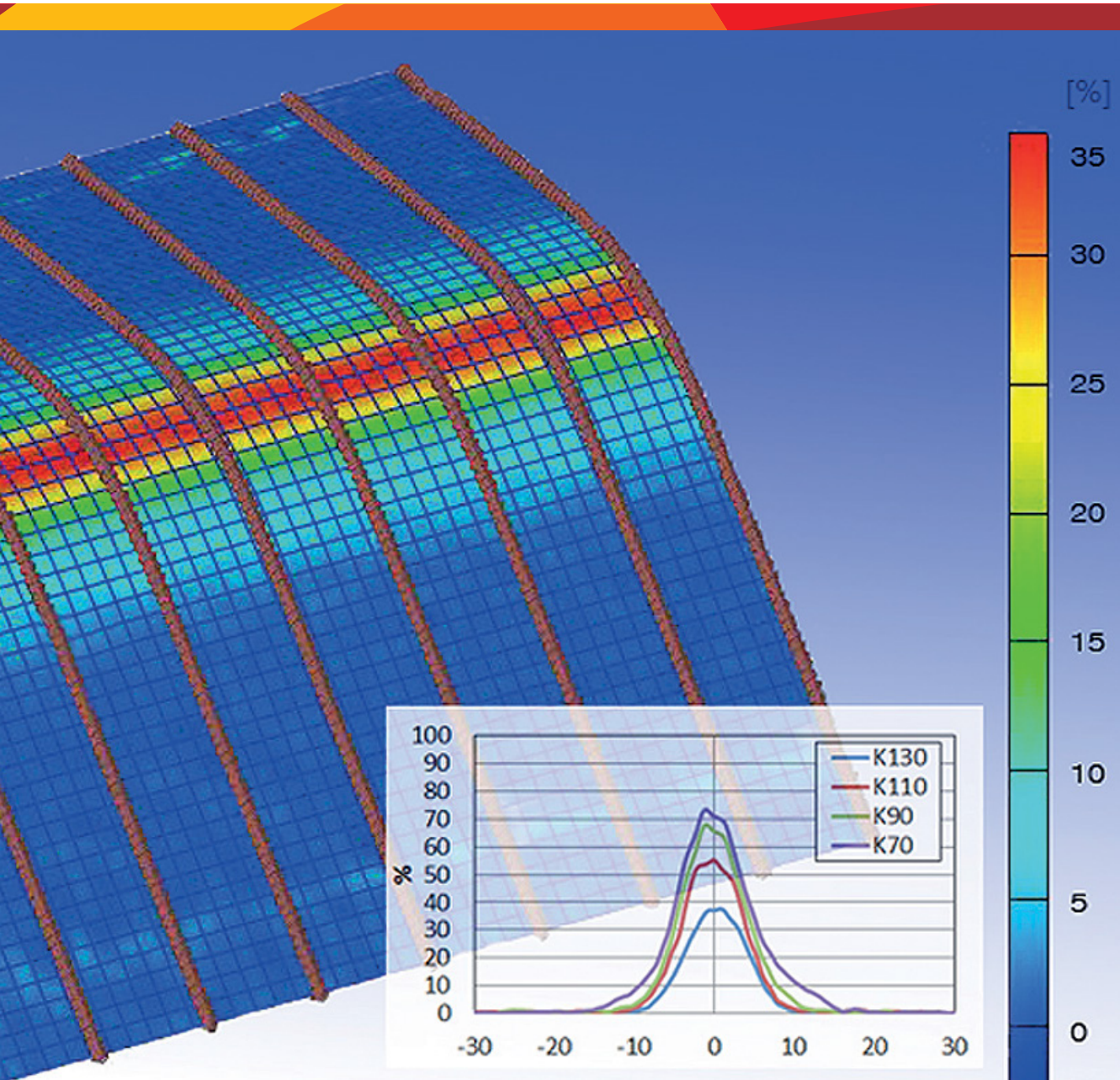


Raimo Ruoppa • Vili Kesti

Optinen venymämittaus ultralujien terästen särmäys- ja vetokokeessa sekä taivutusvoimien laskenta

SUR02-projektin särmäys- ja vetokokeet



Optinen venymämittaus ultralujien terästen särmäys- ja vetokokeessa sekä taivutusvoimien laskenta

Raimo Ruoppa • Vili Kesti

Optinen venymämittaus ultralujien terästen särmäys- ja vetokokeessa sekä taivutusvoimien laskenta

SURO2-projektin särmäys- ja vetokokeet

Sarja B. Raportit ja selvitykset 22/2013

© Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu ja tekijät

ISBN 978-952-5897-94-4 (nid.)
ISSN 1799-2834 (painettu)
ISBN 978-952-5897-95-1 (pdf)
ISSN 1799-831X (verkkajulkaisu)
ISSN-L 1799-2834

Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun julkaisuja
Sarja B. Raportit ja julkaisut 22/2013

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

Kirjoittaja: Raimo Ruoppa & Vili Kesti
Kannen kuva: Marko Ylitolva/Raimo Ruoppa
Taitto: Ella Käyhkö

Uniprint, Oulu 2011

Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu
Tietokatu 1
94600 Kemi
Puh. 010 353 50

www.tokem.fi/julkaisut

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



www.luc.fi

Sisällys

ESIPUHE	9
1 JOHDANTO	11
2 KOEMATERIAALIT JA MENETELMÄT	13
2.1 KOEMATERIAALIT	13
2.2 KOEMENETELMÄT	14
2.2.1 Särmäyskokeet	14
2.2.2 Venymien mittaussärmäyistä näytteistä	15
2.2.3 Vetokokeet	16
3 TULOKSET	17
3.1 SÄRMÄYSKOKEET	17
3.1.1 Maksimivenymät ja särmättävyysindeksi	17
3.1.2 Venymäjakaumat	21
3.1.3 Särmiä poikkileikkaustarkastelut	26
3.1.4 Taivutusvoimat	32
3.2 VETOKOKEET	34
4 TULOSTEN TARKASTELU	37
4.1 SÄRMÄYS- JA VETOKOKEIDEN VÄLINEN KORRELAATIO	37
4.2 VENYMÄJAKAUMAT JA SÄRMIEN PROFIILIT	38
4.3 HAJONTA SÄRMÄYSKOKEIDEN VENYMISSÄ	39
4.4 TAIVUTUSVOIMIEN LASKENTA	41
YHTEENVETO	45
KIRJALLISUUS.	47

TIIVISTELMÄ

Tässä raportissa on esitetty SURO₂ (Superterästen Rakenteen Optimointi) projektissa Kemi-Tornion ammattikorkeakoululla Materiaalien Käytettävyyden Tutkimusryhmässä (MKT) tehtyjen särmäyskokeiden tulokset. Työn tavoitteena oli tutkia vetokokeiden ja särmättävyyden välistä korrelaatiota vertailemalla vetokokeista saatavia materiaaliparametreja särmäyskokeissa näytteestä mitattujen venymäarvojen kanssa ja etsiä niiden välistä yhteyttä särmättävyyteen. Koemateriaaleina olivat 6 mm:n Optim 700 MC Plus ja Raex 400 teräkset, jotka särmättiin erilaisiin kulmiin käyttäen erilaisia painimen säteitä, minkä jälkeen taiteesta mitattiin venymäjakaumat optisella venymämittausrjestelmällä (ARGUS). Särmäyksessä valitsevien venymien ja särmättävyyden välistä yhteyttä verrattiin vetokokeissa saattujen tulosten kanssa. Vetokokeissa käytettiin venymien mittauksessa ekstensometrin lisäksi myös optista venymämittausrjestelmää (ARAMIS). Lisäksi määritettiin joistakin särmätyistä näytteistä neutraaliakselin sijainti (k-arvo) ja paksuusreduktiot särmien poikkileikkauksista tehtyjen mikroskooppitarkastelujen ja kouusmittausten avulla. Särmäyskokeiden aikana mitattiin myös taivutusvoimia, joiden pohjalta kehitettiin mallia voiman ennustamiseksi.

ABSTRACT

In this report, results of the bending tests carried out in SURO₂-project in Materials Usability Research Group (MUR) in Kemi-Tornio University of Applied Sciences, are presented. Aim of the work was to study correlation between bendability and the results of the tensile tests carried out for the materials. The steels researched were Ruukki's ultra-high-strength (UHSS) steels Optim 700 MC Plus and Raex 400. The thickness of the steels was 6 mm. The steels were studied by bending tests with various punch radii and different angle using a hydraulic press. After the tests, elongations were measured by optical measuring system (ARGUS) and the results were compared with the results from the tensile tests where elongations were also measured with optical measuring system (ARAMIS). Additionally some samples were examined by microscope and hardness measurements and the location of the neutral axis was detected (k-factor). During the tests the force was measured and the model for evaluation of the force was developed.

AVAINSANAT

SURO₂, särmäys, ultraluja teräs, Raex, Optim, ARGUS, ARAMIS
Apuna voi käyttää YSA – yleistä suomalaista asiasanastoa.

Esipuhe

Raimo Ruoppa työskentelee erikoisasiantuntijana Kemi-Tornion AMK:n Tekniikan TKI-yksikössä Materiaalien käytettävyyden tutkimusryhmässä (MKT) ja on erikoistunut ultralujien terästen särmättävyyden tutkimiseen. Vili Kesti työskentelee Ruukki Metals Oy:llä tuotekehitysinsinöörinä ja on erikoistunut kuumavalsattujen terästen särmäys- ja muovausasioihin.

1 Johdanto

SURO2-projektissa (Superterästen Rakenteen Optimointi) tutkittiin Ruukin kuuma-valsattujen ultralujien terästen hitsattavuutta ja särmättävyyttä. Tehtävien toimeksianto tapahtui Ruukin toimesta ja toteutus tehtiin Kemi-Tornion ammattikorkeakoululla Materiaalien käytettävyyden tutkimusryhmän toimesta.

Särmäyskokeiden tavoitteena oli tutkia vetokokeiden ja särmättävyyden välistä korrelaatiota optisten venymämittaustekniikoiden avulla vertailemalla vetokokeista saatavia materiaaliparametreja kuten lujuus, venymä, n-arvo, jne. särmäyskokeissa mitattujen venymäarvojen kanssa ja etsiä niiden välistä yhteyttä särmättävyyteen. Saaduista tuloksista on tarkoitus laatia ohjeistusta särmäyksen suorittamiseen käytännön olosuhteissa.

Aiemmassa tutkimuksessa [6] selvitettiin taivutusvoimien laskentaan kehitettyjen kaavojen ja kokeissa mitattujen voimien välistä korrelaatiota ja kehitettiin laskentaa varten uusi kaava. Tässä raportissa jatketaan kaavan kehittelyä edelleen paremmin vastaamaan kokeellisia mittaustuloksia.

Ultralujilla rakenne- ja kulutusteräksillä tarkoitetaan yleisesti teräslaatuja, joiden myötölujuus on yli 550N/mm² ja murtolujuus yli 700 N/mm². Teräkset valmistetaan termomekaanisella valssauksella, jossa kontrolloidun kuumavalssauksen jälkeen teräs jäähdytetään eli sammutetaan nopeutetusti ilman uutta kuumennusta. Menetelmällä teräksen raekoko saadaan pidettyä pienenä ja sitkeyttä kasvatettua lujuudesta tinkimättä. [1]

Kova ja luja Raex- teräs kestää hankaavaa kulutusta ja kovaa pinta-painetta. Raex-teräkset ovat karkaistuja, jonka vuoksi niillä on luja ja kova martensiittinen kiderakenne. Raex 400–500 -teräksillä kiderakenne on itsepäässyttä sälemartensiittia ja pääsemätöntä martensiittia. Ruukilla teräksen karkaisu tehdään ns. suorakarkaisulla, jossa teräs jäähdytetään nopeasti heti kuumavalssauksen jälkeen. Lisäksi kontrolloimalla valssausparametreja sekä seostusta, teräkseen saadaan erittäin kova ja luja mikrorakenne. Valmistusprosessin lopussa teräkselle tehdään vielä Dead Flat -käsittely eli oikaisuvalssaus, jossa nauhalevy kylmämuokataan koko paksuudeltaan. Käsitellyssä saadaan poistettua jäännösjännitykset sekä aikaansaadaan erinomainen tasomaisuus. [1]

Optim 700 MC Plus on termomekaanisesti valssattu, korkean lujuuden Ti-Nb-mikroseostettu rakenneteräs, joka sopii hyvin yleiskäyttöön. Sen myötölujuus on yli

700 N/mm². Optim 700 MC Plussan mikrorakenne koostuu lähinnä kvasipolygonaalista ferriitistä ja granulaarisesta bainiitista. Perinteisempään 700-lujaan teräkseen verrattuna tämä teräs on erityisen hyvin muovattavaa. [2]

2 Koemateriaalit ja menetelmät

2.1 KOEMATERIAALIT

Koemateriaaleina olivat Ruukin Optim 700 MC Plus ja Raex 400 teräkset, joiden paksuus oli 6,0 mm. Koemateriaaleina käytettyjen terästen tyypilliset koostumukset on esitetty taulukossa 1. Koemateriaalin tyypilliset mekaaniset ominaisuudet on esitetty taulukossa 2. Särnäytteet toimitettiin Ruukilta valmiiksi leikattuna 300 x 300 mm:n levyksi ja veto-sauvat olivat valmiiksi koneistettuja.

Taulukko 1. Koemateriaalien tyypilliset koostumukset.

Teräslaji	C	Si	Mn	P	S	B	Cr	Ni	Cu	Mo	Ti	Al
	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Min
Optim 700 MC Plus	0,10	0,50	2,10	0,020	0,010							0,015
Raex 400	0,25	0,80	1,70	0,025	0,015	0,005	1,50	1,00		0,50		

Taulukko 2. Koemateriaalien mekaaniset ominaisuudet.

Teräslaji	Rp _{0,2} min	Rm min	A5 min	Charpy V min	
	N/mm ²	N/mm ²	%	T (°C)	J
Optim 700 MC Plus	700	750-930	15	-20	40
Raex 400	1000	1250	10	-40	20

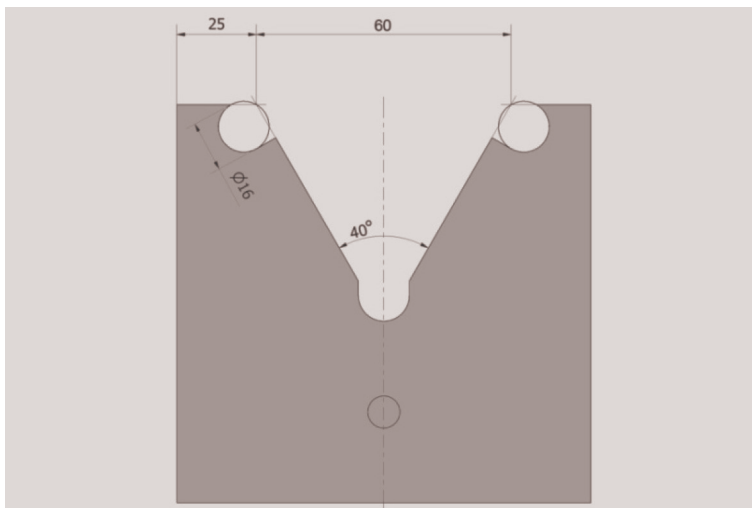
2.2 KOEMENETELMÄT

2.2.1 Särmäyskokeet

Ennen särmäyskokeita näytteisiin merkattiin laserilla pisteverkko kuviointi ARGUS-mittausta varten. Näytteen keskelle kuulapuhallettiin n. 90 x 90 mm:n alue, jonka sisälle merkattiin n. 80 x 80 mm:n alue ympyräverkoilla. Ympyräverkkokuvioiden pistekoko oli 0,5 mm ja pisteiden keskipisteiden välinen etäisyys oli 1,5 mm. Kuvassa 1 on esitetty pisteverkko kuviointia.



Kuva 1. Särmäysnäytteiden pisteverkko kuviointia. Pisteiden halk.=0,5 mm, väli=1,5 mm.



Kuva 2. V-työkalun keskeiset mitat ja aukon leveyden mitoitusperiaate.

