

## Reiänlaajennuskokeiden vertailu

BFCC

Toni Akola

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelman opinnäytetyö  
Konetekniikka  
Insinööri (AMK)

KEMI 2013

## ALKUSANAT

Haluan kiittää tutkijayliopettaja Timo Kauppia opinnäytetyön aiheesta ja työn ohjauksesta sekä DI Jukka Joutsenvaaraa työn valvomisesta. Lisäksi haluan kiittää Outokummun tutkimusinsinööri Timo Mannista työn aikana antamistaan ohjeista ja kommenteista.

## TIIVISTELMÄ

## KEMI-TORNION AMMATTIKORKEAKOULU

Koulutusohjelma:	Kone- ja tuotantotekniikka
Opinnäytetyön tekijä:	Toni Akola
Opinnäytetyön nimi:	Reiänlaajennuskokeiden vertailu
Sivuja (joista liitesivuja):	55 (13)
Päiväys:	10.12.2013
Opinnäytetyön ohjaaja:	Tutkijayliopettaja Timo Kauppi
<p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli perehtyä kahteen erilaiseen reiänlaajennusmenetelmään. Tarkoitus oli selvittää millä tavoin reiänlaajennuskokeet eroavat toisistaan, ja tutustua tarkemmin vanhaan KWI reiänlaajennusmenetelmään. Tutkimuksia tehtiin seitsemälle Outokummun ruostumattomalle teräkselle sekä kahdelle Ruukki Metals Oy:n valmistamalle kylmävalssatulle hiiliteräkselle. Kaikki reiänlaajennustestit suoritettiin Kemi- Tornion ammattikorkeakoulun rikkovan aineenkoetuksen laboratoriossa.</p> <p>Työssä oli myös tarkoitus tutkia, korreloivatko materiaalien molemmilla reiänlaajennusmenetelmillä saadut tulokset keskenään. Korrelaatiota tutkittiin kuudella Outokummun teräksellä sekä kahdella Ruukin teräksellä.</p> <p>Työ aloitettiin KWI- reiänlaajennuskokeessa käytettävän painimen suunnittelulla ja teoriaan tutustumalla. Aiheesta saatavilla olevan tiedon vähyys ja oman tiedon puute aiheuttivat alussa ongelmia. Työn aikana tehdyt reiänlaajennuskokeet suoritettiin Erichsen 145-60- muovaustutkimuslaitteella, jolla tehtiin myös suurin osa testilevyjen alkurei'istä. Työssä käytettiin myös lämpökameraa sekä Aramis/Argus kamerajärjestelmää.</p> <p>Työn aikana suoritettujen reiänlaajennustestien onnistuivat hyvin, vaikka muutaman materiaalin kohdalla tuloksiin tuli virheitä. Tuloksista saatiin selville että, ISO- reiänlaajennuskoe aiheuttaa paljon pienemmät venymät ja lämpötilan nousut testattavaan kappaleeseen kuin KWI- testi. KWI- testi ei myöskään muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta laajenna reikää yhtä paljon kuin ISO- testi. Työn aikana saatiin selville myös, että reiänlaajennuskokeissa syntyvän murtuman havainnointi on helpompaa silmällä kuin lämpökameran avulla.</p>	
Asiasanat: teräs, muovaus, lämpötila, voitelu.	

## ABSTRACT

## KEMI-TORNIO UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Degree programme:	Mechanical and Production Engineering
Author(s):	Toni Akola
Thesis title:	Comparison of hole expansion tests
Pages (of which appendixes):	55 (13)
Date:	10 December 2013
Thesis instructor(s):	Timo Kauppi MSc (information tech)
<p>The purpose of this study was to get familiar with two different hole expansion methods. The main objective was to examine what differences two hole expansion tests have and study the theory of the old KWI- hole expansion test. Researches were made on seven stainless steels made by Outokumpu and two cold rolled carbon steels made by Ruukki Metals Oy. All hole expansion tests were carried out in Kemi-Tornio University of Applied Sciences.</p> <p>In this study was also examined the tests results and if the results correlate. The correlation was examined in six steels by Outokumpu and two steels by Ruukki Metals Oy.</p> <p>Firs the theory of hole-expansion test was studied and in the beginning was designed to the pusher tool. The information of the subject and the knowledge of the hole expansion tests were minor and that was the reason for the problems in the beginning. The hole expansion tests were made with Erichsen 145-60 machine and the prime holes were made with the same machine. In this test was also used thermal camera and Aramis/Argus camera system.</p> <p>The hole-expansion tests succeeded well although a couple of materials results were incorrect. The results showed that the ISO hole expansion test makes smaller stretch than the KWI hole expansion test. The study also showed that the temperature raises less in the ISO test than the KWI test. Usually the KWI test did not increase the hole so much as the ISO test. During the study was noticed that the cracking observation was easier by eye with the help of thermal camera.</p>	
<p>Keywords: steel, modeling, temperature, lubrication</p>	

## SISÄLLYS

ALKUSANAT .....	2
TIIVISTELMÄ .....	3
ABSTRACT .....	4
SISÄLLYS .....	5
KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET .....	7
1 JOHDANTO .....	8
2 MUOVATTAVUUDEN TUTKIMINEN.....	9
2.1 Reiänlaajennuskokeen menetelmät .....	10
2.1.1 ISO- standardin mukainen reiänlaajennusmenetelmä.....	10
2.1.2 KWI- reiänlaajennuskoe.....	12
2.2 Työkalun suunnittelu .....	13
3 KOEMATERIAALIT JA- MENETELMÄT.....	14
3.1 Koemateriaalit .....	14
3.2 Kokeiden suoritus.....	15
3.3 Työssä käytetyt laitteet.....	15
3.3.1 Erichsen 145–60 –muovaustutkimuslaitteisto.....	16
3.3.2 Aramis/Argus- venymämittaajajärjestelmä.....	17
3.3.3 Lämpökamera.....	17
4 KOKEELLINEN OSUUS .....	19
4.1 KWI- testin työkalut.....	19
4.2 Reiänlaajennuskokeiden vertailu.....	19
4.3 Korrelaation määrittäminen .....	20
5 TULOKSET.....	21
5.1 Reiänlaajennusmenetelmien vertailu.....	21
5.1.1 Mittauksen epätarkkuus .....	21
5.1.2 Venymäjakaumat.....	22
5.1.3 Lämpötilan kehitys.....	24
5.2 Korrelaation määrittäminen .....	25
6 TULOSTEN KÄSITTELY .....	29
6.1 Reiänlaajennusmenetelmien vertailu.....	29
6.1.1 Mittauksen epätarkkuus .....	29
6.1.2 Venymäjakaumat.....	29

6.1.3	Lämpötilan kehitys.....	31
6.2	Korrelaation määrittäminen.....	33
6.3	Reiänlaajennuskokeiden erot.....	35
6.4	Yhteenveto.....	37
7	POHDINTA.....	39
	LÄHTEET.....	41
	LIITTEET.....	42

## KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

TKI	Tutkimus Kehitys Innovaatiot
BFCC	BioForeConceptCar
KWI	Kaiser Wilhelm Institut

## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Kemi- Tornion ammattikorkeakoulu tekniikka, TKI materiaalien käytettävyyden tutkimusryhmä ja työ tehtiin osana TEKES - rahoitteista BioForeConceptCar-projektia.

