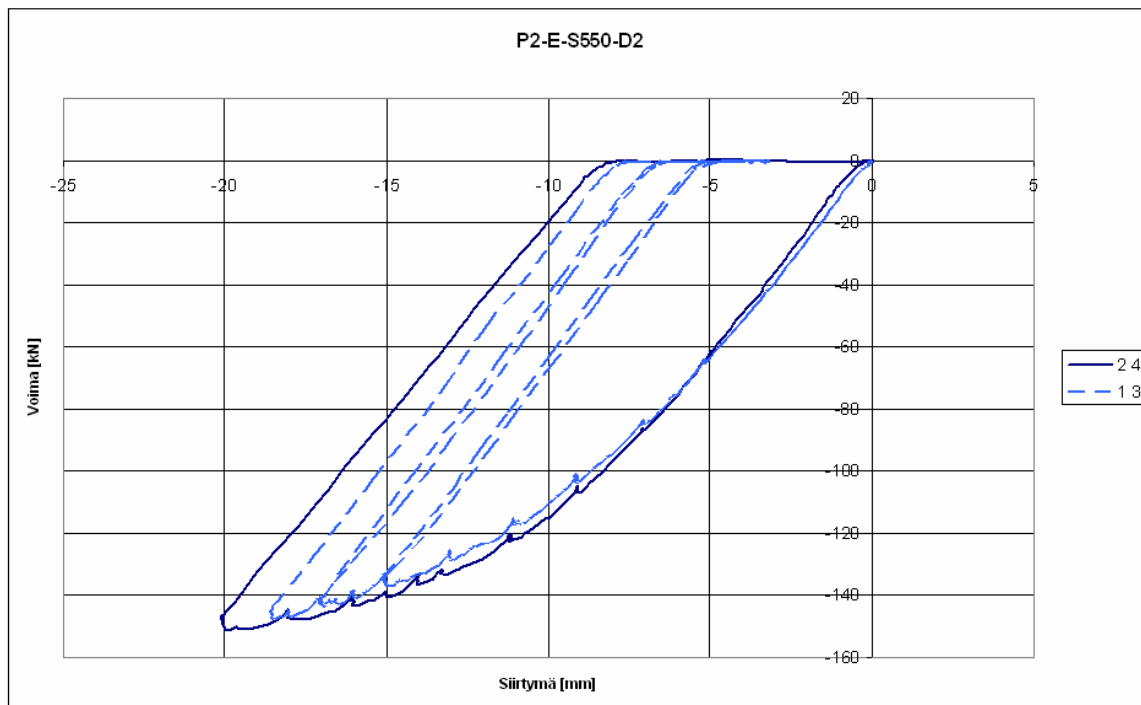
Kuva 18. P2-K-S550-D2: Voima-venymä –piirros oikeasta rakenteesta ja FE-mallista 10 mm litistystasolla.



Kuva 19. P2-K-S550-D2: Voima-siirtymä –piirros oikeasta rakenteesta.



Kuva 20. P2-E-S550-D2: Voima-venymä –piirros oikeasta rakenteesta ja FE-mallista 20 mm litistystasolla.



Kuva 21. P2-E-S550-D2: Voima-siirtymä –piirros oikeasta rakenteesta.

5 TULOSTEN TARKASTELOUA

Kun koekappaleita P2-Y-S550-D2 litistettiin ainoastaan 6 mm, plastisoitumista on havaittavissa vasta toisessa litistyksessä Bauschinger-efektin vuoksi. Tämä nähdään kuvista 16 ja 17. Tämän takia muut koekappaleet litistettiin 10 mm, jotta materiaali myötäisi jo ensimmäisellä

litistyksellä. Kuvista 19 ja 21 nähdään, että rakenne plastisoituu 10 mm ja 20 mm litistystasolla, joten rakenteeseen jää selviä jäännösjännityksiä, kun kuorma poistetaan.