Särmäyskokeissa käytettiin ALIKO SP 3000-220 tyyppistä CNC-ohjattua hydraulista särmäyspuristinta, jonka maksimivoima on 2200 kN. Kokeissa käytettiin särmäyspituudeltaan max 400 mm:n painin- ja vastintyökaluja. Käytetyt painimien säteet olivat 3, 5, 11, 15 ja 18 mm. Vastimissa V-aukon mitta oli kaikissa kokeissa 60 mm kuvasa 2 esitetyllä tavalla mitoitettuna. Halkaisijoiltaan 16 mm:n tuurnat V-aukon reunoilla on valmistettu MoC 410 teräksestä ja karkaistu n. 37 HRC:n kovuuteen. V-aukon kulma oli 40°.

Särmäyskokeiden aikana mitattiin joissakin kokeissa puristimen voimaa. Voiman mittausta tapahtui mittaamalla paine toisesta sylinteristä ja muuttamalla arvot voimiksi kalibroimalla paineanturin lukemat voima-anturin avulla. Tiedonkeruuseen käytettiin LabView-ohjelmaa.

2.2.2 Venymien mittaaminen särmäysnäytteistä

Venymien mittaamiseen käytettiin ARGUS optista mittaajajärjestelmää. Järjestelmä perustuu fotogrammetriaan, missä tuotteesta otetut kaksikulotteiset kuvat muunnetaan kolmiulotteiseksi malliksi. Tämä saadaan aikaan siten, että useita pisteitä tunnistetaan tuotteesta eri suunnista otetuista kuvista. Nämä pisteet tuotetaan kuvaan pistematriisiin avulla, joka merkataan tuotteen pintaan ennen muovausta. Pistekuvioiden muoto muuttuu samanaikaisesti tuotteen muodon kanssa muovaamisen aikana, eikä se ole enää säännöllinen. Muuttuneen kuvion muoto visualisoidaan ARGUS järjestelmällä ja siitä lasketaan vastaavat tuotteessa tapahtuneet venymät. Kuvassa 3 on esitetty ARGUS mittauksen ympäristö.

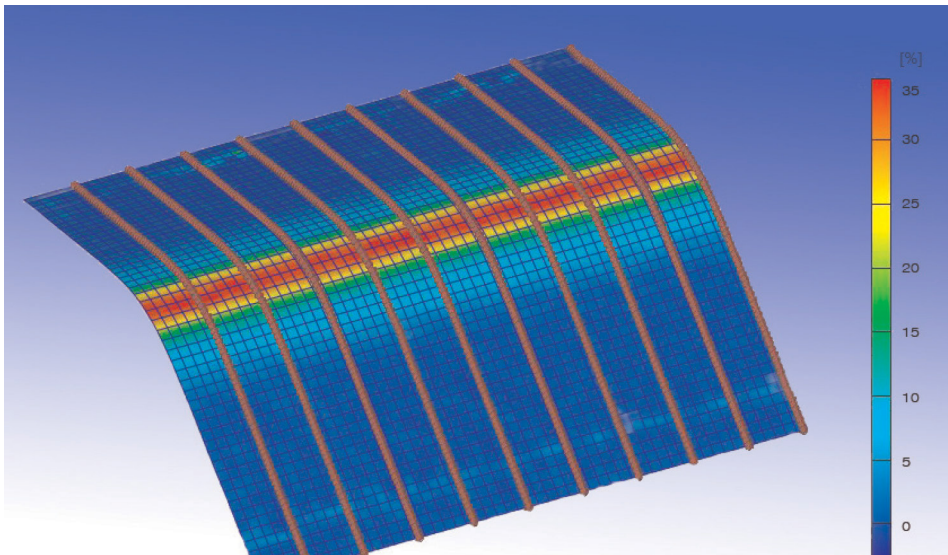


Kuva 3. Venymien mittaaminen särmäysnäytteistä ARGUS optisen mittauksen avulla.

Mittauksen jälkeen särmätyistä näytteistä analysoitiin venymäjakauma taipeen alueelta poikittain särmäyslinjaan nähden 10-11 sektioista ja laskettiin näiden sektioiden maksimivenymien keskiarvo. Kuvassa 4 on esitetty ARGUS kuvauksella saatu venymäjakauma ja sektioiden likimääräinen sijoittelu. Maksimaalisen venymän alue näkyy kuvassa punaisena ja taivuttamaton alue, missä venymää ei ole tapahtunut, sinisenä. Kyseisellä mittausjärjestelmällä päästään siis tarkastelemaan kappaleen pinnan paikallisia venymiä.

2.2.3 Vetokokeet

Vetokokeet tehtiin Zwick & Roell Z250 vetokoneella. Vetokokeet tehtiin sekä pitkittäin että poikittain valssaussuuntaan nähden. Kokeissa käytettiin pitkittäis- ja poikittaisekstensometrin lisäksi ARAMIS optista venymänmittausjärjestelmää tarkoituksena määrittää paikallisia venymiä ja muita parametreja vetokokeessa.



Kuva 4. Esimerkki särmätyistä näytteistä, josta ARGUS kuvauksen avulla on määritetty venymäjakauma sekä sektioiden sijoittelu.

3 TULOKSET

3.1 SÄRMÄYSKOKEET

3.1.1 Maksimivenymät ja särmättävyysindeksi

Taulukossa 4 on esitetty toteutuneet kulmat ja ARGUS-kuvauksista saadut maksimivenymien arvot. Venymien mittauksissa tehtiin särmän yli n. 10 mittausta (sektiota)/näyte ja maksimivenymä on esitetty näiden mittausten keskiarvona. Säröasteet määritettiin silmämääräisesti asteikolla 0..3, missä 0 = ei säröjä, 1 = kuroumajuova, 2 = alkava särö, 3 = avomurtuma. Edellä mainitut piirteet voivat saada särmän arvostelussa lukuarvon 0 (ei esiinny) tai 1 (esiintyy). Särmän karkaaminen määritettiin siten, että sädetulkilla mitatun sisäsäteen R_s ja painimen säteen R_p suhteelle asetettiin raja-arvo 0,85, jota suuremmilla arvoilla tekijä $SK=0$ (ei karkaamista). Mutterimaisuuden esiintyminen määritettiin silmämääräisesti/käsin tunnustelemalla. Taulukossa on myös säröaste, mutterimaisuuden esiintyminen sekä sisäsäde, jonka perusteella on määritetty särmän irtoamisen esiintyminen. Säröasteen ja mutterimaisuuden sekä särmän irtoamisen perusteella voidaan laskea särmättävyysindeksi kaavan 1 mukaisesti [5]

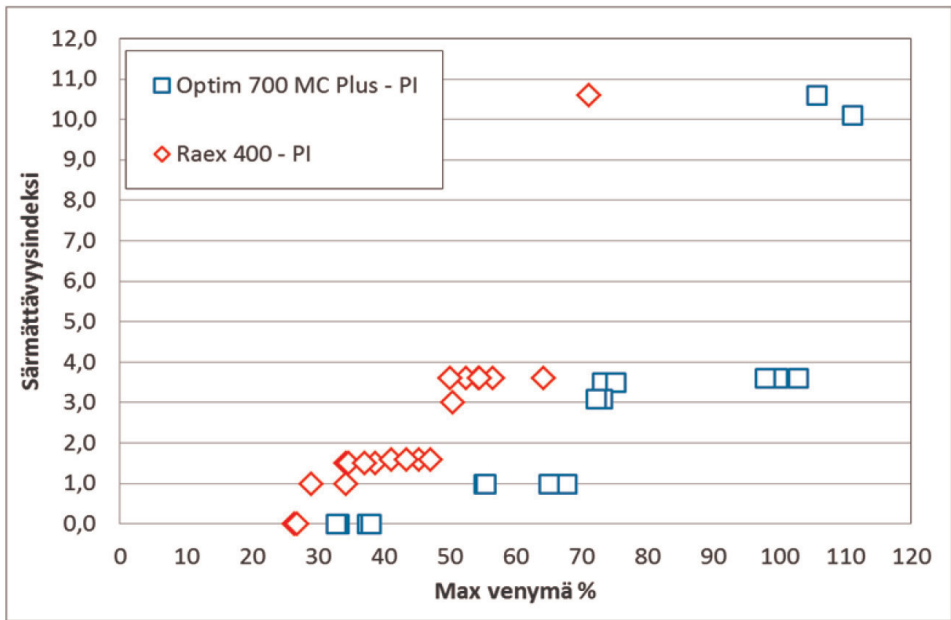
$$\text{Särmättävyysindeksi} = 0,1 \times SK + 0,5 \times MU + KJ + 3 \times AS + 10 \times AM \quad (1)$$

missä: SK = särmä karkaa, MU = mutterimaisuus, KJ = kuroumajuova, AS = alkava särö, AM = avomurtuma

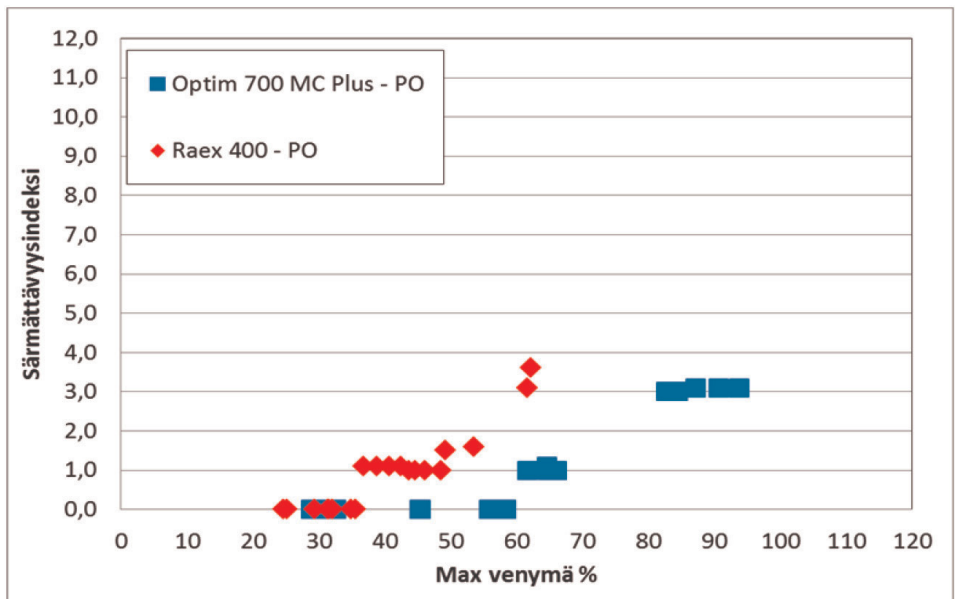
Mitä suurempi on särmättävyysindeksin arvo, sitä huonompi on materiaalin särmättävyys. Kuvissa 5 ja 6 on esitetty ARGUS mittauksella määritettyjen maksimivenymien ja särmäysnäytteiden pinnassa esiintyvien vikojen välinen riippuvuus molemmille koemateriaaleille särmäyslinjan ollessa pitkittäin valssaussuuntaan nähden (PI) sekä poikittain valssaussuuntaan nähden (PO). Kuvista nähdään, että Optim 700 MC Plus teräs kestää selvästi suurempia venymiä saman särmättävyysindeksin arvolla. Särmättäessä valssaussuuntaan nähden pitkittäin särmättävyys huononee hieman pienemmillä venymillä kuin poikittaissuuntaan särmättäessä. Pitkittäissuunnassa myös säröasteet ovat keskimäärin suurempia, koska avomurtumia (säröaste 3) ei esiintynyt lainkaan poikittaissuunnassa särmättäessä.

Taulukko 4. Särmäyskokeiden tulokset ja särnäyttävyyssindeksin arvot.

Mat. tunnus	V.S.	Rp(mm)	Nim. kulma(°)	Toisto n:o	Tot. kulma(°)	Max ven. %	Säröaste	Rs(mm)	Rs/Rp	SK	MU	S-indeksi
O700MCP	PI	3	90	1	96,2	73,1	AS	3	1,00	0	1	3,5
O700MCP	PI	3	90	2	94,8	75,1	AS	3	1,00	0	1	3,5
O700MCP	PI	3	70	1	74,5	99,7	AS	2,5	0,83	1	1	3,6
O700MCP	PI	3	70	2	74,1	97,8	AS	2,5	0,83	1	1	3,6
O700MCP	PI	3	55	1	65,1	102,9	AS	2	0,67	1	1	3,6
O700MCP	PI	3	55	B-1	57,7	105,7	AM	2	0,67	1	1	10,6
O700MCP	PI	3	55	B-2	57,6	111,0	AM	2,5	0,83	1	0	10,1
O700MCP	PI	5	130	1	128,6	37,5	-	5	1,00	0	0	0,0
O700MCP	PI	5	130	2	129,1	38,0	-	5	1,00	0	0	0,0
O700MCP	PI	5	110	1	110,3	55,2	KJ	5	1,00	0	0	1,0
O700MCP	PI	5	110	2	111,2	55,4	KJ	5	1,00	0	0	1,0
O700MCP	PI	5	90	1	95,0	67,8	KJ	5	1,00	0	0	1,0
O700MCP	PI	5	90	2	93,5	65,0	KJ	4,5	0,90	0	0	1,0
O700MCP	PI	5	70	1	71,9	73,2	AS	4	0,80	1	0	3,1
O700MCP	PI	5	70	2	71,6	72,2	AS	4	0,80	1	0	3,1
O700MCP	PI	11	90	1	88,4	33,1	-	10	0,91	0	0	0,0
O700MCP	PI	11	90	2	88,4	32,8	-	10	0,91	0	0	0,0
O700MCP	PO	3	90	1	95,7	64,7	KJ	3	1,00	0	0	1,0
O700MCP	PO	3	90	2	93,7	66,1	KJ	3	1,00	0	0	1,0
O700MCP	PO	3	70	1	74,1	84,4	AS	3	1,00	0	0	3,0
O700MCP	PO	3	70	2	73,3	82,7	AS	3	1,00	0	0	3,0
O700MCP	PO	3	55	1	65,1	87,2	AS	2,5	0,83	1	0	3,1
O700MCP	PO	3	55	B-1	57,5	93,8	AS	2,5	0,83	1	0	3,1
O700MCP	PO	3	55	B-2	57,6	90,6	AS	2,5	0,83	1	0	3,1
O700MCP	PO	5	130	1	127,9	32,6	-	5	1,00	0	0	0,0
O700MCP	PO	5	130	2	129,1	32,3	-	5	1,00	0	0	0,0
O700MCP	PO	5	110	1	109,9	45,3	-	5	1,00	0	0	0,0
O700MCP	PO	5	110	2	110,5	45,5	-	5	1,00	0	0	0,0
O700MCP	PO	5	90	1	94,4	58,3	-	5	1,00	0	0	0,0
O700MCP	PO	5	90	2	92,5	55,8	-	5	1,00	0	0	0,0
O700MCP	PO	5	70	1	71,5	64,6	KJ	4	0,80	1	0	1,1
O700MCP	PO	5	70	2	71,1	61,6	KJ	4,5	0,90	0	0	1,0
O700MCP	PO	11	90	1	88,2	29,5	-	11	1,00	0	0	0,0
O700MCP	PO	11	90	2	88,2	28,9	-	11	1,00	0	0	0,0
R400	PI	11	110	1	109,6	54,4	AS	8,5	0,77	1	1	3,6
R400	PI	11	110	2	108,8	50,4	AS	10	0,91	0	0	3,0
R400	PI	11	90	1	88,8	64,2	AS	7	0,64	1	1	3,6
R400	PI	11	90	2	88,1	52,5	AS	8,5	0,77	1	1	3,6
R400	PI	11	90	3	89,3	56,5	AS	8	0,73	1	1	3,6
R400	PI	11	70	1	74,9	71,1	AM	6	0,55	1	1	10,6
R400	PI	11	70	2	73,4	50,1	AS	9	0,82	1	1	3,6
R400	PI	11	70	3	74,2	54,5	AS	8,5	0,77	1	1	3,6
R400	PI	15	130	1	131,3	34,3	KJ	15	1,00	0	1	1,5
R400	PI	15	130	2	131,1	34,7	KJ	15	1,00	0	1	1,5
R400	PI	15	110	1	110,1	38,7	KJ	14	0,93	0	1	1,5
R400	PI	15	110	2	109,9	37,1	KJ	13	0,87	0	1	1,5
R400	PI	15	90	B-2	89,0	45,3	KJ	11	0,73	1	1	1,6
R400	PI	15	90	B-3	88,7	41,1	KJ	12	0,80	1	1	1,6
R400	PI	15	70	1	71,0	43,4	KJ	11	0,73	1	1	1,6
R400	PI	15	70	2	72,0	47,1	KJ	10	0,67	1	1	1,6
R400	PI	18	90	1	92,4	34,2	KJ	16	0,89	0	0	1,0
R400	PI	18	90	2	92,2	29,0	KJ	17	0,94	0	0	1,0
R400	PI	18	130	1	132,8	26,4	-	18	1,00	0	0	0,0
R400	PI	18	130	2	132,8	26,8	-	18	1,00	0	0	0,0
R400	PO	11	110	1	109,1	49,2	KJ	9,5	0,86	0	1	1,5
R400	PO	11	110	2	108,1	48,6	KJ	10	0,91	0	0	1,0
R400	PO	11	90	1	88,9	62,1	AS	7,5	0,68	1	1	3,6
R400	PO	11	90	2	87,7	43,7	KJ	10,5	0,95	0	0	1,0
R400	PO	11	90	3	88,9	53,6	KJ	8,5	0,77	1	1	1,6
R400	PO	11	70	1	75,3	61,7	AS	7	0,64	1	0	3,1
R400	PO	11	70	2	73,2	44,6	KJ	10,5	0,95	0	0	1,0
R400	PO	11	70	3	73,9	46,1	KJ	9,5	0,86	0	0	1,0
R400	PO	15	130	1	131,1	32,1	-	15	1,00	0	0	0,0
R400	PO	15	130	2	130,9	31,6	-	15	1,00	0	0	0,0
R400	PO	15	110	1	110,2	35,5	-	13,5	0,90	0	0	0,0
R400	PO	15	110	2	109,7	34,9	-	14	0,93	0	0	0,0
R400	PO	15	90	1	89,2	42,5	KJ	11	0,73	1	0	1,1
R400	PO	15	90	2	88,6	38,8	KJ	12	0,80	1	0	1,1
R400	PO	15	70	1	71,1	36,8	KJ	12	0,80	1	0	1,1
R400	PO	15	70	2	72,8	40,7	KJ	10,5	0,70	1	0	1,1
R400	PO	18	90	1	92,6	31,3	-	15,5	0,86	0	0	0,0
R400	PO	18	90	2	92,6	29,3	-	16	0,89	0	0	0,0
R400	PO	18	130	1	132,9	25,2	-	18	1,00	0	0	0,0
R400	PO	18	130	2	132,8	24,7	-	18	1,00	0	0	0,0