Opinnäytetyössä tutkittiin Outokummun ruostumattomien terästen, sekä Rautaruukin terästen reiänlaajennettavuuksia. Testattavaksi valittiin yhteensä yhdeksän eri teräsläätettä, joille tehtiin ISO 16630 -standardin mukainen, sekä KWI- reiänlaajennuskoe.

Työn alussa suunniteltiin KWI- reiänlaajennuskokeen mukainen painin, joka valmistettiin Jaloterässtudiolla. Samalla selvitettiin KWI- reiänlaajennuskokeeseen liittyvää teoriaa. Painimen valmistumisen jälkeen aloitettiin reiänlaajennuskokeet Outokummun ruostumattomalle teräkselle EN 1.4016. Kyseiselle materiaalille tehtiin useita reiänlaajennuskokeita molemmilla testausmenetelmillä ja selvitettiin reiänlaajennusmenetelmien välisiä eroja. Tälle materiaalille tehdyissä testeissä tutkittiin myös, kappaleen lämpötilojen muutoksia testin aikana, sekä kappaleeseen syntyviä venymiä.

Lopuille testaukseen tuleville materiaaleille tehtiin reiänlaajennuskokeet molemmilla reiänlaajennusmenetelmillä. Testien jälkeen materiaaleille laskettiin reiänlaajennussuhteet ja tutkittiin korreloivatko eri materiaalien ISO- ja KWI- reiänlaajennuskokeiden tulokset keskenään.

Työssä päällimmäisenä tavoitteena oli tutustua vanhaan KWI- reiänlaajennusmenetelmään ja tutkia sillä saatuja tuloksia ja vertailla niitä ISO- testillä saataviin tuloksiin.



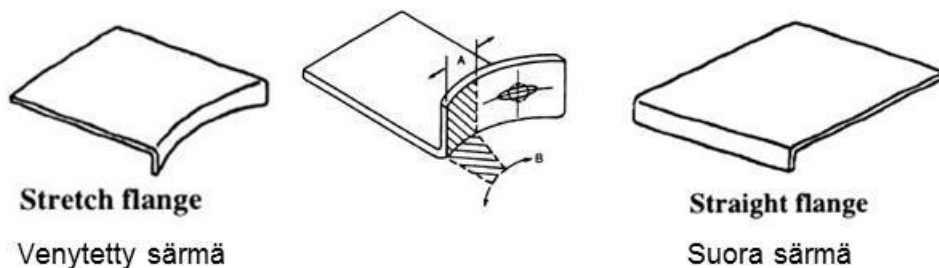
## 2 MUOVATTAVUUDEN TUTKIMINEN

Levynmuovaus jaetaan levyyn kohdistuvien muovaavien jännitysten mukaan kahteen eri menetelmään. Näitä menetelmiä ovat venytysveto sekä syväveto. Venytysvedossa materiaalia venytetään voimakkaasti levyn tason suunnassa. Tuloksena levy ohenee voimakkaasti, joka voi johtaa lopulta aihion murtumiseen. Syvävedossa muovattava levyaiho vedetään painimen avulla vetorenkaaseen. Aihion liukuessa vetosärmän yli ulkokehä pienenee ja tyssääntyy. Tällöin levyn ohenemista ei tapahdu samalla tavoin kuin venytysvedossa. Syvävedetyssä tuotteessa seinämän paksuus pysyy alkuperäisenä tai saattaa jopa kasvaa hiukan. Käytännön levynmuokkausprosesseissa näitä muovaustyyppäjä saattaa esiintyä samanaikaisesti. (Kivivuori Seppo, Tekninen raportti, 2011)

Muovattaviin kappaleisiin joudutaan tekemään usein reikiä, jotka muuttavat kappaleen ominaisuuksia. Tästä johtuen on erittäin tärkeää selvittää, miten kappaleen ominaisuudet käyttäytyvät reikää tehdessä. Reiänlaajennuskokeiden avulla tutkitaan reiän reunojen muovattavuutta. Reiänlaajennuskokeessa näytteeseen stanssattua reikää laajennetaan painimen avulla. Reiänlaajennuskokeet tehdään Erichsen 145–60 - muovaustutkimuslaitteella.

Reiänlaajennustestillä tutkittava ominaisuus on myös nk. ”Stretch flangeability”.

Auton osissa käytetään yleisesti muovausteknologiaa, jossa yhdistyy venytysmuovaus ja särmäys eli syntyy särmä, jolla on tietty kaarevuussäde. Venyttävän särmäyksen periaate nähdään kuvassa 1. Teräksen soveltuvuutta tällaiseen muovausprosessiin voidaan tutkia reiänlaajennustestillä.



Kuva 1. Venyttävän särmäyksen periaate. (Saikat K. D, Anjana D, Siddhartha M, & Bimal K, 2011, 37 – 42; Asnafi R, 1999, 198 – 214.)

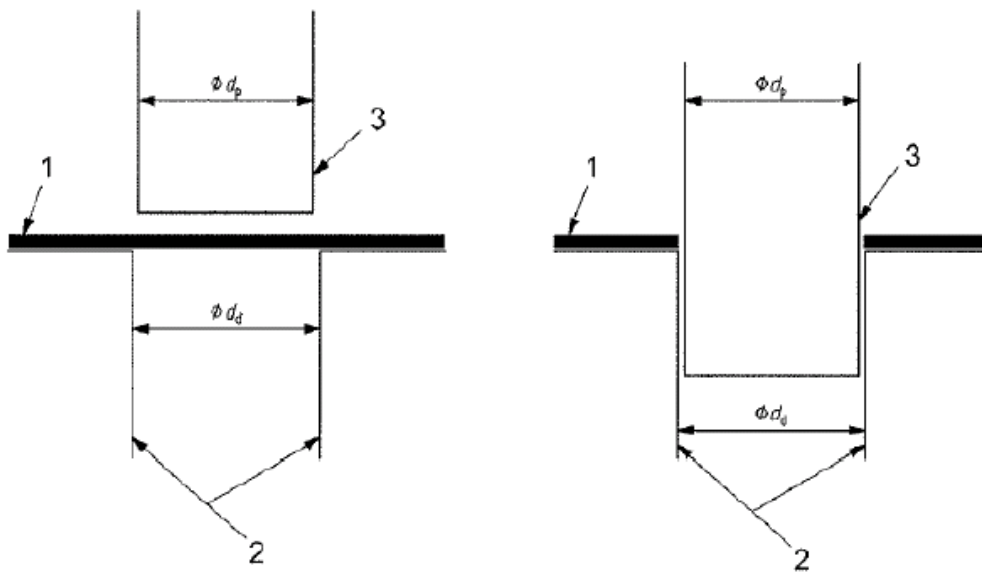
## 2.1 Reiänlaajennuskokeen menetelmät

Reiänlaajennusmenetelmiä on kahdenlaisia. ISO 16630 standardin mukainen menetelmä, sekä vanha KWI- reiänlaajennusmenetelmä. Reiänlaajennusmenetelmät eroavat toisistaan muun muassa painimen muodon perusteella.

### 2.1.1 ISO- standardin mukainen reiänlaajennusmenetelmä

ISO 16630 standardin mukaisessa reiänlaajennuskokeessa painimena käytetään kartionmuotoista työkalua. Reiänlaajennuskoetta voidaan käyttää 1,2 – 6 mm metallinauhujen ja – levyjen testaukseen, joiden vähimmäisleveys on 90 mm. ISO- standardin mukainen reiänlaajennuskoe suoritetaan kahdessa eri vaiheessa.