Kuvista 18 ja 20 huomataan, että FE-malli toimi pienemmällä 10 mm litistystasolla todellista rakennetta löysemmin, kun taas suuremmalla 20 mm litistystasolla todellista rakennetta jäykemmin. FE-analyysi antoi huomattavasti mitattua suuremmat jäännösjännitysten arvot. Todellinen rakenne ei muokkautunut yhtä paljon kuin analyysi antaisi olettaa. Ero johtuu materiaalmallista, joka ei vastaa täysin todellista rakennetta. Kun rakennetta kylmämuovataan, materiaalin ominaisuudet muuttuvat. FE-mallia ei saatu vastaamaan todellisia jännityksen arvoja, jotka vaihtelevat eri kohdissa rakennetta. FE-mallissa myötölujuus oli liian alhainen ja toisaalta rakenteessa tapahtui muokkauslujittumista.

Röntgendiffraktiolaitteella mitatut jäännösjännitykset on esitetty liitteessä A. Arvoista huomataan, että kokeessa on onnistuttu muokkaamaan jäännösjännityksiä suotuisimmiksi. Suuremmalla litistystasolla saatiin jäännösjännitysten arvoiksi puristusnurkkiin -215...-266 MPa ja vierekkäisiin nurkkiin vetoa 180...272 MPa. Pienemmällä litistystasolla saatiin -22...-121 MPa puristusta ja 78...149 MPa vetoa. 6 mm litistystasolla vain yksi nurkka jäi -18 MPa puristukselle.

Litistuksen jälkeen erot jäännösjännityksissä tasoittuivat eri kappaleiden välillä. Suuremmalla litistystasolla saatiin selvästi suuremmat jännitysten arvot kuin pienemmällä litistystasolla. Ennen litistystä olevilla jäännösjännityksillä ei ollut suurta merkitystä lopullisiin jäännösjännityksiin vaan alkuperäiset jäännösjännitykset laukesivat litistuksen aikana. Taulukossa 2 on esitetty kolmen venymäliuskallisen koekappaleen ulkonurkkien jäännösjännitykset. Jäännösjännitysten arvot mukailevat hyvin sisänurkkien jäännösjännityksien tuloksia. Myös näistä arvoista huomataan, ettei 6 mm litistystasoa riitä muokkaamaan jäännösjännityksiä haluttuun suuntaan.

Taulukko 2. Jäännösjännitykset ulkonurkissa

Koekappale	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4
P2-E-S550-D2	218	-179	291	-178
P2-K-S550-D2	68	-27	142	-29
P2-Y-S550-D2	18	79	-3	133

6 SINKITYKSEN TULOKSET

Tutkimuksen aikana sinkitysprosessi kehittyi ja säröjä ei saatu syntymään lainkaan rakenneputkien sisänurkkiin. Ennen tutkimusta säröilyä tapahtui vastaavilla koekappaleilla.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Jäännösjännitysten manipulointi onnistui hyvin. Erot eri koekappaleiden jäännösjännitysten välillä pienenevät merkittävästi. FE-analyysin ja koetulosten välillä ei ollut suurta eroa venymissä, mutta FE.-analyysi antoi liian suuria jännitysten arvoja. Tämä ero selittyy materiaalimallilla, jota ei saatu vastaamaan muokkauslujittunutta rakennetta. Valitettavasti eroja eri jäännösjännitysten välillä sinkityksen onnistumiseen ei päästy tarkastelemaan. Kuumasinkitysprosessit paranivat tutkimuksen aikana.

Jatkotutkimuksissa tulisi tarkastella, miten koekappaleiden puristus vaikuttaa rakenteen väsymis- ja muihin ominaisuuksiin. FE-mallia voi parantaa muuttamalla materiaalimallin vastaamaan paremmin todellisia materiaaliominaisuuksia ja jakamalla mallin useampaan osaan, joille annetaan eri materiaaliominaisuudet.