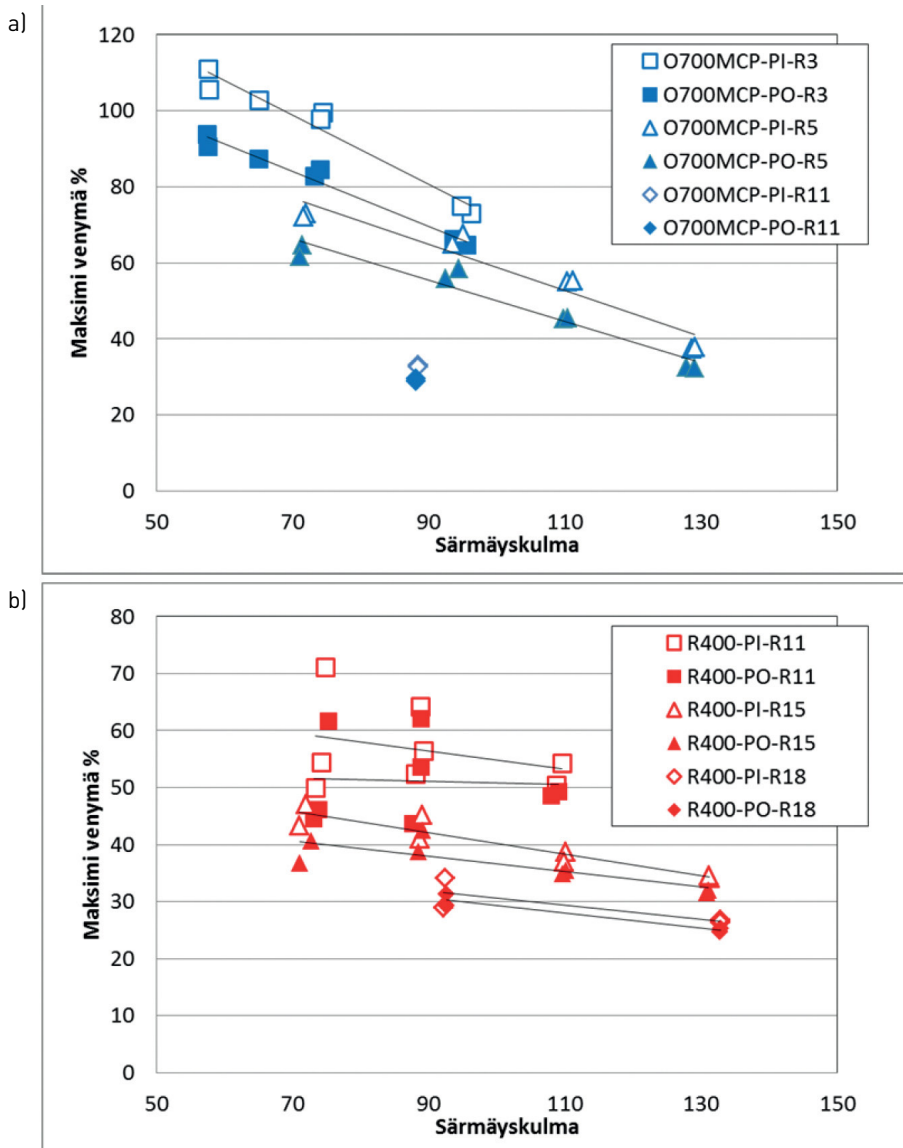


Kuva 5. Särmättävyysindeksin riippuvuus maksimivenymästä särmättäessä pitkittäin valssaussuuntaan nähden.



Kuva 6. Särmättävyysindeksin riippuvuus maksimivenymästä särmättäessä poikittain valssaussuuntaan nähden.

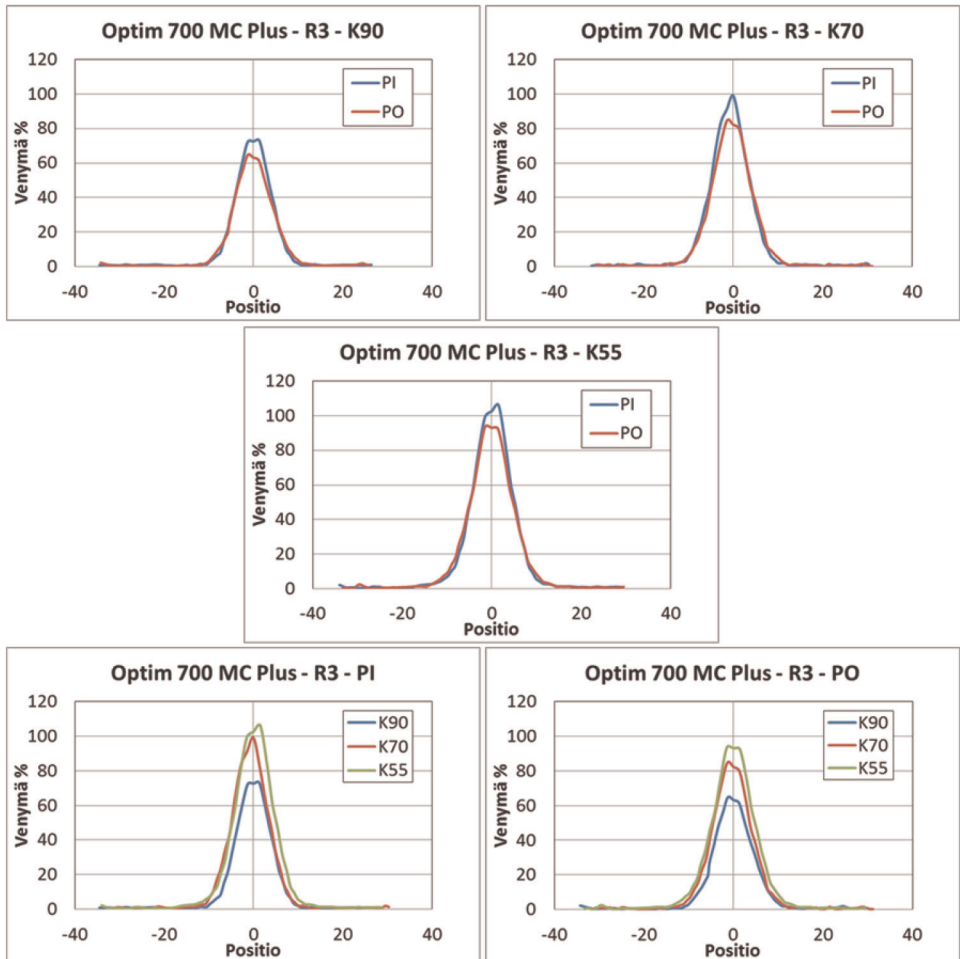
Kuvissa 7 a ja b on esitetty maksimivenymien riippuvuus särmäyskulmasta eri materiaaleilla, painimen säteillä ja valssaussuunnilla. Kuvista nähdään, että särmäyskulman ja painimen säteen pieneminen suurentaa venymää ja särmäyskulman suurentuessa painimen säteen vaikutus venymään pienenee. Kuvista huomataan, että esim. 130° kulmilla sekä Optim 700 MC Plus:illa että Raex 400:lla maksimivenymät ovat samaa luokkaa, vaikka särmäyssäteet ovat erilaiset (R5 vs. R15/18). Lisäksi kuvasta nähdään, että samaan taivutuskulmaan samalla säteellä särmättäessä pitkittäissuunnassa maksimivenymät ovat selvästi suurempia kuin poikittaissuunnassa.



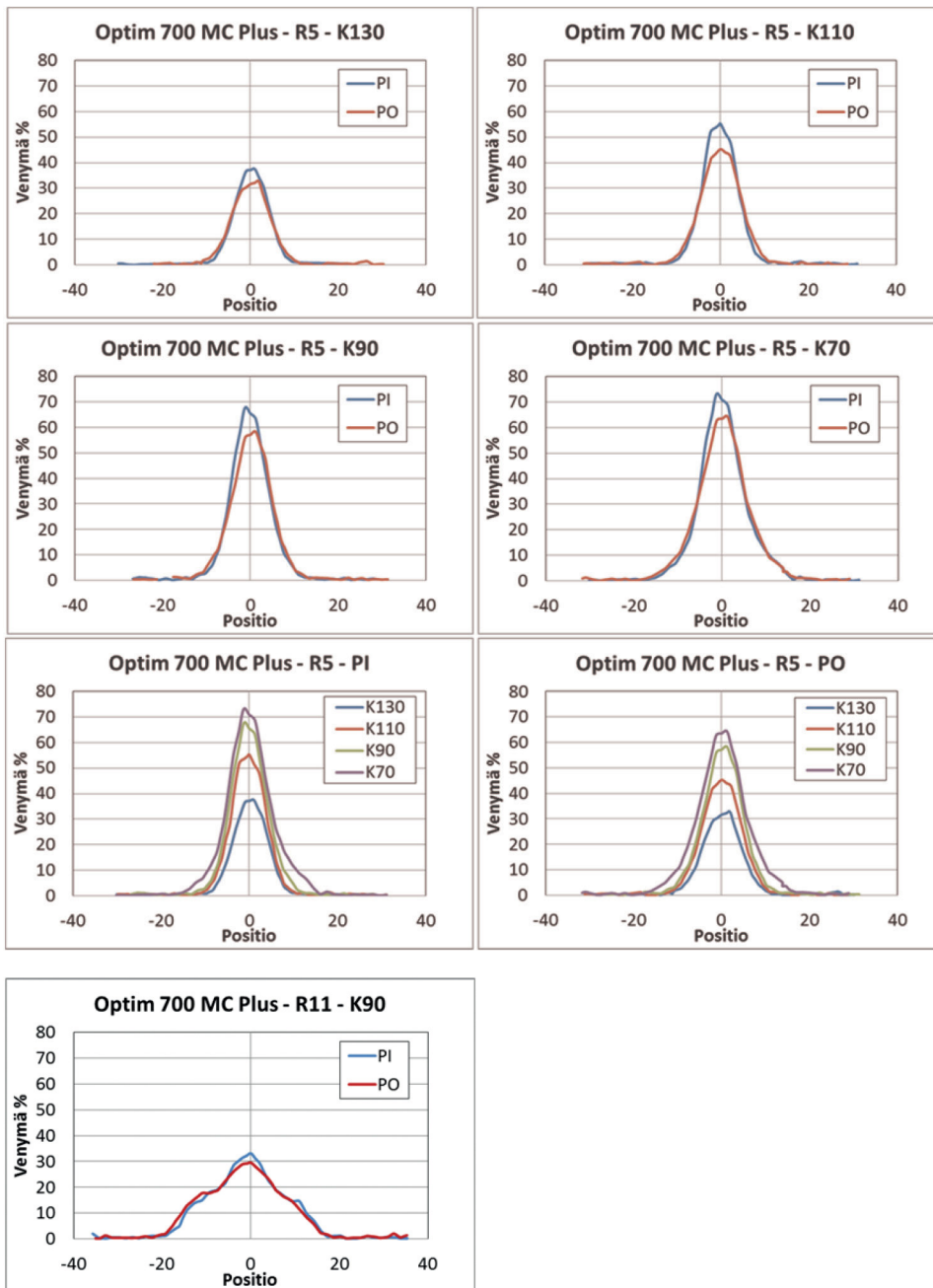
Kuva 7. Maksimivenymän riippuvuus särmäyskulmasta a) Optim 700 MC Plus b) Raex 400.

3.1.2 Venymäjakaumat

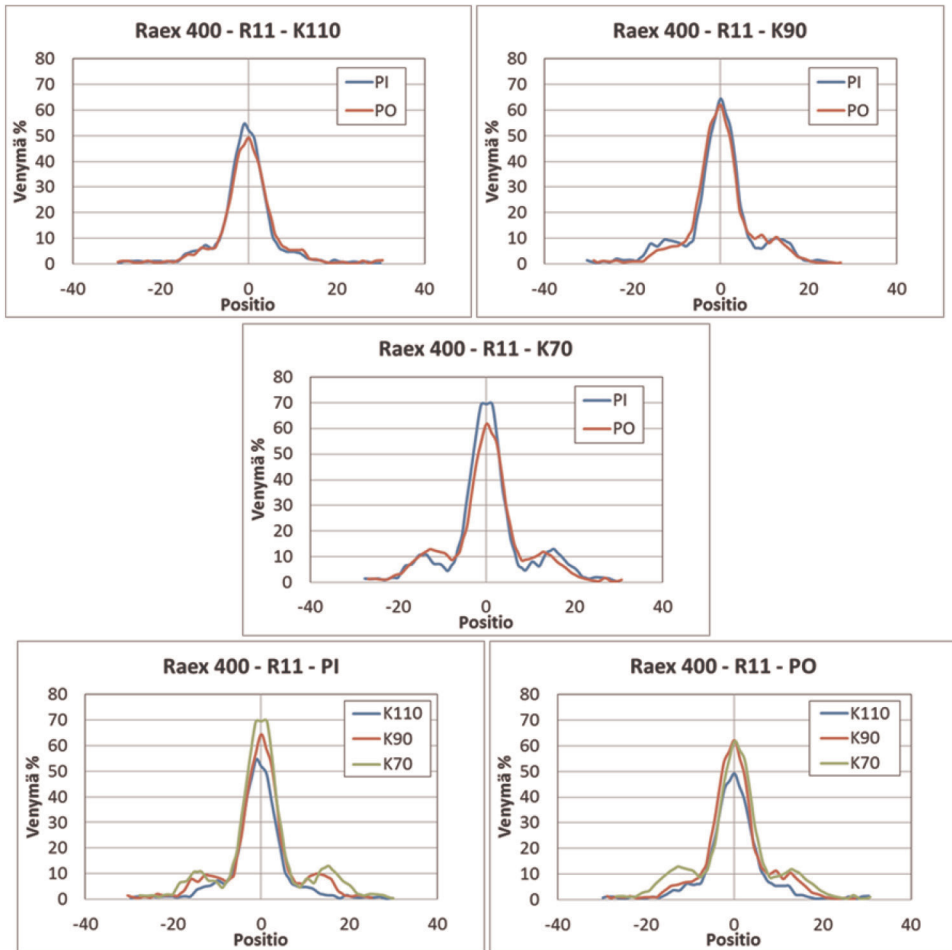
Särmätyistä näytteistä mitatut venymäjakaumat on esitetty Kuvissa 8...12. Käyrät on valittu kunkin näytteen taiteesta mitattujen 10-11 sektorin joukosta siten, että kyseisen käyrän maksimivenymän arvo on sama tai lähimpänä kaikkien sektioiden maksimivenymien keskiarvoa edustaen siten kyseistä näytettä. Käyrät on sijoitettu niin, että positio 0 vastaa särmän keskikohtaa eli taivutuslinjaa ja lukuarvot molempiin suuntiin edustavat venymämittauspisteiden sijaintia taiteessa.