Ensimmäisessä vaiheessa testattavaan levyyn tehdään 10 mm halkaisijaltaan olevia reikiä. Yhteen testilevyyn tehdään kolme reiänlaajennuskoetta, siten että reikien halkaisijoiden etäisyys toisistaan on vähintään 90 mm. Reunimmaisten reikien vähimmäisetäisyys levyn reunasta tulee olla vähintään 45 mm. Reiät tehdään stanssaamalla ja työkaluna käytetään standardin mukaista paininta.

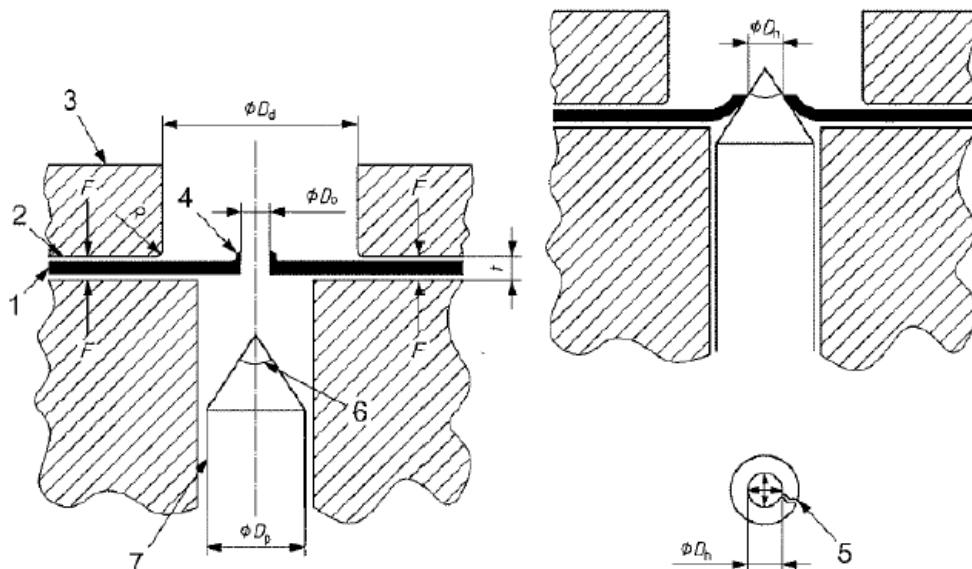


Kuva 2. Reiänläivistyksen periaatekuva ennen lävistystä ja sen jälkeen. 1=koekappale, 2=tyyny, 3= lävistin,  $d_p$ = lävistimen halkaisija,  $d_d$ = tyynyn sisähalkaisija. (ISO 16630:2009(E))

Reiän lävistämisen jälkeen aloitetaan toinen vaihe, jossa reikää laajennetaan kartionmuotoisella painimella. Kappaleen pidätinvoiman tulee olla tarpeeksi suuri, jotta materiaalin virtaaminen saadaan estettyä. Painimen liike tulee pysäyttää heti, kun havaitaan levyn paksuuden läpi tunkeutunut murtuma. Tässä työssä pidätinvoimana käytettiin 50kN ja muovausnopeutena 15mm/min. Koekappaleen reiän halkaisija  $D_h$  mitataan kahdesta eri kohdasta ja niiden keskiarvolla lasketaan reiänlaajentumissuhde kaavalla (1).

$$\lambda = \frac{(D_h - D_0)}{D_0} \times 100 \quad (1)$$

, missä  $\lambda$  on reiänlaajennussuhde [%],  $D_h$  on reiän halkaisija laajennuksen jälkeen [mm] ja  $D_0$  on reiän halkaisija ennen koetta [mm].



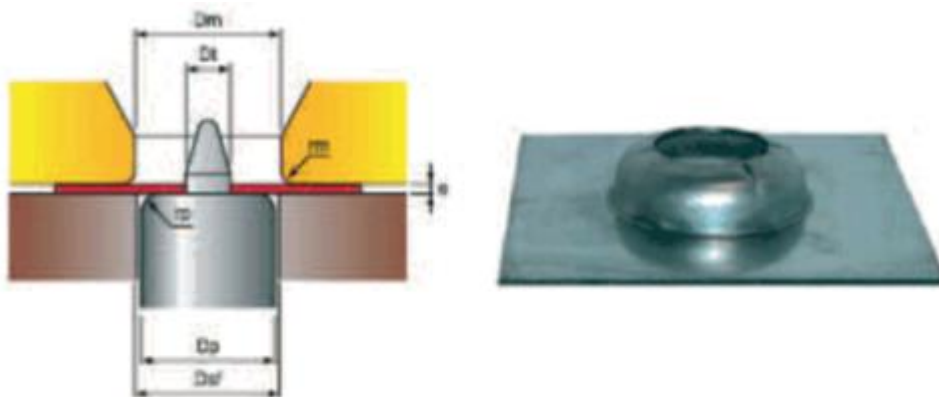
Kuva 3. Reiänlaajennuksen periaatekuva ennen ja jälkeen testin. 1=koekappale, 2=vetorengas, 3=vetorengaan vastinpinta, 4=lävistys, 5=murtuma, 6=purse,  $D_d$ = vetorengkaan sisähalkaisija,  $D_p$ = lävistimen alahalkaisija,  $D_h$ = reiän halkaisija murtuman jälkeen. (ISO 16630:2009(E))

### 2.1.2 KWI- reiänlaajennuskoe

KWI reiänlaajennuskokeessa käytetään typpäpäistä paininta. Painimen kärjessä on kohdistustappi, jonka avulla näytelevy saadaan kohdistettua keskelle paininta. KWI-menetelmää voidaan käyttää 1,2 – 3 mm paksuisten metallinauhojen ja –levyjen testaukseen, joiden vähimmäisleveys on 100 mm. Testilevyn pituus olisi hyvä valita siten, että siihen mahtuu vähintään kolme reiänlaajennuskoea. Reunimmaisten reikien tulisi olla vähintään 100mm levyn reunasta ja reikien keskipisteiden etäisyys toisistaan vähintään 150mm.

KWI- reiänlaajennuskoe suoritetaan ISO- standardin mukaisen testin tavoin kahdessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa, tehdään 10mm halkaisijaltaan oleva alkureikä samalla työkalulla kuin ISO- standardin mukaisessa testissä. Alkureiän teon jälkeen aloitetaan itse reiänlaajennuskoe. Levy asetetaan muovauskoneeseen siten, että alkureiän stanssauksessa tulleet purseet, tulevat levyn yläpuolelle. Jokaisessa testissä purseet laiteaan aina samalla tavoin levyn yläpuolelle. Tällä säästetään paininta kulumiselta ja saadaan tältä osin vertailukelpoisia tuloksia ISO- testin kanssa. KWI- reiänlaajennuskokeessa olisi myös tarpeellista käyttää voitelua, sillä testin muovaava vaikutus on niin suuri.