LÄHTEET

Hibbeler, R. C., Mechanics of Materials, 2005, SI conversion by S. C. Fan, SI 2nd Edition, Prentice Hall, Pearson Education South Asia Pte Ltd, 870 s. ISBN 0-13-186-638-9

Horne, M. R. & Morris, L. J., Plastic Design of Low-rise Frames, 1981, 1st Edition, Granada Publishing Limited, 238 s. ISBN 0 246 11199 2

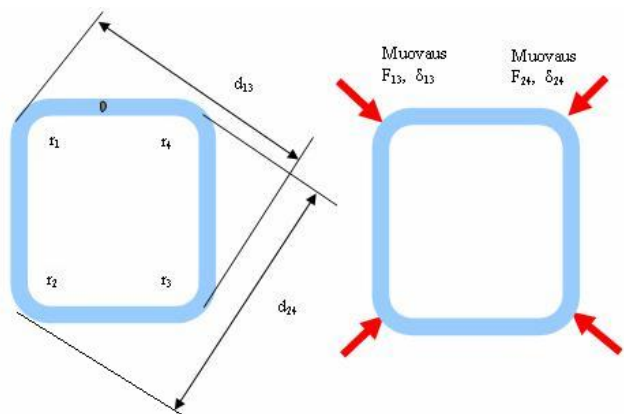
Kato, B. & Aoki, H. 1978. Residual Stresses in Cold-Forming Tubes. Journal of Strain Analysis, 1978. Vol 13, No 4. S. 193 -204.

Katzung W. & Schutz H-D. 2005. Zum Feuerverzinken von Stahlkonstruktionen. Ursache und Lösungsvorschläge zum Problem der Rissbildung. Stahlbau 47, Heft 4, 2005. S. 258- 273.

Zraggen, M. & Winkler, R. & Winkler M. & Germ, H. & Trüllinger S. & Faller, M. & von Trzebiatowski, O. 2006. Schäden im Zusammenhang mit dem Schmelztauchverzinken. Prakt. Metallogr. 2006. 43/4. S. 184 -191.

LIITE 1 Koekappaleiden mitat ja jäännösjännitykset ennen koetta ja kokeen jälkeen.

ID	mittaukset																							toimitus	
	toimitustila											Muovaus I				Muovaus II									
	dimensiot						X-ray					suunta	voima	siirtymä	diagonaali		voima	siirtymä	diagonaali		X-ray				
	nurkat				diagonaali																				
r1	r2	r3	r4	d ₁₃	d ₂₄	σ ₁	σ ₂	σ ₃	σ ₄		F [kN]	δ [mm]	d ₁₃	d ₂₄	F	δ [mm]	d ₁₃	d ₂₄	σ ₁	σ ₂	σ ₃	σ ₄			
P1-0-S550-D0	12,5	12	11	12,5	201,7	202,2	229	180	160	88	-	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	LUT	
P1-A-S550-D1	12,5	12	11,5	13	202,2	201,7	336	112	248	252	2-4	114,7	10	203,5	200,2	112	9	201,8	201,9	-93	149	-121	140	A	
P1-E-S550-D1	13	11	11,5	12,5	201,7	202	44	232	202	292	1-3	115	10	200,2	203,5	99	8,5	201,3	202,4	78	-62	99	-34	E	
P1-K-S550-D1	12,5	12	11,5	12,5	202,1	201,6	80	248	34	184	1-3	148,5	20	194,2	209,2	144	18,5	202	201,7	272	-244	214	-266	K	
P1-Y-S550-D1	12,5	11,5	11	13	202,1	201,6	255	95	-30	54	1-3	147	20	194	209,3	145	18,5	201,8	201,9	193	-242	180	-226	Y	
P1-A-S550-D2	13	12	11,5	12,5	202,1	202	183	222	268	47	2-4	147,5	20	209,3	194,2	145	18,5	201,7	202,1	-215	192	-228	192	A	
P2-E-S550-D2	13	12,5	12	12,5	201,7	202,2	234	296	289	90	2-4	148	20	209,1	194,3	146	18,5	201,5	202,2	-241	239	-259	265	E	
P2-K-S550-D2	13	12,5	12	13	202,3	201,7	291	289	253	161	2-4	113	10	203,3	200,3	95	8	202,3	201,3	-39	101	-22	104	K	
P2-Y-S550-D2	12,5	12	12	13	202,2	201,6	297	258	285	191	1-3	78	6	201,6	202	77	6	202	201,6	193	56	136	-18	Y	



LIITE 2 Voima-siirtymä –piirroksia todellisista rakenteista