Kuva 8. Venymäjakaumat Optim 700 MC Plus teräksellä. Taivutussäde 3 mm, nimellistaivutuskulmat 90, 70 ja 55 astetta.

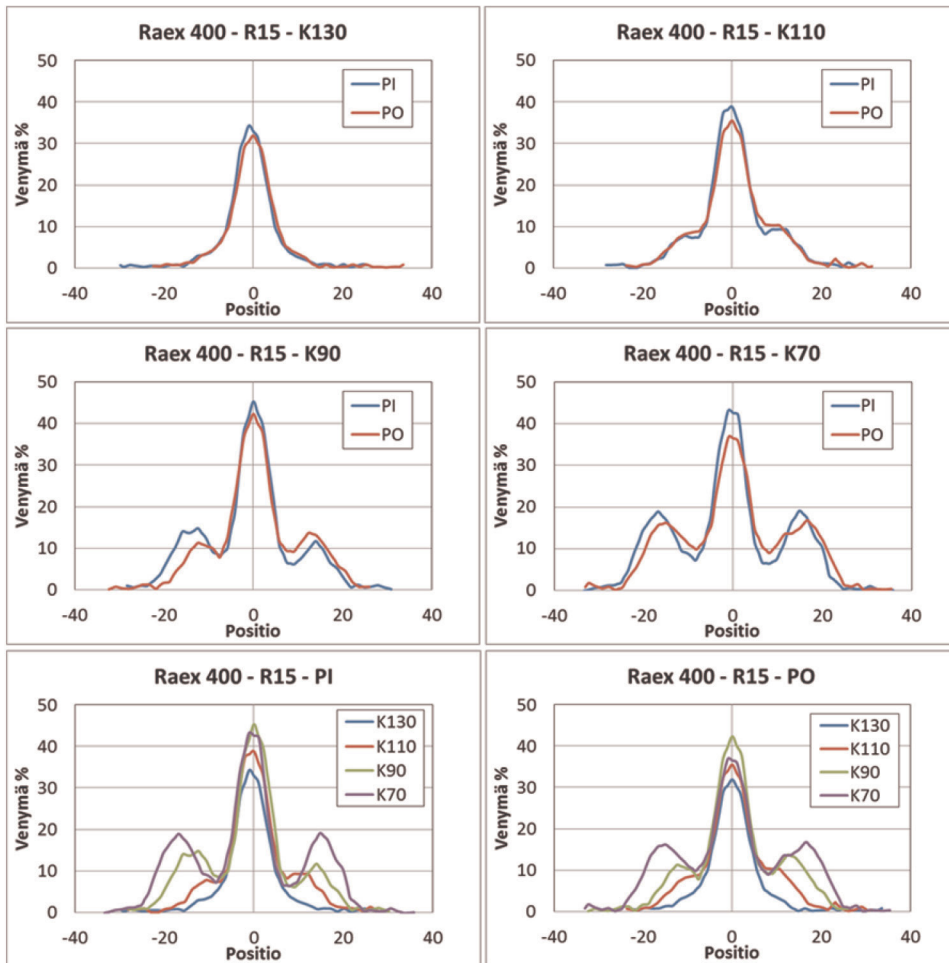


Kuva 9. Venymäjakaumat Optim 700 MC Plus teräksellä. a) taivutussäde 5 mm, nimellistaivutuskulmat 130, 110, 90 ja 70 astetta, b) taivutussäde 11 mm, nimelliskulma 90 astetta.

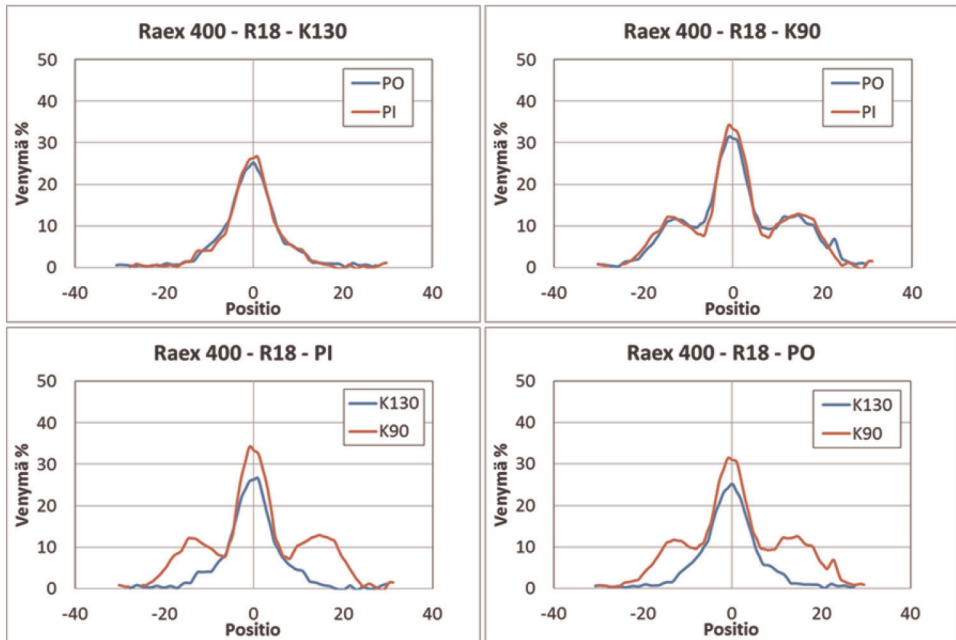


Kuva 10. Venymäjakaumat Raex 400 teräksellä. Taivutussäde 11 mm, nimellistaivutuskulmat 110, 90 ja 70 astetta.

Kuten kuvista 8-12 nähdään, pitkittäissuuntaisissa särmäyksissä maksimivenymät ovat molemmilla materiaaleilla poikkeuksetta suurempia kuin poikittaissuuntaisissa särmäyksissä. Suurempi venymä keskittyy lähelle särmän keskikohtaa, koska etäämmällä pitkittäis- ja poikittaiskäyrät ovat lähes identtisiä eli muualla kuin lähellä taivutuslinjaa ovat venymät jokseenkin samansuuruisia. Särmäyskulman pieneneminen kasvattaa venymiä, kuten kuvista nähdään. Optim 700 MC Plus teräksellä maksimivenymä kasvaa ja venymäalueen leveys suurenee, mutta Raex 400:lla särmäyskulman pieneneminen johtaa siihen, että reunoille alkaa muodostua paikalliset maksimipiikit venymissä. Kuvista 9 b ja 10 nähdään ero materiaalien välillä, kun särmäys on tehty samalla taivutussäteellä ja taivutuskulmana on 90 astetta. Optim 700 MC Plus teräksellä maksimivenymä on n. 30 %, kun taas Raex 400:lla venymä on taiteen keskellä jo n. 65 %.



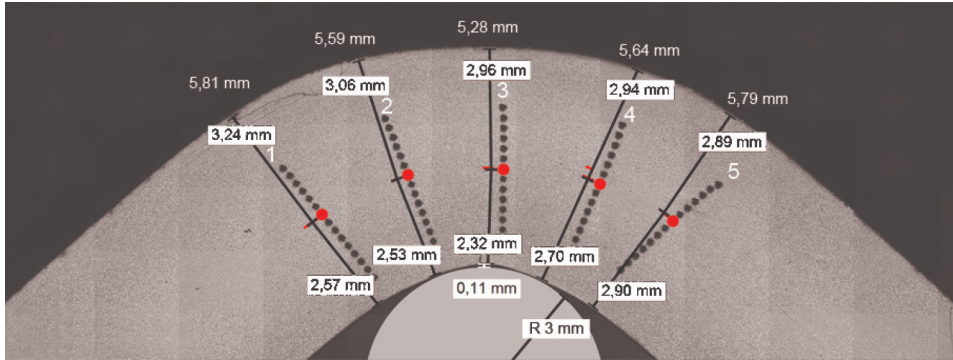
Kuva 11. Venymäjakaumat Raex 400 teräksellä. Taivutussäde 15 mm, nimellistaivutuskulmat 130, 110, 90 ja 70 astetta.



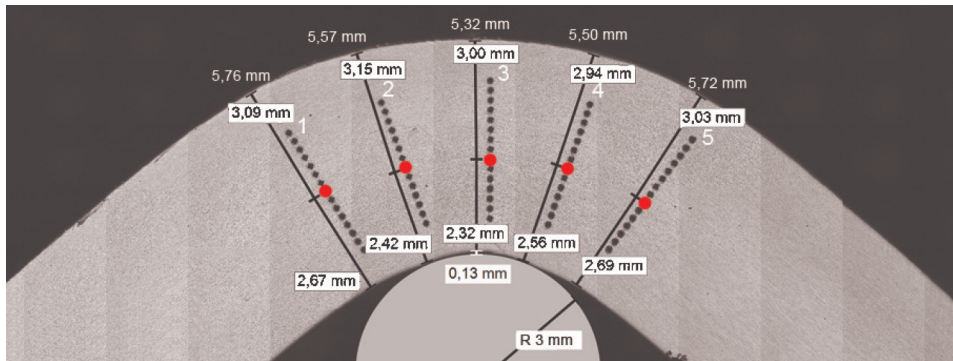
Kuva 12. Venymäjakaumat Raex 400 teräksellä. Taivutussäde 15 mm, nimellistaivutuskulmat 130, ja 90 astetta.

3.1.3 Särmien poikkileikkaustarkastelut

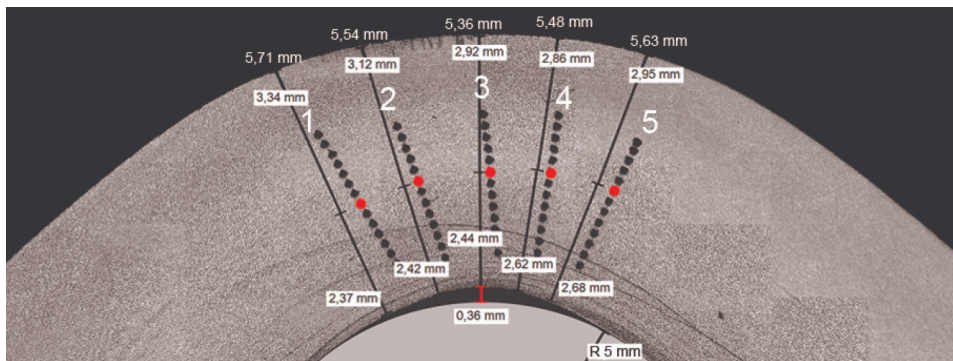
Kuvissa 13-24 on esitetty eräiden särmäysnäytteiden poikkileikkauskuvat ja taulukossa 5 on esitetty minimikovuusalueelta mitatut kovuudet, joiden perusteella on määritetty neutraaliakselien sijainnit.



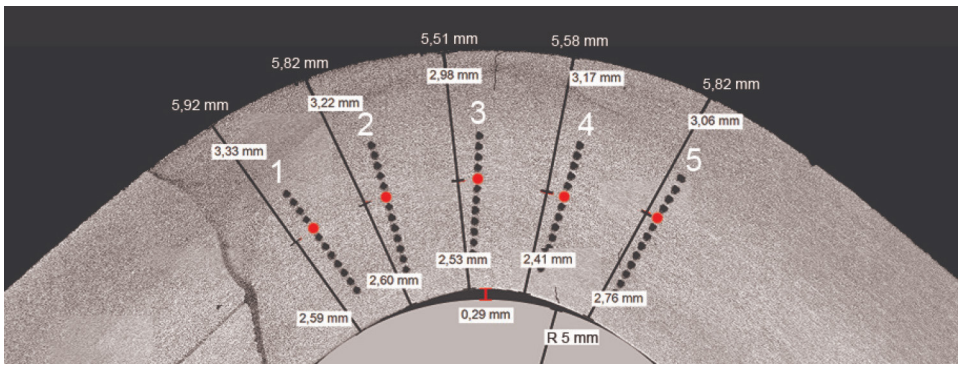
Kuva 13. Särmän poikkileikkaus näyte O700MCP-PI-R3-K90-1.



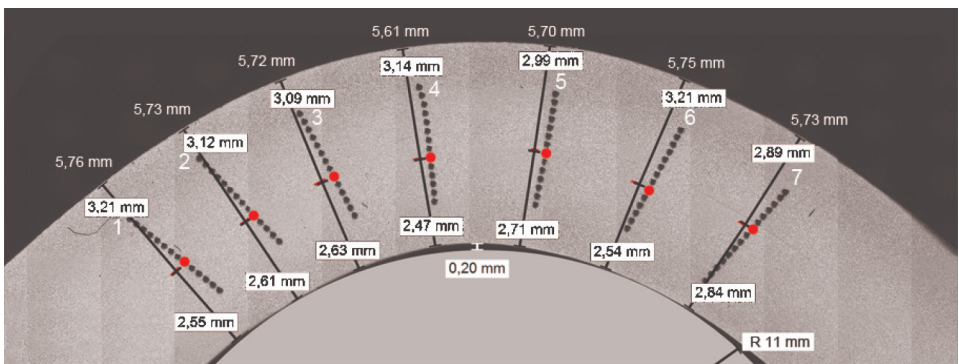
Kuva 14. Särmän poikkileikkaus näyte O700MCP-PO-R3-K90-1.



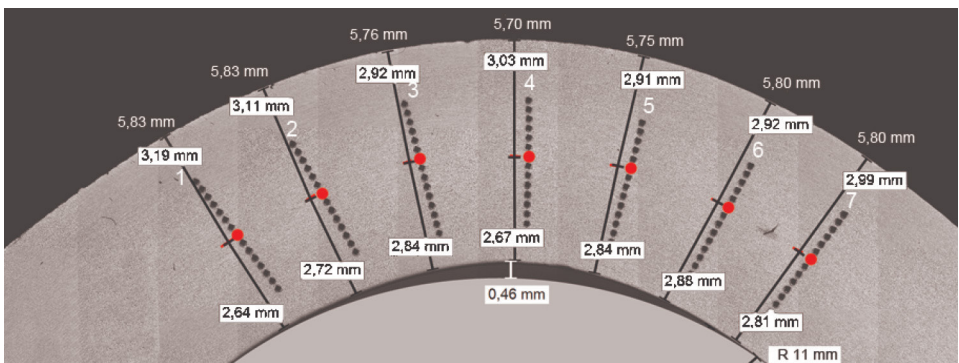
Kuva 15. Särmän poikkileikkaus näyte O700MCP-PI-R5-K90-1.