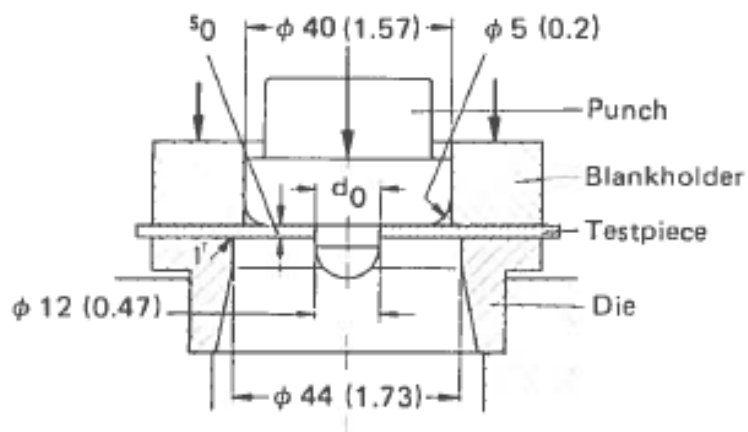
Itse reiänlaajennuskokeessa paininta työnnetään niin pitkälle, kunnes huomataan jonkinlainen aineen paksuuden läpi menevä murtuma. Kokeessa muovausnopeutena käytetään 15mm/min ja levypidinvoimana 600kN.



Kuva 4. KWI- reiänlaajennuskokeen alkutilanne ja laajennettu reikä. (Manninen Timo, 2012.)

## 2.2 Työkalun suunnittelu

KWI- reiänlaajennuskokeessa tarvittavaan painimen suunnitteluun saatiin mittoja muutamista reiänlaajennusta käsittelevistä artikkeleista. Suunnittelussa käytettiin apuna alla olevan kuvan lisäksi ISO standardin mukaista paininta.



Kuva 5. Painimen mitoituksessa apuna käytetty kuva. ( Lange Metal Forming hand-book, 1813-1814)

### 3 KOEMATERIAALIT JA- MENETELMÄT

Tässä opinnäytetyössä tehtiin reiänlaajennuskokeet molemmilla aiemmin työssä esitellyillä menetelmillä yhteensä yhdeksälle eri materiaalille. Materiaalin paksuudet vaihtelivat 1,5 – 3 mm välillä. Tutkittavina materiaaleina oli kylmävalssattuja ruostumattomia ja hiiliteräksiä.

#### 3.1 Koemateriaalit

Outokummulta toimitettiin työtä varten seitsemää erilaista ruostumatonta teräslaatua. Terästen ohjeelliset kemialliset koostumukset ja mekaaniset ominaisuudet on annettu taulukossa 1.

Taulukko 1. Outokummun materiaalien ominaisuudet. (Outokummun www-sivut 2013, hakupäivä 20.5.2013).

Materiaali	C % max.	Cr %	Ni %	Mo %	Muut %	Rp0,2 min. N/mm*2	SS 14...	ASTM A-240	Kuvaus/Käyttö
1.4016	0,08	17	-	-	-	280	2320	430	17- Krominen yleisteräs
1.4003	0,03	11	0,5	-	-	320	-	S41003	12- Krominen rakenneteräs
1.4404	0,03	17	10,5	2	-	240	2348	316L	Niukkahiilinen haponkestävä teräs
1.4162	0,03	21,5	1,5	0,3	5Mn				
1.4318	0,03	17	7	-	N	350	-	301LN	Ruostumaton rakenneteräs
1.4521	0,02	18	-	2	Ti/Nb	320	2326	444	Kuumavesivaraajateräs
1.4301	0,07	18	8	-	-	230	2333	304	Ruostumaton yleisteräs

Ruukki Metals Oy:ltä Hämeenlinnasta toimitettiin testiä varten kahta eri materiaalia. Terästen ohjeelliset kemialliset koostumukset ja mekaaniset ominaisuudet on annettu taulukossa 2.

Taulukko 2. Ruukki Metals Oy:n materiaalien ohjeellinen kemiallinen koostumus ja mekaaniset ominaisuudet. (Rautaruukin www-sivut 2013, hakupäivä 11.11.2013)

Materiaali	C %	Si %	Mn %	Cr %	Ti %	B %	P %	S %	Nb %	Al %	Re Mpa	Rm Mpa
HX 420 LAD	< 0,11	< 0,5	< 1,4	-	< 0,15	-	< 0,03	< 0,025	< 0,09	> 0,15	420-520	470-590
B24+ZF100-B	0,24	0,25	1,2	0,03	0,04	0,002	-	-	-	-	300	500

### 3.2 Kokeiden suoritus

Ensimmäisen vaiheen materiaalille EN 1.4016 tehtiin useita reiänlaajennuskokeita molemmilla menetelmillä. Tämän materiaalin avulla tutkittiin KWI- reiänlaajennusmenetelmää, sekä vertailtiin sitä ISO- standardin mukaiseen reiänlaajennuskokeeseen. Materiaalille tehtiin lämpökamerakuvaukset, sekä kuvattiin molempien testien aikana syntyviä venymiä Aramis/Argus venymämittaussjärjestelmällä.

Toisen vaiheen kuudelle materiaalille suoritettiin molemmilla menetelmillä reiänlaajennuskokeet. Toisen vaiheen materiaaleista 1.4404 materiaalille suoritettiin myös lämpökamerakuvaus. Tutkimuksen toisessa vaiheessa oli tarkoituksena tutkia eri laatuisten reiänlaajennussuhteita ja tutkia korreloivatko ISO- ja KWI- testien tulokset keskenään.

### 3.3 Työssä käytetyt laitteet

Opinnäytetyössä käytettiin useita erilaisia laitteita. Eniten työn aikana käytettiin Erichsen 145-60 muovaustutkimuslaitteistoa, Aramis/Argus- venymämittaussjärjestelmää sekä lämpökameraa.

### 3.3.1 Erichsen 145–60 –muovaustutkimuslaitteisto

Erichsen 145–60 muovaustutkimuslaitteiston avulla suoritettiin kaikki työssä tehdyt reiänlaajennuskokeet. Laitteen avulla tehtiin myös muutamaa materiaalia lukuun ottamatta kaikkiin testattaviin levyihin alkureiät. Työkaluja vaihtamalla laitteella pystytään reiänlaajennuskokeiden ja reikien teon lisäksi tekemään mm. Nakajima- testiä sekä Erichsenin kuppivenytyskoetta.



Kuva 6. Erichsen 145–60 -muovaustutkimuslaitteisto. (Erichsen www-sivut 2013, hakupäivä 4.2.2013).

Koneen suurin mahdollinen työntövoima sekä levypidinvoima on 600kN. Voimien säätäminen onnistuu koneen omalta ohjaustaululta tai kuten tässä työssä tietokoneella olevalla MES ohjelmalla. Tietokoneella olevalta ohjelmalta nähdään suurin muovauksessa tarvittava voima, testissä kulunut aika sekä paininta työntävän sylinterin liike. Testien tulokset saadaan tarvittaessa tallennettua myös sähköisesti. Muovauskoneen suurin mahdollinen paininta työntävän sylinterin liike on 150mm. (Erichsen www-sivut 2013, hakupäivä 4.2.2013).