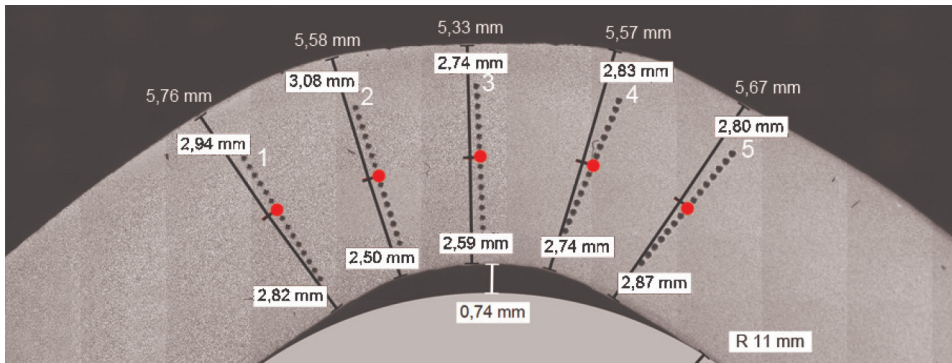
Kuva 16. Särmen poikkileikkaus näyte O700MCP-PO-R5-K90-1.



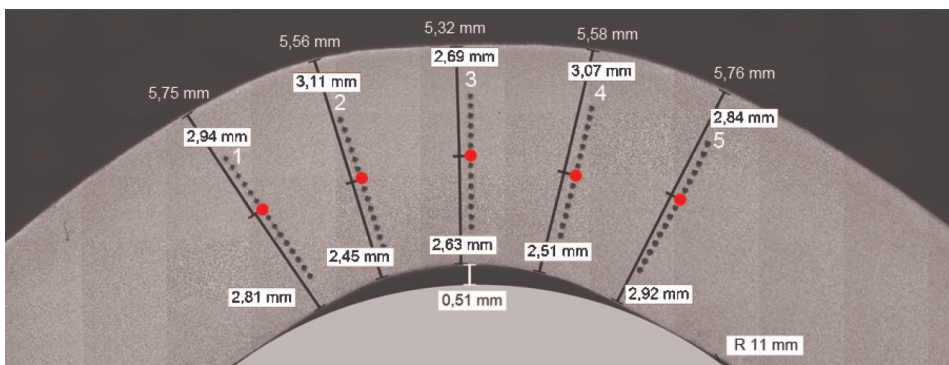
Kuva 17. Särmen poikkileikkaus näyte O700MCP-PI-R11-K90-3.



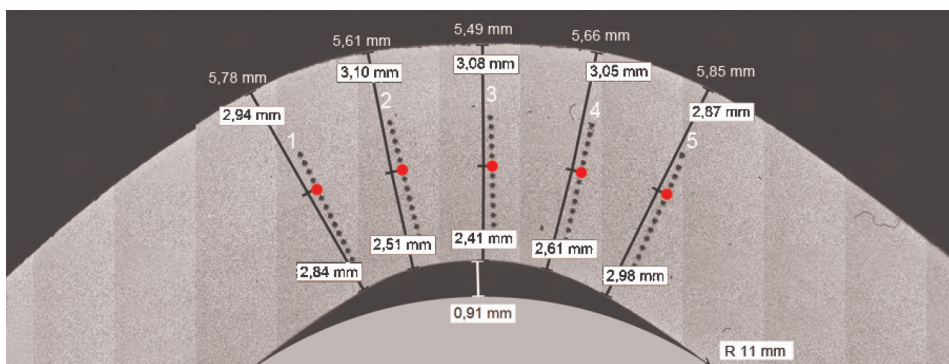
Kuva 18. Särmen poikkileikkaus näyte O700MCP-PO-R11-K90-3.



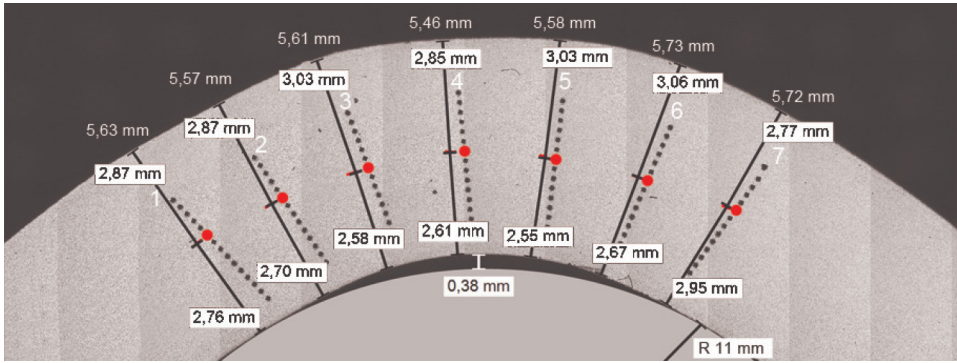
Kuva 19. Särmin poikkileikkaus näyte R400-PI-R11-K90-1.



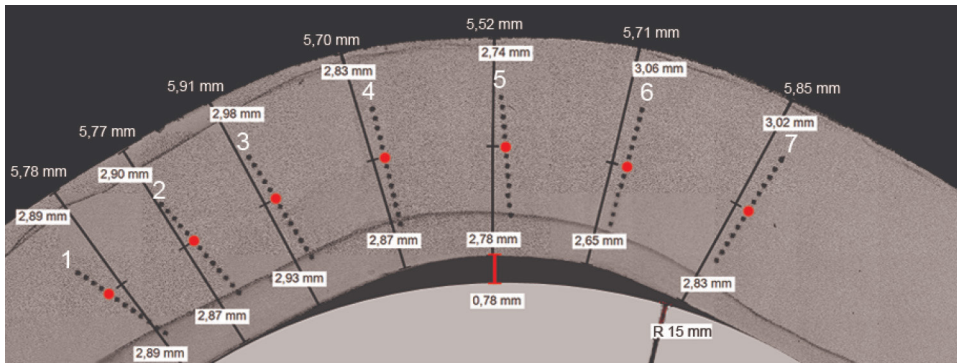
Kuva 20. Särmin poikkileikkaus näyte R400-PI-R11-K90-2.



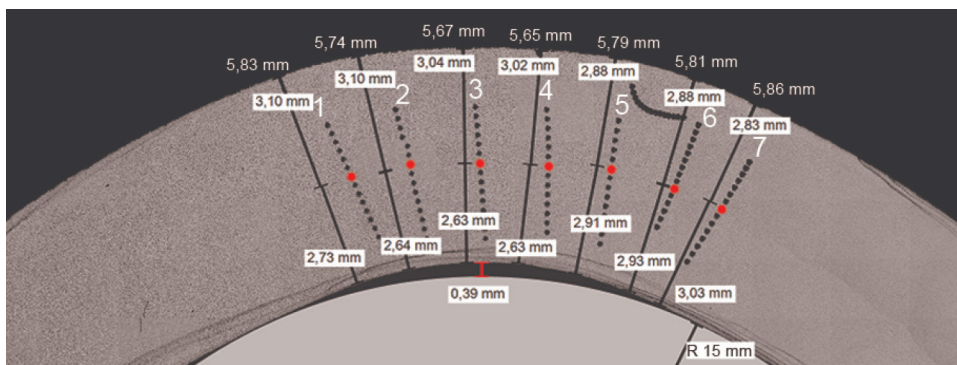
Kuva 21. Särmin poikkileikkaus näyte R400-PO-R11-K90-1.



Kuva 22. Särmän poikkileikkaus näyte R400-PO-R11-K90-2.



Kuva 23. Särmän poikkileikkaus näyte R400-PI-R15-K70-1.



Kuva 24. Särmän poikkileikkaus näyte R400-PO-R15-K70-1.

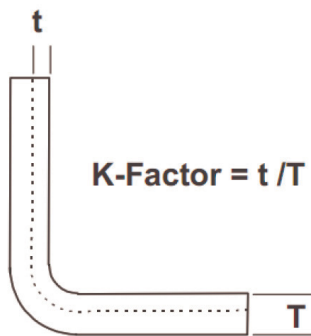
Taulukko 5. Poikkileikkausnäytteistä mitattuja kovuuksia (HV5).

Näytetunnus	V.S.	Rp(mm)	Nim. kulma(°)	Tot. kulma(°)	1	2	3	4	5	6	7
O700MCP-PI-R3-K90-1	PI	3	90	96,2	257	288	284	287	267		
					236	272	286	282	258		
					241	263	275	265	243		
					240	250	241	246	240		
					262	260	255	263	267		
					271	286	289	265	267		
					275	302	310	267	269		
O700MCP-PO-R3-K90-1	PO	3	90	95,7	266	280	283	280	266		
					263	269	278	274	248		
					260	263	260	261	247		
					254	263	255	257	243		
					266	267	259	257	253		
					275	286	278	281	259		
					279	294	300	284	277		
O700MCP-PI-R5-K90-1	PI	5	90	95,0	270	262	289	270	254		
					261	271	280	262	269		
					255	264	253	259	255		
					254	251	255	246	247		
					267	263	255	269	253		
					269	284	281	289	254		
					271	267	287	294	277		
O700MCP-PO-R5-K90-1	PO	5	90	94,4	265	279	290	294	271		
					257	270	275	291	255		
					255	265	264	278	258		
					250	250	250	259	250		
					263	257	257	254	261		
					274	280	288	269	270		
					286	291	309	299	282		
O700MCP-PI-R11-K90-3	PI	11	90	88,5	250	261	270	265	262	260	256
					255	253	256	252	255	247	261
					242	247	254	246	259	245	251
					242	236	243	243	243	233	235
					263	253	245	269	252	264	243
					267	274	273	274	272	275	258
					274	266	277	286	270	267	264
O700MCP-PO-R11-K90-3	PO	11	90	88,2	253	258	263	269	267	269	284
					249	257	252	264	257	244	251
					244	237	243	255	249	243	238
					245	231	243	245	241	231	238
					247	252	239	251	245	242	250
					266	267	244	259	269	255	256
					274	270	250	274	263	268	269
R400-PI-R11-K90-1	PI	11	90	88,8	409	399	422	410	400		
					389	386	401	395	368		
					372	392	380	395	368		
					357	374	374	370	366		
					382	384	408	393	375		
					411	402	415	369	397		
					428	423	450	381	394		
R400-PI-R11-K90-2	PI	11	90	88,1	426	414	415	395	393		
					380	410	417	392	397		
					412	392	400	398	399		
					378	391	359	356	378		
					382	392	387	401	380		
					410	418	409	415	391		
					407	408	429	422	394		
R400-PO-R11-K90-1	PO	11	90	90,0	423	415	415	424	394		
					398	404	399	397	401		
					401	410	386	392	393		
					376	380	386	381	381		
					386	393	420	393	388		
					406	429	436	419	395		
					416	422	429	434	409		
R400-PO-R11-K90-2	PO	11	90	90,0	412	407	400	430	405	404	399
					389	388	404	409	387	382	391
					399	399	391	396	390	371	377
					374	376	377	378	376	369	374
					379	390	384	390	387	391	371
					406	416	402	417	422	408	399
					436	439	422	473	424	412	411
R400-PI-R15-K70-1	PI	15	70	71,0	426	429	429	414	417	406	414
					406	417	424	402	407	398	382
					383	401	410	405	408	386	382
					388	387	390	392	394	378	368
					412	408	425	412	392	386	386
					437	434	430	436	419	414	422
					446	437	459	439	440	431	423
R400-PO-R15-K70-1	PO	15	70	71,1	420	439	432	450	439	419	416
					410	417	422	432	426	404	412
					425	408	395	420	434	396	393
					390	390	394	394	414	391	391
					414	410	401	399	400	406	412
					419	429	429	417	435	434	439
					451	447	442	437	453	445	440

Kovuusmittausten perusteella määritetty neutraaliakselin paikka on merkitty punaisilla pilkuilla ja niiden etäisyys särmän ulko- ja sisäpinnalta on mitattu sekä vastaava paksuus laskettu ja merkitty kuviin. Lisäksi levyn irtoama on mitattu ja merkitty kuviin. Neutraaliakselin paikan suhde särmän paksuuteen (kuva 25) voidaan esittää k-arvon avulla, joka lasketaan kaavalla:

$$k = \frac{t}{T} \quad (2)$$

missä: T on paksuus
t on neutraaliakselin sijainti



Kuva 25. k-arvon laskeminen.

Poikkileikkauksista mitatut neutraaliakselin etäisyydet särmän ulko- ja sisäpinoilta sekä niiden perusteella lasketut k-arvot on esitetty taulukossa 6. Laskettaessa k-arvoa, on käytetty joko särmän keskellä olevalta janalta (kesk) saatuja arvoja (merkitty punaisella) tai symmetrisesti keskimmäisen janan suhteen molemmilla puolilla olevien kolmen (ave3) tai viiden janan (ave5) arvojen keskiarvoja. Lisäksi taulukkoon on merkitty särmän irtoaman suuruus ja paksuusreduktion (TR) suuruus määritettynä samalla tavalla kuin k-arvo keskimmäiseltä janalta sekä kolmen tai viiden janan arvojen keskiarvona.

Taulukko 6. Paksuuden muutokset ja neutraaliakselin sijainnista lasketut k-arvot, särmän irtoaminen [A] sekä paksuusreduktiot (TR).

Näytetunnus	Paksuus	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	t(kesk)	T(kesk)	t(ave3)	T(ave3)	t(ave5)	T(ave5)	k(kesk)	k(ave3)	k(ave5)	A(mm)	TR(kesk)	TR(ave3)	TR(ave5)
O700MCP-PI-R3-K90-1	6,03	2,57	2,53	2,32	2,70	2,90			5,81	5,59	5,28	5,64	5,79			2,32	5,28	2,52	5,50	2,60	5,62	0,44	0,46	0,46	0,11	12,4 %	8,7 %	6,8 %
O700MCP-PO-R3-K90-1	6,03	2,67	2,42	2,32	2,56	2,69			5,76	5,57	5,32	5,50	5,72			2,32	5,32	2,43	5,46	2,53	5,57	0,44	0,45	0,45	0,13	11,8 %	9,4 %	7,6 %
O700MCP-PI-R5-K90-1	6,03	2,37	2,42	2,44	2,62	2,68			5,71	5,54	5,36	5,48	5,63			2,44	5,36	2,49	5,46	2,51	5,54	0,46	0,46	0,45	0,36	11,1 %	9,5 %	8,1 %
O700MCP-PO-R5-K90-1	6,03	2,59	2,60	2,53	2,41	2,76			5,92	5,82	5,51	5,58	5,82			2,53	5,51	2,51	5,64	2,58	5,73	0,46	0,45	0,45	0,29	8,6 %	6,5 %	5,0 %
O700MCP-PI-R11-K90-3	6,03	2,55	2,61	2,63	2,47	2,71	2,54	2,84	5,76	5,73	5,72	5,61	5,70	5,75	5,73	2,47	5,61	2,60	5,68	2,59	5,70	0,44	0,46	0,45	0,20	7,0 %	5,9 %	5,4 %
O700MCP-PO-R11-K90-3	6,03	2,64	2,72	2,84	2,67	2,84	2,88	2,81	5,83	5,83	5,76	5,70	5,75	5,80	5,80	2,67	5,70	2,78	5,74	2,79	5,77	0,47	0,49	0,48	0,46	5,5 %	4,9 %	4,3 %
R400-PI-R11-K90-1	6,03	2,82	2,50	2,59	2,74	2,87			5,76	5,58	5,33	5,57	5,67			2,59	5,33	2,61	5,49	2,70	5,58	0,49	0,48	0,48	0,74	11,6 %	8,9 %	7,4 %
R400-PI-R11-K90-2	6,03	2,81	2,45	2,63	2,51	2,92			5,75	5,56	5,32	5,58	5,76			2,63	5,32	2,53	5,49	2,66	5,59	0,49	0,46	0,48	0,51	11,8 %	9,0 %	7,2 %
R400-PO-R11-K90-1	6,03	2,84	2,51	2,41	2,61	2,98			5,78	5,61	5,49	5,66	5,85			2,41	5,49	2,51	5,59	2,67	5,68	0,44	0,45	0,47	0,91	9,0 %	7,4 %	5,8 %
R400-PO-R11-K90-2	6,03	2,76	2,70	2,58	2,61	2,55	2,67	2,95	5,63	5,57	5,61	5,46	5,58	5,73	5,72	2,61	5,46	2,58	5,55	2,62	5,59	0,48	0,46	0,47	0,38	9,5 %	8,0 %	7,3 %
R400-PI-R15-K70-1	6,03	2,89	2,87	2,93	2,87	2,78	2,65	2,83	5,78	5,77	5,91	5,70	5,52	5,71	5,85	2,78	5,52	2,77	5,64	2,81	5,74	0,50	0,49	0,49	0,78	8,5 %	6,4 %	4,8 %
R400-PO-R15-K70-1	6,03	2,73	2,64	2,63	2,63	2,91	2,93	3,03	5,83	5,74	5,67	5,65	5,79	5,81	5,86	2,63	5,67	2,63	5,69	2,71	5,74	0,46	0,46	0,47	0,39	6,0 %	5,7 %	4,9 %

Taulukon perusteella Optim 700 MC Pluss teräksellä k- arvot ovat keskimäärin hieman pienempiä kuin Raex 400:lla, mutta valssaussuunnalla ei näytä olevan suurta merkitystä neutraaliakselin paikkaan. Levyn irtoamaan vaikuttaa selkeästi taivutus säde, mutta valssaussuunnalla ei näytä olevan selkeää eroa. Sen sijaan levyssä tapahtuva oheneminen näyttää olevan erilaista eri suunnissa, kuten poikkileikkauskuvistakin nähdään, eli oheneminen on molemmilla materiaaleilla voimakkaampaa pitkitäissuunnassa särmättäessä. Oheneminen on myös keskittynyt särmäyslinjan lähelle, mikä nähdään siitä, että keskellä särmää paksuusreduktio on suurempi kuin kolmen tai viiden janan keskiarvoista laskettuna. Optim 700 MC Plus teräksellä oheneminen on kuitenkin hieman tasaisemmin jakautunut kuin Raex 400:lla, jolla ero keskijanan ja reunimmaisten janojen ohenemien välillä on suurempi. Raex 400:lla näkyy poikkileikkauskuvissa selvästi Optim 700 MC Plussaa voimakkaammin esiintyvä mutterimaisuus.

3.1.4 Taivutusvoimat

Eräissä kokeissa mitattiin särmäyksen aikana taivutusvoiman suuruus. Mitattuja voimia verrattiin kirjallisuudessa [6-9] esitetyillä kaavoilla laskettujen voimien kanssa. Käytetyt kaavat ovat seuraavia:

$$F = 1,5 \times \frac{b \times R_m \times t^2}{W} \text{ [N]} \quad (\text{Ruukki}) \quad (3)$$

$$F = \frac{b \times R_m \times t^2}{W} \text{ [N]} \quad (W/t \geq 10) \quad (\text{Schuler}) \quad (4a)$$

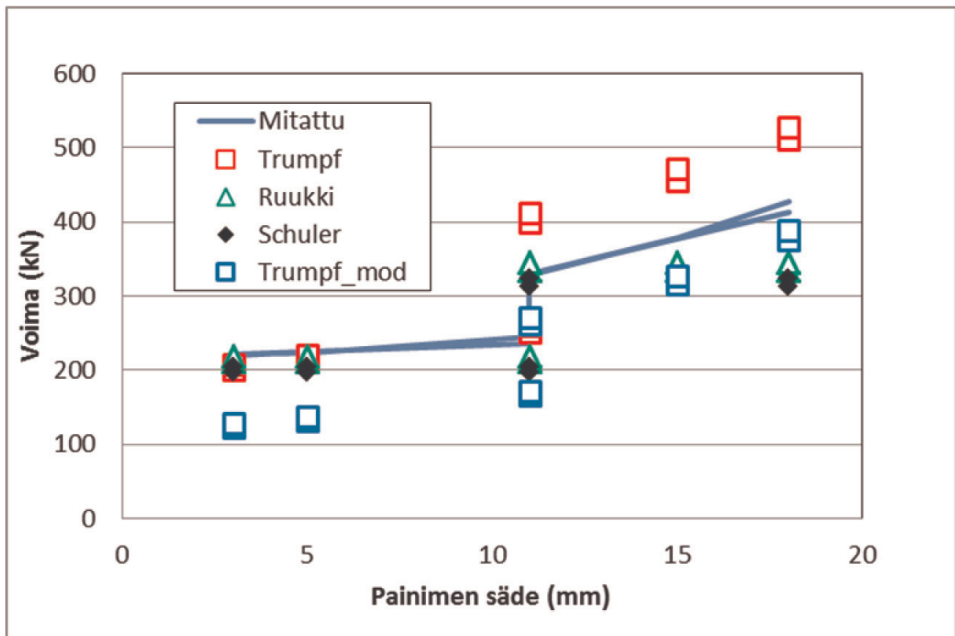
$$F = \left(1 + \frac{4 \times t}{W}\right) \times \frac{b \times R_m \times t^2}{W} \text{ [N]} (W/t < 10) \quad (\text{Schuler}) \quad (4b)$$

$$F = 1,33 \times \frac{b \times R_m \times t^2}{W - (2 \times \cos 45^\circ \times R_p)} \text{ [N]} \quad (\text{Trumpf}) \quad (5)$$

$$F = 0,8 \times \frac{b \times R_m \times t^2}{W - (1,73 \times R_p)} \text{ [N]} \quad (\text{Trumpf_mod}) \quad (6)$$

Missä: F on maksimi taivutusvoima
 R_m on vetomurtolujuus (N/mm²)
b on taivutuspituus (mm)
t on levyn paksuus (mm)
W on V-aukon leveys (mm)
 R_p on painimen säde (mm) (kaavat 5 ja 6)

Eri kaavoilla laskettuja taivutusvoiman arvoja on tarkasteltu kuvassa 26 ja verrattu niitä mitattuihin taivutusvoimiin. Painimen säteen kasvaessa ja V-aukon mitan pysyessä vakiona, taivutusvoima kasvaa, koska V-aukon reunan ja painimen välinen vipuvarsi lyhenee. Kuvasta nähdään, että pienillä painimen säteillä Optim 700 MC Plussan tapauksessa Ruukin, Trumpfin ja Schulerin kaavat antavat lähes mitattuja voimia vastaavat arvot, kun taas modifioitu Trumpfin kaava antaa liian pieniä arvoja. Ruukin ja Schulerin kaavat eivät huomioi painimen sädettä, jonka Trumpfin kaavat huomioivat. Kuten kuvasta nähdään, 18 mm:n painimen säteellä alkaa Ruukin ja Schulerin kaavojen arvot jäämään selvästi liian pieneksi, Trumpfin modifioidulla kaavalla laskettu voima antaa liian pieniä arvoja, mutta alkaa kuitenkin lähestyä mitattuja arvoja ja Trumpfin kaava taas antaa suuremmilla säteillä liian suuria arvoja. Ultralujilla teräksillä on suositeltavaa käyttää suhteellisen suuria säteitä ja pieniä alatyökalan aukkoja, jolloin perinteisten kaavojen antaman arviot voivat poiketa todellisuudesta jo paljonkin.



Kuva 26. Mitatun ja eri kaavoilla lasketun voiman riippuvuus painimen säteestä R. R3 ja R5 mm = Optim 700 MC Plus, R11 mm = Optim 700 MC Plus ja Raex 400, R15 ja R18 mm = Raex 400, W = 60 mm.

3.2 VETOKOKEET

Taulukossa 7 on esitetty pitkittäis- ja poikittaissuuntaisten vetokokeiden tulokset ja niistä saadut koemateriaalien mekaaniset ominaisuudet. Osassa kokeista käytettiin poikittaisekstensometriä, jolla saatiin määritettyä myös r-arvot. Vetojen aikana käytettiin myös ARAMIS-kuvausta, jonka avulla päästäään tarkastelemaan paikallisia venymiä. ARAMIS-datasta määritettiin sauvan pitkittäissuunnassa viidestä sektioista venymäjakauma ja laskettiin maksimivenymä sektioiden maksimivenymien keskiarvona. Maksimivenymät määritettiin kahdessa pisteessä vetokokeen aikana; diffuusikurouman lopussa sekä juuri ennen sauvan murtumista. Taulukossa 8 on esitetty suurin maksimivenymä sekä maksimivenymien keskiarvo. Lisäksi on laskettu kolmen toistokokeen keskiarvona saadut maksimivenymät eri tapauksissa.

Taulukko 7. Vetokokeiden tulokset (venymät ekstensometrilla).

Materiaali	Tunniste	E	R _{p0,2}	R _m	A _g	A _{gt}	A ₈₀	A _{80t}	r _{2-20/Ag}	Π _{2-20/Ag}
		GPa	MPa	N/mm ²	%	%	%	%		
Optim 700MC Plus PI	1--1	195,6	700,0	783,0	6,6	7,0	14,9	15,1		0,072
Optim 700MC Plus PI	1--2	196,2	698,5	781,4	6,5	6,9	14,7	15,0		0,071
Optim 700MC Plus PI	1--3	186,6	700,6	784,1	6,3	6,7	13,9	14,2		0,071
Optim 700MC Plus PI	1--4	166,7	720,6	788,2	6,1	6,5	10,9	13,9	0,61	
Optim 700MC Plus PI	1--5	214,1	705,7	783,8	6,4	6,8	10,8	13,7	0,59	
Optim 700MC Plus PI	1--6	216,1	700,9	774,5	6,9	7,2	11,7	14,9	0,57	
Optim 700MC Plus PO	2--1	139,5	757,3	808,8	4,5	5,1	11,4	11,8		0,053
Optim 700MC Plus PO	2--2	198,0	740,1	815,3	5,3	5,7	13,0	13,3		0,057
Optim 700MC Plus PO	2--3	196,3	736,8	811,9	5,1	5,5	12,1	12,4		0,057
Optim 700MC Plus PO	2--4	215,5	739,9	817,5	5,3	5,6	10,1	12,9	0,74	
Optim 700MC Plus PO	2--5	217,9	746,3	809,5	4,8	5,2	9,3	11,9	0,89	
Optim 700MC Plus PO	2--6	217,4	745,4	810,9	4,9	5,3	9,9	12,6	0,88	
Raex 400 PI	3--1	191,8	1105,8	1236,6	2,7	3,3	7,7	8,2		0,033
Raex 400 PI	3--2	183,1	1113,9	1237,5	3,0	3,7	8,2	8,7		0,034
Raex 400 PI	3--3	178,1	1117,4	1240,7	2,6	3,3	7,6	8,1		0,033
Raex 400 PI	3--4	192,9	1109,0	1247,7	2,7	3,4	6,2	8,2	0,89	
Raex 400 PI	3--5	180,0	1114,5	1248,1	2,9	3,6	6,6	8,8	0,89	
Raex 400 PI	3--6	186,9	1106,7	1234,1	2,9	3,6	6,4	8,5	0,99	
Raex 400 PO	4--1	182,4	1098,9	1274,8	2,4	3,2	5,9	6,5		0,033
Raex 400 PO	4--2	218,6	1027,2	1283,5	2,8	3,3	3,8	4,3		0,038
Raex 400 PO	4--3	183,4	1077,1	1282,0	2,7	3,4	6,5	7,0		0,036
Raex 400 PO	4--4	141,7	1177,8	1278,7	2,1	3,0	2,5	3,9	0,71	
Raex 400 PO	4--5	181,8	1101,2	1276,9	2,5	3,2	4,5	6,2	0,87	
Raex 400 PO	4--6	186,0	1099,7	1275,9	2,6	3,3	5,1	7,0	1,01	

Missä:

E on kimmomoduuli

R_{p0,2} on myötölujuus (0,2% pysyvä muodonmuutos)

R_m on murtolujuus

A_g on plastinen tasavenymä, A_{gt} on elastinen + plastinen tasavenymä

A₈₀ on plastinen murtovenymä, A_{80t} on elastinen + plastinen murtovenymä

r_{2-20/Ag} on poikittaisreduktio/paksuusreduktio mitattu alueelta 2...20% tasavenymästä A_g

Taulukko 8. Vetokokeissa mitatut paikalliset venymät ARAMIS:lla ja ekstensometrillä.

Materiaali	Tunniste	Diffuusin kurouman loppu						Murtumis piste									
		Suurin max		Kokeiden		Max 4facet		Kokeiden		Suurin max		Kokeiden		Max 4facet		Kokeiden	
		venymä [%]	ka.	ka. (%)	ka.	ka. Alueven. [log]	ka.	venymä [%]	ka.	ka. (%)	ka.	ka. Alueven. [log]	ka.	venymä [%]	ka.	ka. (%)	ka.
Optim 700 MC Plus PI	1,1	38,4		34,9		0,32		98,2		81,2		0,76					
Optim 700 MC Plus PI	1,2	32,2	37,1	29,6	33,8	N/A		64,5	88,9	56,7	75,2	0,50					0,66
Optim 700 MC Plus PI	1,3	40,6		36,8		0,34		104,0		87,8		0,71					
Optim 700 MC Plus PO	2,1	39,4		34,6		0,33		92,6		76,3		0,70					
Optim 700 MC Plus PO	2,2	40,1	39,2	35,3	34,6	0,33	0,33	78,3	87,8	64,3	72,2	0,66					0,67
Optim 700 MC Plus PO	2,3	38,0		33,8		0,32		92,4		76,1		0,65					
RAEX 400 PI	3,1	13,9		12,7		0,13		82,1		68,2		0,58					
RAEX 400 PI	3,2	10,1	12,5	9,4	11,5	0,10	0,12	79,2	79,1	66,7	64,9	0,57					0,57
RAEX 400 PI	3,3	13,7		12,4		0,13		76,1		59,9		0,55					
RAEX 400 PO	4,1	11,1		10,1		0,10		43,6		35,5		0,36					
RAEX 400 PO	4,2	N/A	10,1	N/A	9,3	N/A	0,10	56,6	50,6	40,7	41,1	0,43					0,40
RAEX 400 PO	4,3	9,1		8,5		0,09		51,7		47,0		0,41					

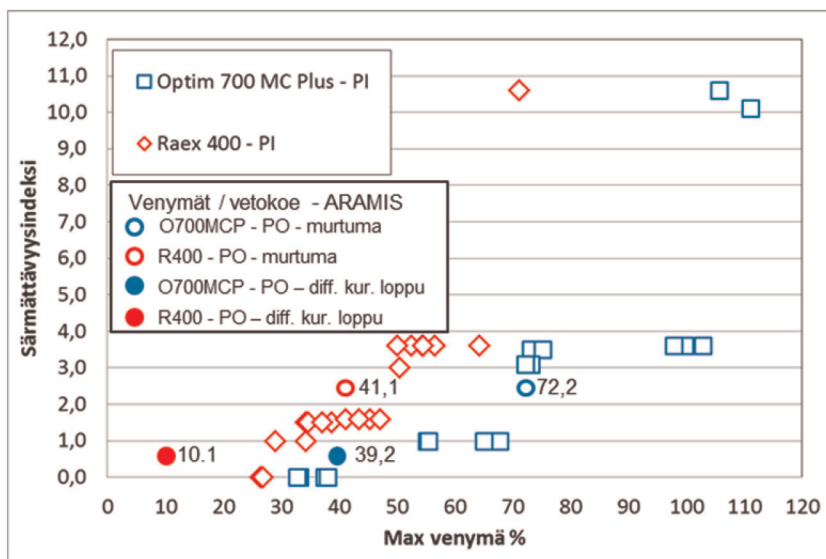
$n_{2-20/Ag}$ on muokkauslujittumiseksponentti (Hollomon)

Taulukosta nähdään, että materiaalien välillä sekä valssaussuunnan välillä on selvä ero ja toisaalta sekä diffusikuroutumisen lopussa että murtumahetkellä mitatut paikalliset maksimivenymät ovat selvästi suurempia kuin normaalissa vetokokeessa tietylle mittapituudelle määritetyt murtovenymän arvot. Myös ARAMIS-datasta yritettiin mitata vertailun vuoksi r-arvoja sekä paksuusreduktioita, mutta tulosten analysoinnissa havaittiin ongelmia, joiden vuoksi tuloksia ei tässä yhteydessä esitetä.