Kuva 7. Erichsen 145–60 muovauskoneen ohjaustaulu

### 3.3.2 Aramis/Argus- venymämittausjärjestelmä

Aramis/Argus- järjestelmällä kuvataan kappaleen kolmiulotteisia pinnanmuotoja. Laitteeseen sisältyy kaksi viiden megapikselin kameraa ja mittausdataa käsittelevä tietokone, siihen kuuluvine ohjelmistoineen. Aramiksella kuvataan testejä, joissa tapahtuu liikkettä ja materiaalin muodonmuutosta. Aramis myös mittaa kappaleen venymiä ja jännityksiä. (Rissanen Tiina / Joutsenvaara Jukka, Aramis Venymäanalysointin käyttöohje, Kemi-Tornion amk, Tekninen raportti, Kemi, 8.4.2013)

### 3.3.3 Lämpökamera

Lämpökameran avulla oli tarkoitus tutkia kappaleen lämpötilan muutoksia testien aikana. Työssä myös tutkittiin, kummalla reiänlaajennusmenetelmällä lämpötilat kehittyvät testin kannalta parhaiten. Yritetään myös selvittää, näkyykö materiaaliin tuleva halkeama paremmin lämpökameralla, kuin silmällä. Lämpökameralla kuvataan ensimmäisen vaiheen materiaalia, sekä yhtä toisen vaiheen materiaalia.

Lämpökameran asennettiin Aramis- järjestelmän valonlähteeseen kiinni nippusiteillä. Tällä tavoin saimme kameran suoraan katselureiän ympärille, siten että testi näkyy lämpökameralla sekä Aramis- kameroilla. Ennen lämpökamerakuvausta jouduimme maa- laamaan näytelevyt mattamaalilla.



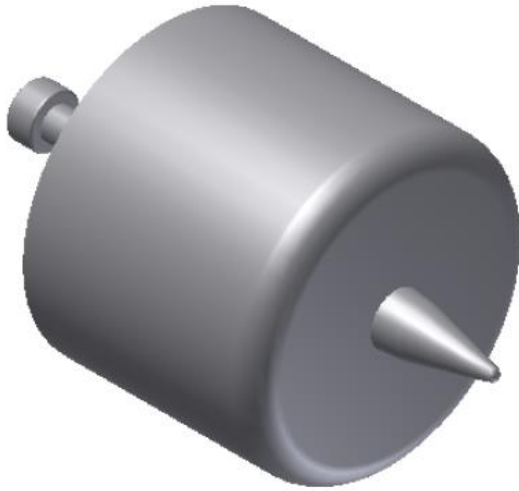
Kuva 8. Lämpökameran kiinnitys Aramis- kamerajärjestelmään.

## 4 KOKEELLINEN OSUUS

Kokeellisessa osuudessa suoritettiin työn vaatimat reiänlaajennustestit. Testit tehtiin Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun rikkovan aineenkoetuksen laboratoriossa. Ennen testien suorittamista suunniteltiin ja valmistutettiin KWI- testin vaatimat työkalut.

### 4.1 KWI- testin työkalut

Opinnäytetyössä ensimmäisten työvaiheiden joukossa tiedonhankinnan ohella oli suunnitella ja valmistuttaa KWI- reiänlaajennuskokeessa käytettävä painin. Painimen mitoituksessa apuna käytettiin ISO 16630 standardin mukaista paininta. Tärkeimmät mitat saatiin selvitettyä vanhoista artikkeleista. Painimen suunnittelu toteutettiin Autodesk Inventor 3D ohjelman avulla, jolla tehtiin painimesta täydelliset työpiirustukset. Piirustusten avulla kappale valmistutettiin koneistamalla.



Kuva 9. KWI- reiänlaajennuskokeen painin.

### 4.2 Reiänlaajennuskokeiden vertailu

Työn ensimmäisessä vaiheessa oli tarkoituksena vertailla KWI- sekä ISO- reiänlaajennusmenetelmiä. Testimateriaalina käytettiin pelkästään Outokummun EN 1.4016 ferriittistä ruostumatonta terästä. Materiaalille tehtiin useita reiänlaajennuskokeita molemmilla menetelmillä, joilla pyrittiin selvittämään seuraavia asioita:

- Mittauksen epätarkkuus.
- Venymätila laajennettavan reiän ympärillä.
- Venymän muuttuminen etäisyyden funktiona laajennettavan reiän ympärillä.
- Lämpötilan kehittyminen reiän ympäristössä.
- Onko lämpökamerasta apua rikkouman havainnoinnissa?.

Mittauksen epätarkkuutta tutkittiin mittaamalla laajennettujen reikien halkaisijoita. Tässä yhteydessä oli tarkoitus selvittää, kummalla menetelmällä laajennetun reiän halkaisija on helpompi mitata. Jokaisesta laajennetusta reiästä otetaan kaksi eri mittausta, joiden keskiarvojen mukaan laskettiin reiänlaajentumissuhde. Mittauksen epätarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat mm. reiän muoto ja reiän reunoihin syntyneet murtumat.

Venymätilaa laajennettavan reiän ympärillä sekä venymän muuttumista etäisyyden kasvaessa tutkittiin kuvaamalla testejä Aramis/Argus kamerajärjestelmällä. KWI- testin kuvaus onnistui Aramiksella, mutta ISO- testin kuvaukseen jouduttiin käyttämään Argus kameraa. Tämä johtui siitä että ISO- testissä reiän ympäristö kohoaa reiän laajetessa ja peittää kameroiden näkyvyyden. Ennen Argus kuvausta näytelevyyn syövytettiin palomainen kuvio. Kuvion syövytyksen jälkeen tehtiin reiänlaajennuskoe, jonka jälkeen suoritettiin kuvaukset.

Kappaleen venymät laajennetun reiän ympäristössä määritettiin kuvausten jälkeen Aramis- järjestelmään tallennetusta tiedosta.

#### 4.3 Korrelaation määrittäminen

Korrelaation määrittämistä varten oli varattuna yhteensä 8 eri materiaalia. Kuusi materiaalia Outokummulta ja kaksi materiaalia Rautaruukilta. Kaikille materiaaleille tehtiin reiänlaajennuskokeet molemmilla menetelmillä. Materiaaleille laskettiin reiänlaajentumissuhteet, joiden avulla pystyttiin tutkimaan materiaalien eroja ja mahdollista korrelaatiota.

## 5 TULOKSET

### 5.1 Reiänlaajennusmenetelmien vertailu

Ensimmäisessä vaiheessa tutkittiin kahden reiänlaajennusmenetelmän välisiä eroja materiaalin EN 1.4016 avulla. Samalla tutkittiin myös materiaalin lämpötilojen muutoksia ja kappaleeseen kohdistuneita venymiä.

#### 5.1.1 Mittauksen epätarkkuus

Mittauksen epätarkkuutta tutkittiin mittaamalla KWI- sekä ISO-testien reikien halkaisijoita. Jokainen laajennettu reikä mitattiin kahteen kertaan ja kaikkien reikien molempien mittausten keskiarvon mukaan laskettiin reiänlaajentumissuhde. Alla olevia tuloksia tarkastelemalla huomaa että ISO- reiänlaajennetuissa rei'issä tarkan mitan saaminen on hieman haastavampaa verrattuna KWI- testillä laajennettuihin reikiin. Tästä johtuen ISO- menetelmän mukaan laajennettujen reikien mittauksissa ilmeni hieman KWI- testiä suurempia virheitä.

Taulukko 3. ISO- reiänlaajennuskokeen reikien mittaustulokset

EN 1.4016		ISO reiänlaajennuskoe
Mittaus 1 [mm]	Mittaus 2 [mm]	Mittaustulosten välinen ero [mm]
17,67	17,89	0,22
18,66	19,04	0,38
18,02	18,26	0,24
18,33	18,63	0,3
18,31	18,46	0,15
Keskiarvo	18,33	0,26

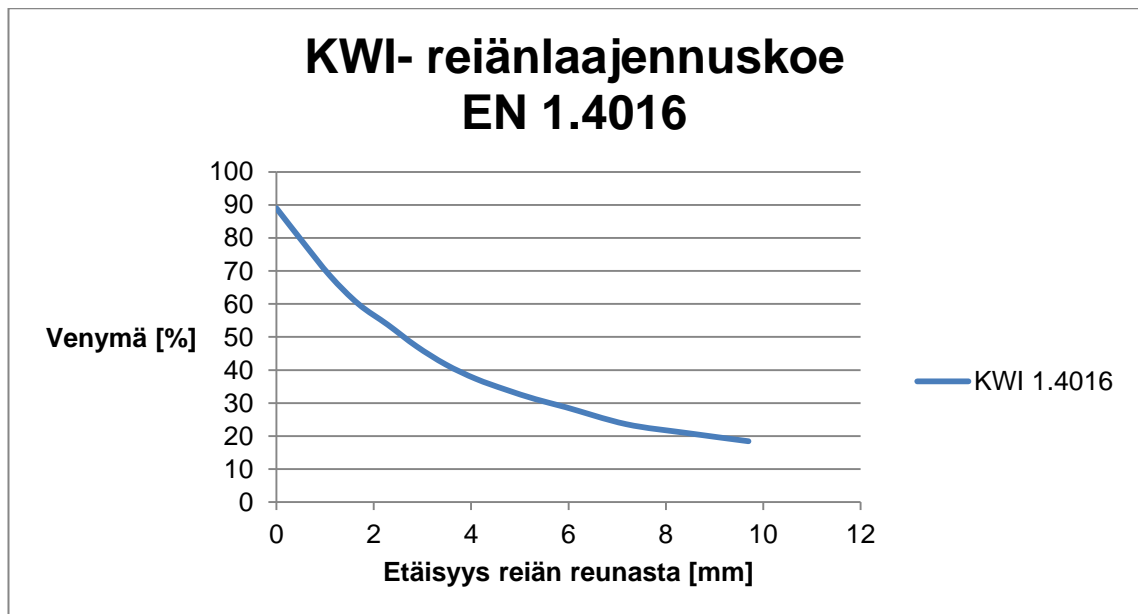
Taulukko 4. KWI- reiänlaajennuskokeen reikien mittaustulokset

EN 1.4016		KWI reiänlaajennuskoe
Mittaus 1 [mm]	Mittaus 2 [mm]	Mittaustulosten välinen ero [mm]
14,52	14,28	0,24
15,15	15,11	0,04
14,81	14,77	0,04
Keskiarvo	14,77	0,11

### 5.1.2 Venymäjakaumat

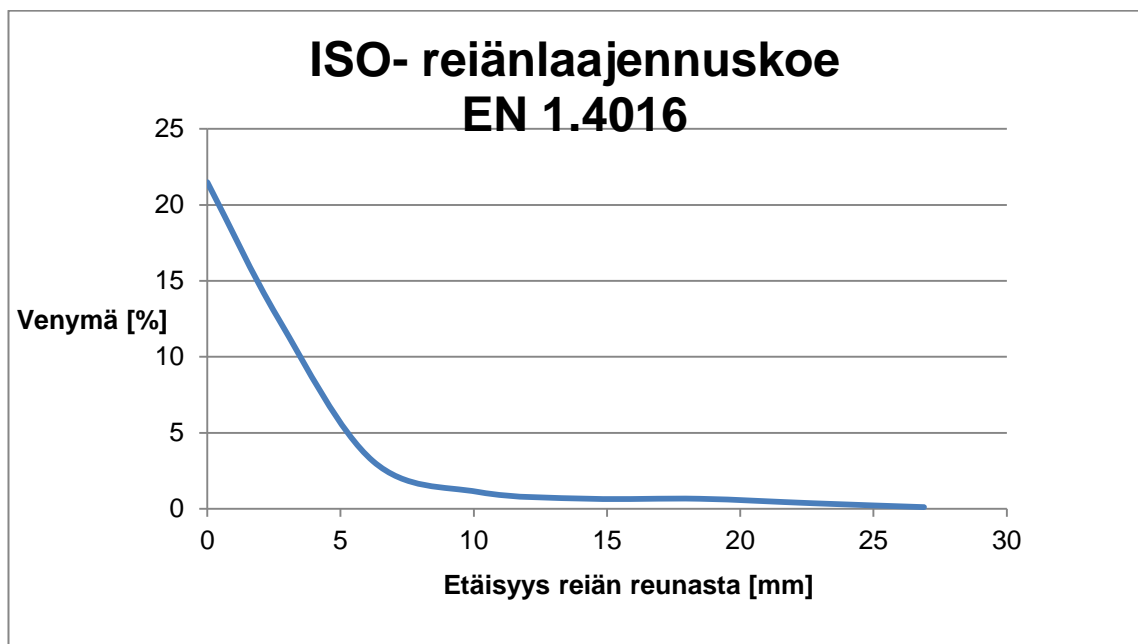
Materiaalin 1.4016 venymiä mitattiin Aramis/Argus- kamerajärjestelmän avulla. KWI-testin kuvaamiseen käytettiin Aramis- kamerajärjestelmää ja ISO- testi kuvattiin Arguksella.

KWI- reiänlaajennuskokeessa venymät nousivat erittäin korkealle verrattuna ISO- testiin. KWI- testi muovaa materiaalia paljon enemmän kuin ISO- testi. Tämä johtuu tylppäisestä painimesta ja suurimmat venymät löytyivätkin painimen reunojen pyöristysten kohdilta. KWI- testissä venymät ovat suuret, myös reiän ympäristössä ja etäisyyden kasvaessa venymät pienenevät tasaisesti. Alla olevasta kuvasta nähdään, että reiän reunalla venymät ovat olleet lähes 90%. Venymät lähtevät tasaiseen laskuun ja 10mm päässä reiän reunasta venymää on ollut enää 20%.



Kuva 10. Materiaalin EN 1.4016 venymät KWI- reiänlaajennuskokeessa.

ISO- standardin mukaisessa reiänlaajennuskokeessa max. venymät olivat vain n.20% reiän reunalla. Venymä laski alaspäin huomattavan paljon jyrkemmin kuin KWI- testissä ja 10mm etäisyydellä reiän reunasta venymiä ei enää ollut kuin muutama prosentti.