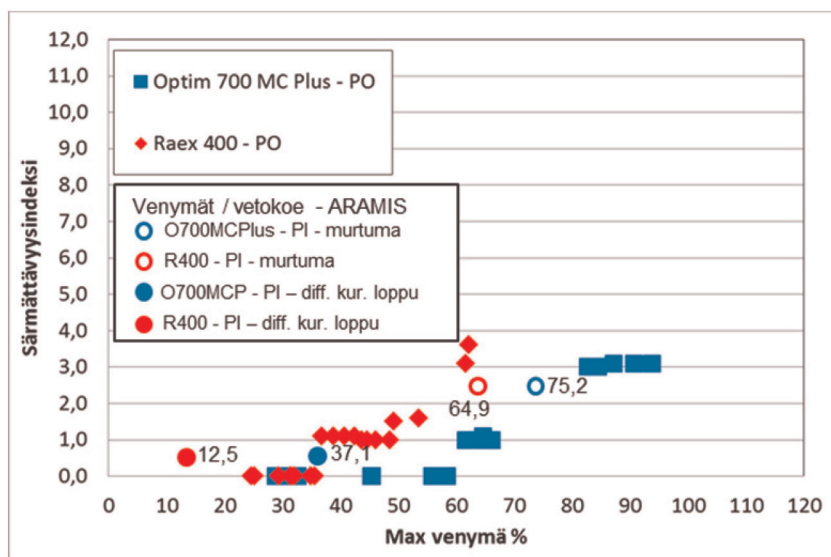
4 TULOSTEN TARKASTELU

4.1 SÄRMÄYS- JA VETOKOKEIDEN VÄLINEN KORRELAATIO

Kuvissa 27 ja 28 on tarkasteltu ARAMIS -mittauksilla saatujen maksimivenymien arvoja yhdessä pitkittäis- ja poikittaissuuntaisten särmäyskokeiden maksimivenymien ja särmättävyysindeksin määrittämisestä saatujen tulosten kanssa. Vetokokeiden venymien arvot on sijoitettu särmättävyysindeksin tasojen 1 ja 2 sekä 2 ja 3 väliin, olettaen että tässä vaiheessa levyn pinnassa muodostuu kuroumajuovia tai tapahtuu siirtyminen kuroumajuovatyypisistä pintaviasta alkavaan murtumaan. Nähdään, että vetosauvan paikallisten maksimivenymien arvot ennen murtumista ovat hyvin sopusoinnussa särmäysnäytteen pinnassa murtumahetkellä vallitsevien venymien kanssa. Voidaan siis todeta, että vetokokeen paikallisten maksimivenymien (ennen murtumaa) ja särmäyskokeen paikallisten maksimivenymien (ennen säröytymistä) välillä on lupaava yhteneväisyys. Sen sijaan diffuusikourouman lopussa vetosauvan venymät ovat selvästi pienempiä kuin särmäyksessä kuroumajuovien syntyessä. Muiden vetokokeissa saatujen parametrien suhteen korrelaatio särmäyskokeiden kanssa jäi edelleen jokseenkin epäselväksi.



Kuva 27. Särmättävyysindeksin riippuvuus mitatuista särmän ja vetosauvan (ARAMIS) maksimivenymistä (särmäyskoe pitkittäin, vetokoe poikittain).



Kuva 28. Särmättävyysindeksin riippuvuus mitatuista särmän ja vetosauvan (ARAMIS) maksimivenymistä (särmäyskoe poikittain, vetokoe pitkittäin).

4.2 VENYMÄJAKAUMAT JA SÄRMIIEN PROFIILIT

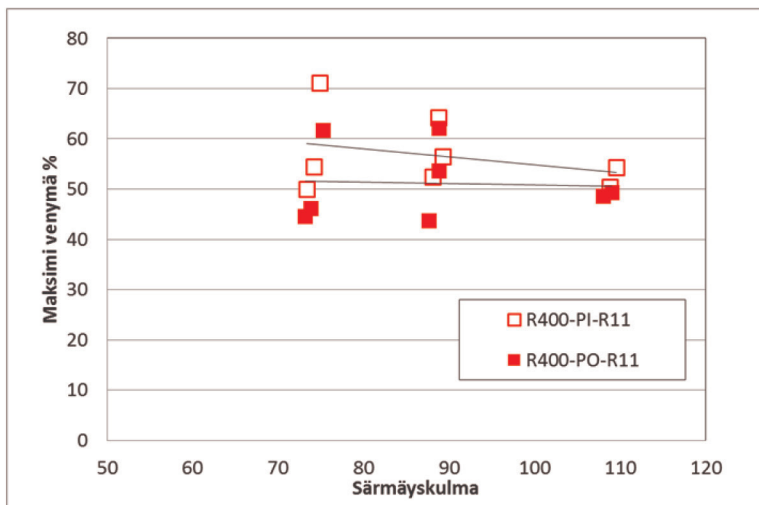
Venymäjakaumien perusteella nähdään, että pitkittäissuuntaisessa särmäyksessä venymät ovat suurempia kuin poikittaissuuntaisessa särmäyksessä. Poikkileikkaustarkasteluissa havaitaan, että oheneminen on voimakkaampaa pitkittäissuuntaisessa särmäyksessä, mistä ilmeisesti seuraa suuremmat venymät ko. suunnassa, jotka havaittiin venymämittauksissa. Vetokokeissa mitattiin joissakin tapauksissa myös r-arvot poikittais- ja pitkittäissuunnassa ja havaittiin, että Optim 700 MC Plus teräksellä r-arvo on hieman suurempi poikittaissuunnassa. Raex 400:lla ei ollut juurikaan eroa eri valssaussuuntien välillä. Vetokokeessa poikittaissuunta vastaa särmäyskokeessa pitkittäissuuntaa (särmäyslinja pitkittäin valssaussuuntaan nähden eli venyminen tapahtuu poikittain valssaussuuntaan nähden), joten teoriassa suuremman r-arvon pitäisi näkyä pienempänä ohenemisenä pitkittäissuuntaan särmättäessä. Nyt asia näyttäisi olevan kuitenkin Optim 700 MC Plus teräksellä päinvastoin eli materiaalin vetokokeessa havaitusta pienemmästä paksuussuuntaisen ohenemisen taipumuksesta huolimatta se ohenee särmäyksessä voimakkaammin ja venyy siten enemmän eli asiaa ei voi selittää r-arvon perusteella. Raex 400:lla oheneminen oli myös voimakkaampaa pitkittäissuunnassa särmättäessä, mutta r-arvot ovat molemmissa suunnissa samat, joten siinäkin tapauksessa ei voida selittää asiaa r-arvoon perustuen.

Raex 400:lla havaitaan särmäyskulman pienentyessä paikalliset venymämaksimit molemmilla puolilla maksimivenymän sivuilla. Ilmiön havaitaan voimistuvan sär-

mäyskulman pienentyessä. Poikkileikkauskuvissa havaitaan selvää mutterimaisuutta, joka selittää hyvin venymissä havaitut piikit särmien sivuilla. Optim 700 MC Plus teräksellä venymissä ei havaittu samankaltaisia piikkejä, vaikka myös sillä esiintyi jonkin verran mutterimaisuutta pienimmällä taivutussäteellä (R3 mm). Ilmeisesti mutterimaisuuden muodostuminen on kuitenkin niin heikkoa, ettei se saa aikaan samanlaista ilmiötä venymäjakaumassa. Kokeissa Optim 700 MC Plus teräksellä käytetyt taivutussäteet olivat selvästi pienempiä kuin Raex 400:lla, mutta vertailun vuoksi tehtiin Optim 700 MC Plus teräkselle koe taivutussäteellä 11 mm, jotta ero terästen välillä nähtäisiin selvemmin. Kuvissa 9b ja 10, 17-20 sekä taulukossa 6 olevien tulosten perusteella terästen käyttäytyminen on hyvin erilaista. Samoilla särmäysparametreilla Raex 400:n särmättävyysindeksi on paljon huonompi ja paksuusreduktio, maksimivenymä sekä levyn irtoaminen selvästi voimakkaampaa kuin Optim 700 MC Plus teräksellä.

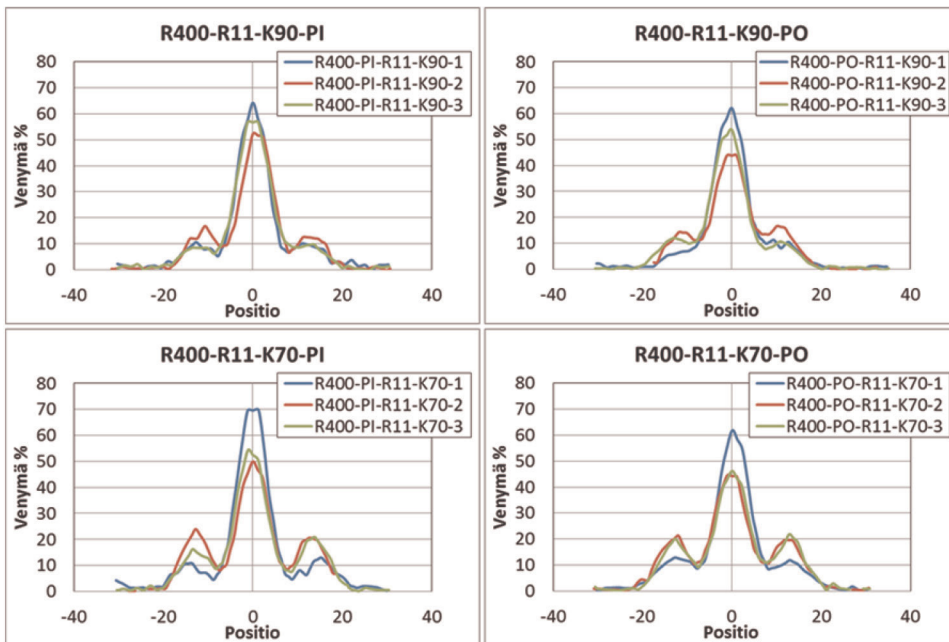
4.3 HAJONTA SÄRMÄYSKOKEIDEN VENYMISÄ

Kuvassa 29 nähdään Raex 400:n 11 mm:n painimen säteellä särmättyjen näytteiden maksimivenymät eri särmäyskulmilla. 90 ja 70 asteen särmäyksissä esiintyi hajontaa kahden ensimmäisen kokeen välillä, minkä vuoksi tehtiin kolmas toistokoe. Kuvasta nähdään, että venymäjakaumissa oleva hajonta on erittäin suuri ja kulman pienentyessä se kasvaa. Tämä voi johtua siitä, että tiukemmilla kulmilla materiaaliin alkaa tulla vaurioita, jotka voivat aiheuttaa paikallisten maksimivenymien kasvua.



Kuva 29. Eri kulmiin särmättyjen Raex 400 terästen maksimivenymien hajonta 11 mm:n taivutussäteellä.

Kuvassa 30 on esitetty 90 ja 70 asteen särmäyskokeissa mitatut venymäjakaumat. Havaitaan, että eri kokeissa jakaumat poikkeavat selvästi muodoltaan niin, että maksimivenymän ollessa pienempi, sivuilla olevat paikalliset maksimit muodostuvat korkeammiksi, mikä on ilmeisesti seurausta voimakkaammasta mutterimaisuudesta. 11 mm:n painimen säde on niin pieni, että materiaalin käyttäytyminen on muovattavuuden kannalta kriittisellä alueella ja esim. pieni ero materiaalin paksuudessa tai mekaanisissa ominaisuuksissa voi johtaa suureen poikkeamaan käyttäytymisessä särmättäessä pieniin taivutuskulmiin.



Kuva 30. Hajonta Raex 400 teräksen venymäjakaumissa 90 ja 70 asteen nimelliskulmaan särmättäessä 11 mm:n taivutussäteellä.

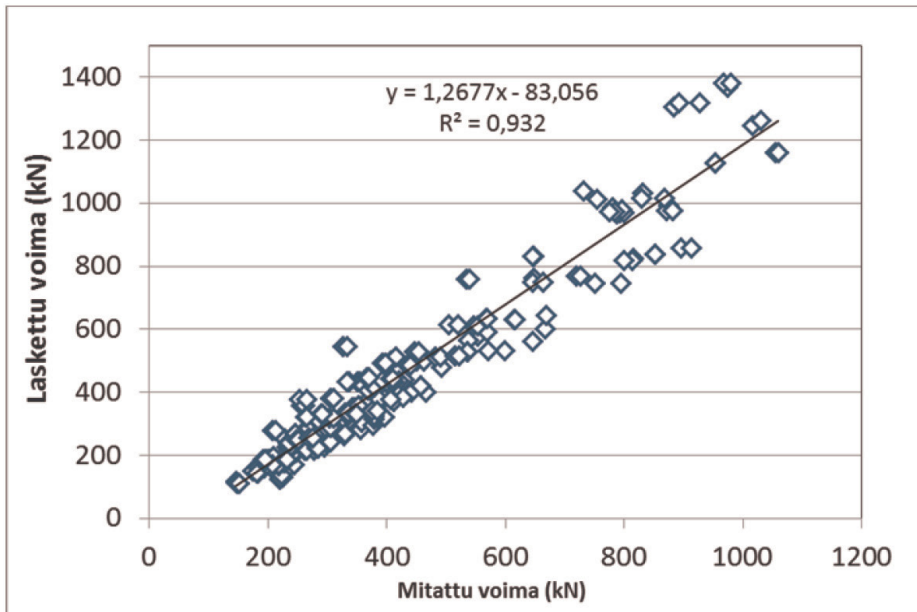
Näytteistä, joissa ero oli suurin (toistokokeet 1 ja 2, sininen ja punainen käyrä), tehtiin poikkileikkaushieet, joita on tarkasteltu kohdassa 3.1.3. kuvissa 19-22. Kuvista nähdään selvästi, että tapauksissa, joissa keskellä on suurempi venymä (toistokokeet 1, siniset käyrät), on irtoaminen suurempaa ja vastaavasti tapauksissa, joissa mutterimaisuus on voimakkaampaa ja sivuilla venymäpiikit (toistokokeet 2, punaiset käyrät), on irtoama pienempää eli vaikka mutterimaisuus ei olekaan toivottua, vähentää sen ilmaantumisen kuitenkin ilmeisesti särmän karkaamista jonkin verran. Visuaalisen tarkastelun perusteella 70 asteen kulmaan pitkittäin särmätyissä näytteissä on (Taul. 4) sekä 1 että 2 näytteessä molempia sekä mutterimaisuutta että särmän karkaamista (MU=1, SK=1). Poikittaissuunnassa särmätyissä näytteissä ei sen sijaan havaittu mut-

terimaisuutta, mutta toisessa näytteessä (toistokoe 1) oli särmän karkaamista. Ohene-
missa ja k-arvoissa ei näytä taulukon 6 mukaan olevan mitään eroa näytteiden välillä.

4.4 TAIVUTUSVOIMIEN LASKENTA

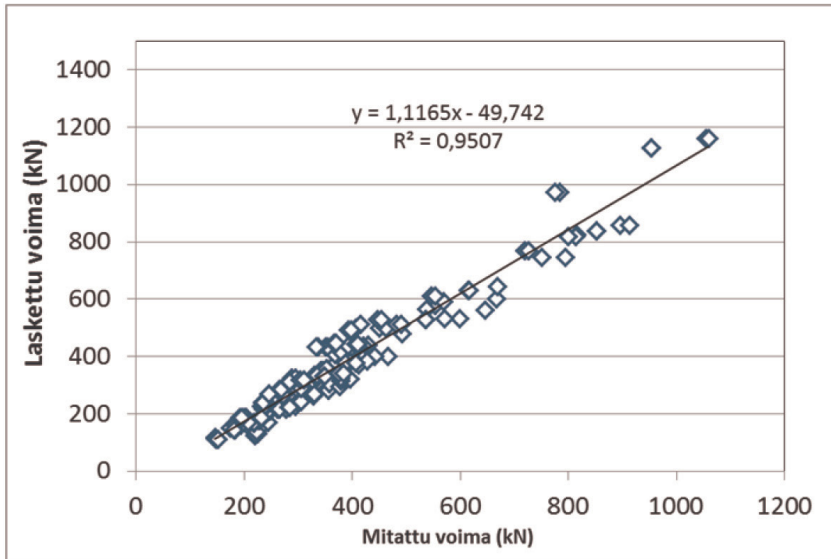
Edellä käsiteltiin voiman laskentaan käytettyjä kaavoja 3-6. Kaavat 3 ja 4 olettavat, että painimen aiheuttama kuorma on pistemäinen, eivätkä ne huomioi painimen sädettä, joka kasvaessaan suurentaa tarvittavaa voimaa. Kaavassa 5 on otettu huomioon painimen säde ja kyseisestä kaavasta on kehitetty muunnelmä (kaava 6), jossa niin ikään otetaan huomioon painimen säde. Kaavan 6 on todettu soveltuvan parhaiten yhteen koetulosten kanssa kun painimen säde ja V-aukko ovat suhteellisen pieniä, mutta suuremmilla painimen säteillä ja V-aukoilla sen on todettu antavan liian suuria voiman arvoja. Parhaiten kaava toimi 18-32 mm:n painimen säteillä [4,6]. Tätä aluetta pienemmillä painimen säteillä kaavan ennustamat voimat olivat pienempiä kuin mitatut voimat, kuten tässäkin tutkimuksessa havaitaan, kun taas suuremmilla painimen säteillä kaavan ennustamat voimat olivat hieman mitattuja suurempia.

Tässä raportissa esitettyjen särmäyskokeiden yhteydessä mitattujen taivutusvoimien tulokset yhdistettiin aiemmassa työssä [6] ja lisäksi myöhemmin tehdyissä särmäyskokeissa [10] tehtyjen voimamittausten kanssa. Kuvassa 31 on tarkasteltu mitattujen ja kaavalla 6 laskettujen voimien välistä korrelaatiota.



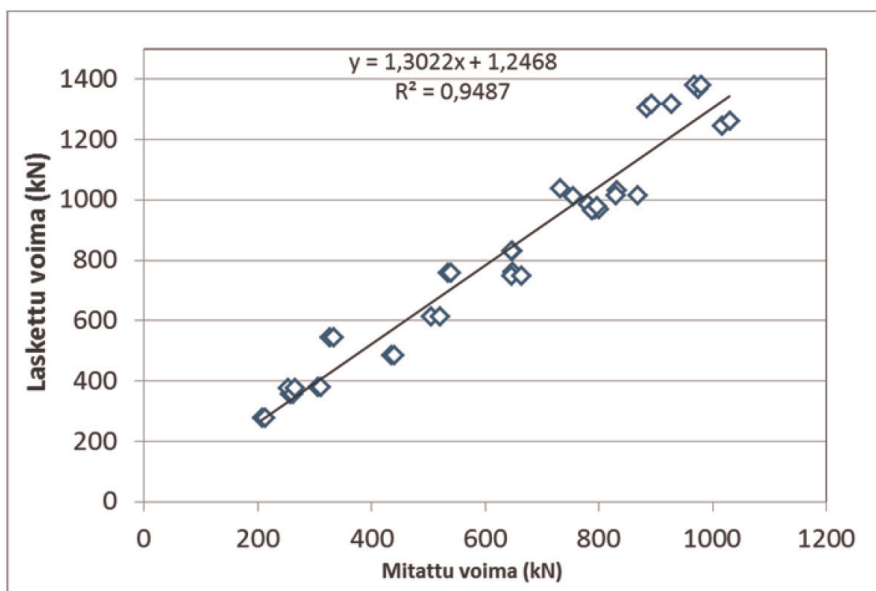
Kuva 31. Mitattujen voimien ja kaavalla 6 laskettujen voimien välinen korrelaatio.

Kuvasta 31 nähdään, että pienillä voimilla korrelaation on erittäin hyvä, mutta suuremmilla voimilla kaava ennustaa mitattuja voimia suurempia ja hajonta alkaa olla suurempi. Kuvassa 32 on tarkasteltu mitattujen voimien ja kaavalla 6 laskettujen voimien välistä korrelaatiota kun V-aukon mitat ja painimen säteet ovat ”pieniä”, $W = 50 \dots 130$ ja vastaavasti $R = 3 \dots 50$ mm.



Kuva 32. Mitattujen voimien ja kaavalla 6 laskettujen voimien välinen korrelaatio kun V-aukon mitat ovat välillä $W = 50 \dots 130$ ja painimen säteet $R = 3 \dots 50$ mm.

Kuvasta nähdään, että pienillä V-aukoilla ja painimen säteillä korrelaation on hyvä. Käytännössä lasketun arvon poikkeaminen mitatusta korostuu painimen säteen ja/tai V-aukon mitan ja levyn paksuuden kasvaessa suuremmaksi. Kuvassa 33 on tarkasteltu mitattujen voimien ja kaavan 6 ennustamien voimien välistä korrelaatiota, kun painimen säteet ja V-aukon mitat ovat ”suuria”, $W = 145 \dots 360$ mm ja vastaavasti $R = 60 \dots 140$ mm.



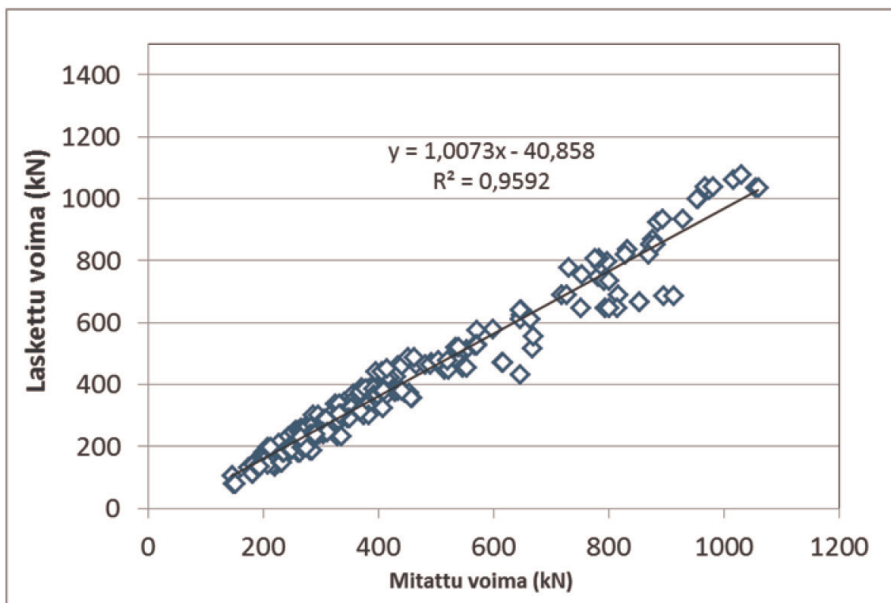
Kuva 33. Mitattujen voimien ja kaavalla 6 laskettujen voimien välinen korrelaatio kun V-aukon mitat ovat välillä $W = 145 \dots 360$ ja painimen säteet välillä $R = 60 \dots 140$ mm.

Kuvasta nähdään, että lasketut voimat ovat suurempia kuin mitatut voimat ja poikkeama kasvaa sitä suuremmaksi, mitä suurempi voimia on kyseessä. Kaavassa 6 kerroin 0,8 pysyy vakiona, jolloin suurilla V-aukoilla suhteessa levyn paksuuteen lasketut arvot ovat suurempia kuin mitatut arvot. Voiman laskentaan kehitettiin aineiston pohjalta uusi kaava 7, jossa kaavan 6 kertoimen 0,8 tilalle vaihdettiin levynpaksuuden ja V-aukon mitan sisältävä muuttuva kerroin:

$$F = \left(0,5 + \frac{4 \times t}{W} \right) \times \frac{b \times R_m \times t^2}{W - (1,5 \times R_p)} \text{ [N]}$$

Kaavassa alkuosan kerroin on samanlainen kuin Schulerin kaavassa (4b), mutta se ottaa huomioon myös painimen säteen, mitä Schulerin kaavat eivät huomioi. Kaavan edessä oleva kerroin vaikuttaa tulokseen niin, että mitä suurempi V-aukon mitta suhteessa levyn paksuuteen, sitä pienemmäksi muuttuu kertoimen arvo, mikä suurilla V-aukoilla pienentää laskettua taivutusvoimaa. Kuvassa 34 on tarkasteltu mitattujen ja kaavalla 7 laskettujen voimien välistä korrelaatiota. Kuten nähdään, on mitattujen ja laskettujen voimien välinen korrelaatio melko hyvä kattaen sekä suuret että pienet painimen säteet ja V-aukot.

Kuten aiemminkin on todettu, on edelleen huomioitava se, että kaikki kokeet on tehty korkeintaan 300 mm:n levyisellä näytteellä. Kuten aiemmin on todettu [3,4,6], kapealla näytteellä levyn reunojen vaikutus taivutusvoimaan kasvaa ja taivutusvoima ei ole tietyn leveyden alapuolella lineaarinen suhteessa leveyteen. Mitä paksumpi levy on, sitä suuremman voidaan olettaa kriittisen leveyden olevan. Kaikissa kaavoissa taivutuspuuden b vaikutuksen oletetaan olevan lineaarinen eli kun esim. leveys kaksinkertaistuu, kaavan ennustama voima myös kaksinkertaistuu. Koska kokeita ei ole tehty taivutuspuutta varioimalla, ei voida olla varmoja, onko kaavojen ennustama taivutusvoima taivutuspuuden suhteen lineaarinen etenkin kun levyn paksuus ja sitä kautta painimen säteet ja V-aukon mitat kasvavat. Tämän selvittämiseksi tarvittaisiin kokeita, joissa käytetään suurempia taivutuspuuksia ja varioidaan niitä.



Kuva 34. Mitattujen voimien ja kaavalla 7 laskettujen voimien välinen korrelaatio.

Yhteenveto

Tutkimuksessa selvitettiin 6 mm:n Optim 700 MC Plus ja Raex 400 terästen särmäyksessä vallitsevien venymien ja särmättävyyden välistä yhteyttä sekä verrattiin tuloksia vetokokeissa saatujen tulosten kanssa. Venymät mitattiin optisella venymämittausjärjestelmällä (ARGUS/ARAMIS), jolloin voidaan tarkastella paikallisia venymiä. Tavoitteena oli löytää korrelaatiota veto- ja särmäyskokeiden tulosten välillä. Lisäksi määritettiin joistakin särmätyistä näytteistä neutraaliakselin sijainti (k-arvo) ja paksuusreduktiot särmien poikkileikkauksista tehtyjen kovuusmittausten avulla. Särmäyskokeiden aikana mitattiin myös taivutusvoimia, joiden pohjalta kehitettiin mallia voiman ennustamiseksi. Tutkimuksen keskeiset tulokset ovat:

1. Optim 700 MC Plus teräksen särmättävyys on selvästi parempi kuin Raex 400:n särmättävyys. Molemmilla materiaaleilla särmättävyys on parempi särmättäessä poikittain valssaussuuntaan nähden.

2. Taivutussäteen ja -kulman pienentyessä maksimivenymä särmän ulkopinnalla kasvaa, mikä aiheuttaa pinnan säröytymistä ylittäessään tietyn rajan. Myös särmän irtoaminen ja mutterimaisuus voimistuvat taivutussäteen ja -kulman pienentyessä huonontaan särmättävyyttä.

3. Pitkittäin valssaussuuntaan nähden särmättäessä taipeen venymä ja paksuusreduktio on suurempi kuin poikittain valssaussuuntaan nähden särmättäessä. Raex 400:lla taivutuskulman pienentyessä voimistuva mutterimaisuus näkyy venymässä paikallisina maksimikohtina taipeen sivuilla.

4. Vetokokeessa mitatut paikalliset maksimivenymät ennen murtumista vastaavat melko hyvin venymiä, jotka särmäyskokeissa ovat särmäysindeksitasolla 2...3 (= kun säröjä alkaa muodostua). Särmäys- ja vetokokeen paikallisten venymien välillä on siis lupaava yhteys. Korrelaation löytäminen ja vahvistaminen vaatii lisäkokeita.

5. Taivutusvoiman ennustamiseen kehitettyä painimen säteen sisältävää mallia voidaan soveltaa ainakin painimen säteillä n. 140 mm:iin saakka V-aukon leveydellä 50...360 mm materiaalivahvuuksien ollessa n. 4...20 mm.

Kirjallisuus

1. Rissanen, T., Tekninen raportti, Ultralujien terästen käyttö ja konepajaprosessit, Tutkimus kuumavalssattujen ultralujien rakenne- ja kulutusterästen käytettävyydestä, KuURak-projekti, Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu, 2010.
2. Inline, Ruukin sidosryhmälehti 01/2012, s 33.
3. Ruoppa, R. et al. Bending properties of some ultra-high-strength steels. MetNet 2012 Izmir, TURKEY, 10-11 October 2012.
4. Ruoppa, R. et al. KuURaK-projekti, Särämäyskokeet Ruukin ultalujille teräksille. Tekninen raportti no:14, Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu 2012.
5. Kesti, V., Liimatainen, T., ORaS-projektin särämäystutkimukset. Report No. RR12811. Ruukki Metals Oy 28.12.2011. (ei julkinen)
6. Ruoppa, R. et al. 2013. Ultralujien terästen särämävyyden ja takaisinjouston määrittäminen konenäön avulla sekä taivutusvoimat. Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun julkaisuja. Sarja B. Raportit ja selvitykset/2013.
7. Rautaruukki Oyj, esite, Kuumavalssatut teräslevyt ja -kelat, Särämäys, Raex® kulutusteräksset, ultralujat Optim® QC teräksset, 2011. Luettu 1.2.2012. <http://www.ruukki.fi/~media/Finland/Files/Terastuotteet/Ruukki-Kuumavalssatut-ter%C3%A4ksset-S%C3%A4rm%C3%A4ysohje.pdf>
8. Metal Forming Handbook. Göppingen: Schuler GmbH, 1998. ISBN 3-540-61185-1.
9. TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG, Technical information, Bending technology, 10/2006. Luettu 1.2.2012. http://www2.trumpf.com/3.img-cust/Library_Bending_Technology_2006-10.pdf
10. Ruoppa, R. Särämäyskokeet Raex 500 ja Ramor -teräksille, JTS-p./tekninen raportti no:2, Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu, 2013.

Tässä raportissa on esitetty SURO2 (Superterästen Rakenteen Optimointi) projektissa Kemi-Tornion ammattikorkeakoululla Materiaalien Käytettävyyden Tutkimusryhmässä (MKT) tehtyjen särmäyskokeiden tulokset. Työn tavoitteena oli tutkia vetokokeiden ja särmättävyyden välistä korrelaatiota vertailemalla vetokokeista saatavia materiaaliparametreja särmäyskokeissa näytteestä mitattujen venymäarvojen kanssa ja etsiä niiden välistä yhteyttä särmättävyyteen. Koemateriaaleina olivat 6 mm:n Optim 700 MC Plus ja Raex 400 teräkset, jotka särmättiin erilaisiin kulmiin käyttäen erilaisia painimen säteitä, minkä jälkeen taipeesta mitattiin venymäjakaumat optisella venymämittaussjärjestelmällä (ARGUS). Särmäyksessä vallitsevien venymien ja särmättävyyden välistä yhteyttä verrattiin vetokokeissa saatujen tulosten kanssa. Vetokokeissa käytettiin venymien mittauksessa ekstensometrin lisäksi myös optista venymämittaussjärjestelmää (ARAMIS). Lisäksi määritettiin joistakin särmätyistä näytteistä neutraaliakselin sijainti (k-arvo) ja paksuusreduktiot särmien poikkileikkauksista tehtyjen mikroskooppitarkastelujen ja kovuusmittausten avulla. Särmäyskokeiden aikana mitattiin myös taivutusvoimia, joiden pohjalta kehitettiin mallia voiman ennustamiseksi.