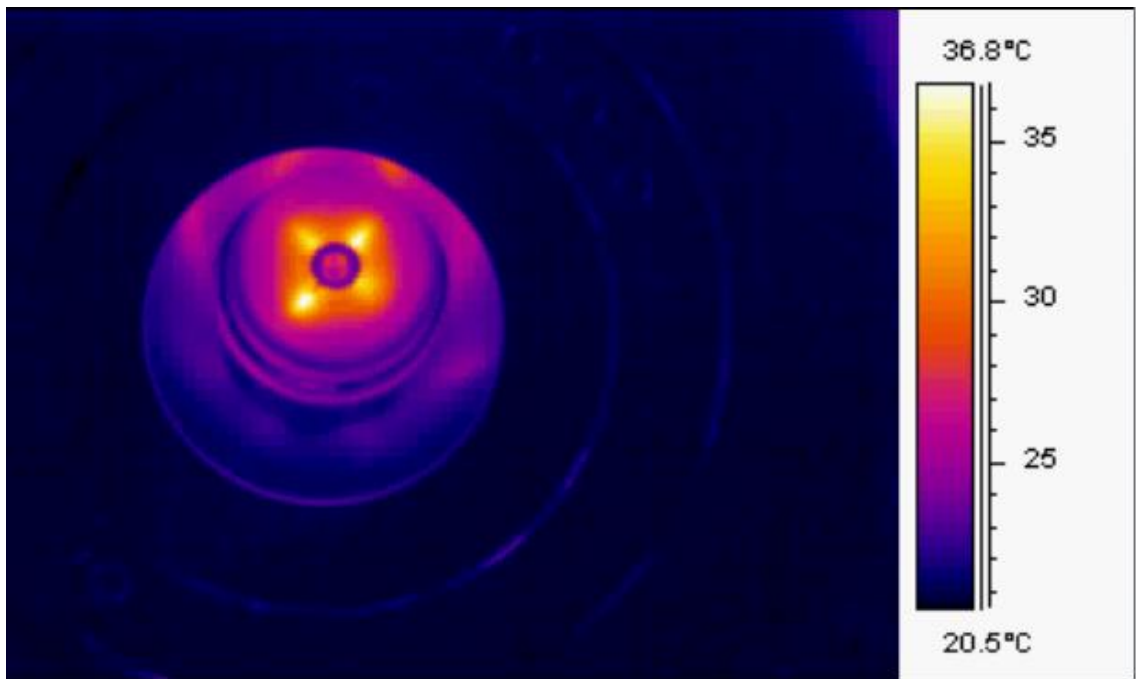


Kuva 11. Materiaalin EN 1.4016 venymät ISO 16630 reiänlaajennuskokeessa.

### 5.1.3 Lämpötilan kehitys

Lämpötilan kehitystä reiän ympärillä kuvattiin lämpökameran avulla. Lämpökamera saatiin asennettua nippusiteiden avulla Aramis kamerayksikköön kiinni. Kameralla kuvattiin ja nauhoitettiin molemmat testit laadulle EN 1.4016.

KWI- testissä levy alkoi lämmetä ensin reiän läheltä, jossa lämpötila pysyi korkeimpana koko testin ajan. Joissain testeissä kappale alkoi myös lämmetä painimen reunojen pyöristysten kohdalta, mutta tällä materiaalilla yleisintä oli kuitenkin lämpeneminen reiän kohdalta. Testilevy lämpeni melko hitaasti testin aikana ja suurimmat lämpötilan muutokset, ilmenivät vasta testin loppuvaiheissa. Siinä vaiheessa kun levyyn alkoi ilmestymään lämpökamerallakin huomattavaa säröä, lämpötila kohosi kaikkein korkeimmalle. KWI testatut EN 1.4016 materiaalin korkeimmat lämpötilat juuri halkeaman tultua olivat n. 35- 45 C asteen tietämillä. Lämpimin kohta ilmaantuu yleensä halkeamien ympärille. Alla kuva lämpökameralla kuvatusta KWI- testistä murtumahetkellä.

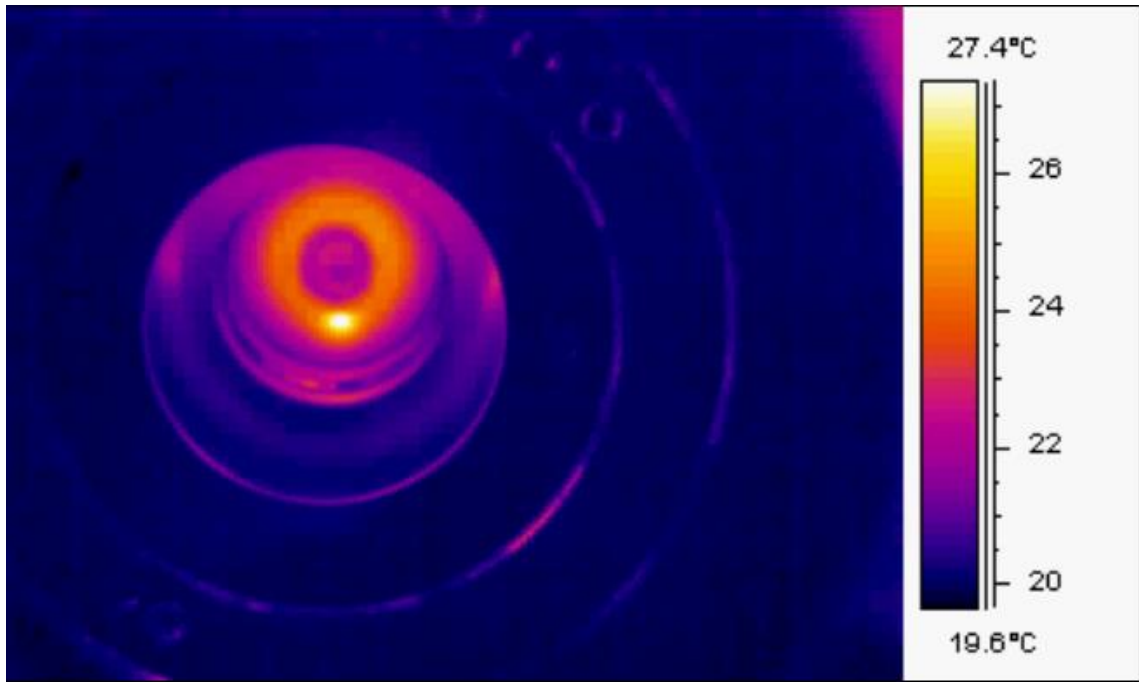


Kuva 12. Lämpökamerakuva KWI- reiänlaajennuskokeessa syntyneestä murtumasta.

ISO- reiänlaajennuskokeessa lämpötilat nousevat materiaalilla 1.4016 korkeintaan 27 C asteeseen. ISO- testissäkin suurin lämpötilan muutos tapahtuu vasta murtuman tultua.



ISO standardin mukaisessa reiänlaajennuskokeessa lämpötila on suurimmillaan reiän reunojen ympärillä koko testin ajan. Lämpötila pysyy melkein vakiona loppuun asti ja nouseekin muutaman asteen vasta halkeaman tultua.



Kuva 13. Lämpökamerakuva ISO- reiänlaajennuskokeesta syntyneestä murtumasta.

## 5.2 Korrelaation määrittäminen

Tässä osiossa tarkoituksena oli tehdä kuudelle ruostumattomalle teräkselle sekä kahdelle kylmävalssatulle hiiliteräkselle reiänlaajennuskokeet molemmilla menetelmillä. Tarkoituksena tutkia eri materiaalien reiänlaajennettavuutta sekä vertailla ISO- ja KWI-reiänlaajennusmenetelmillä saatuja tuloksia toisiinsa.

Alla olevissa taulukoissa on annettu eri materiaalien reiänlaajennuksessa esiintyvät keskimääräiset max. voimat sekä keskimääräinen laajentuneen reiän halkaisija. Taulukkoihin on laskettu myös jokaiselle materiaalille reiänlaajennuserroin.

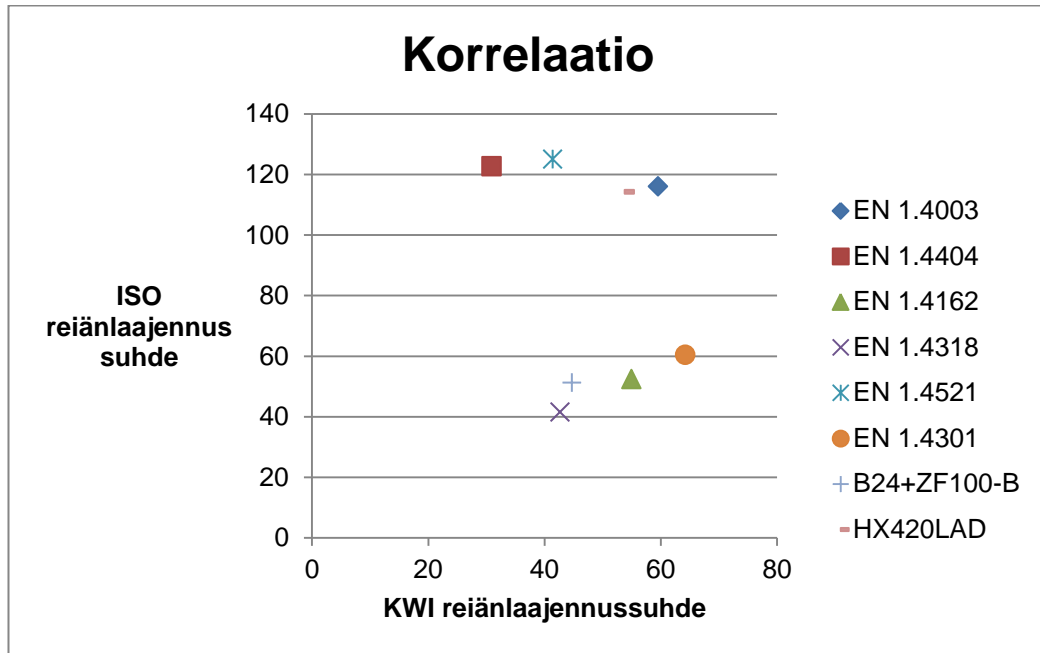
Taulukko 5. ISO- reiänlaajennuskokeen tulokset

ISO reiänlaajennuskoe				
Materiaali		Keskimääräinen max. voima [kN]	Keskimääräinen reiän halkaisija [mm]	Reiänlaajennussuhde %
EN 1.4003		24,28	21,61	116,1
EN 1.4404		32,62	22,27	122,71
EN 1.4162		21,87	15,24	52,43
EN 1.4318		26,73	14,15	41,52
EN 1.4521		27,22	22,50	125,01
EN 1.4301		17,28	16,10	60,44
B24+ZF100-B		36,76	15,12	51,27
HX 420 LAD		43,72	21,42	114,23

Taulukko 6. KWI- reiänlaajennuskokeen tulokset

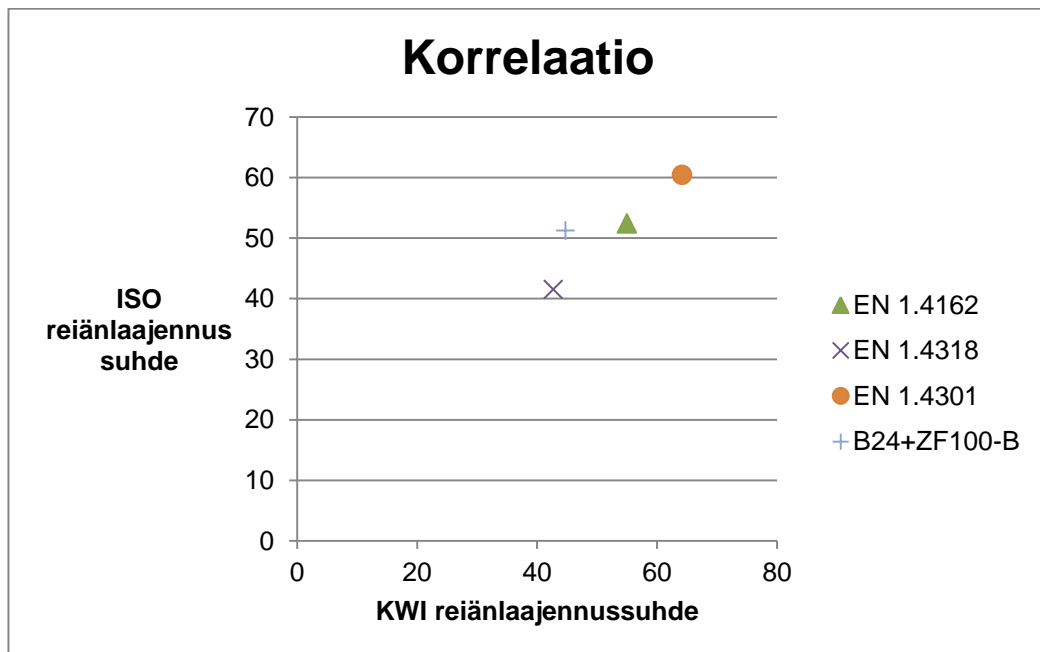
Kwi reiänlaajennuskoe				
Materiaali		Keskimääräinen max. voima [kN]	Keskimääräinen reiän halkaisija [mm]	Reiänlaajennussuhde %
EN 1.4003		109,2	15,95	59,54
EN 1.4404		147,62	13,09	30,93
EN 1.4162		203,82	15,49	54,98
EN 1.4318		233	14,27	42,7
EN 1.4521		122,78	14,14	41,4
EN 1.4301		14,05	16,42	64,2
B24+ZF100-B		267,12	14,47	44,74
HX 420 LAD		197,13	15,38	53,81

Yllä olevien taulukoiden tulosten perusteella laadittiin kuvaaja, johon laitettiin molempien reiänlaajennusmenetelmien tulokset. Pysty akselille laitettiin ISO- reiänlaajennuskokeella saatu reiänlaajennussuhde ja vaaka-akselille KWI- testillä saatu reiänlaajennussuhde jokaiselle toisen vaiheen materiaalille. Kuvaajan avulla oli tarkoituksena tutkia löytyykö molempien reiänlaajennusmenetelmien tulosten välillä yhtäläisyyksiä.



Kuva 14. Toisen vaiheen materiaalien välinen korrelaatio

Yllä olevasta kuvaajasta huomataan että läheskään kaikkien materiaalien reiänlaajennuskokeiden tulokset eivät korreloi keskenään.



Kuva 15. Toisen vaiheen materiaalit joiden tulokset korreloivat

Poistamalla kuvaajasta sellaisten materiaalien tulokset jotka eivät ole lähellä muiden materiaalien tuloksia saadaan aikaan kuvaaja josta huomataan joidenkin materiaalien välillä olevan yhtäläisyyksiä.

## 6 TULOSTEN KÄSITTELY

### 6.1 Reiänlaajennusmenetelmien vertailu

Tässä osiossa käsitellään testien aikana saatuja tuloksia ja vertaillaan reiänlaajennusmenetelmiä.

#### 6.1.1 Mittauksen epätarkkuus

Mitatuista tuloksista käy ilmi, että ISO- reiänlaajennusmenetelmällä laajennettujen reikien, halkaisijan mittauksessa on hieman enemmän virhettä, kuin KWI- testissä. KWI- testillä laajennetun reiän halkaisijan mittaaminen on helpompaa ja virheettömämpää, koska KWI- testissä reikä ei laajene niin paljon kuin ISO- testissä. KWI- testeissä reikä laajenee yleensä tasaisesti, joten tällöin halkaisija on sama joka kohdasta mitattuna.

ISO- testissä reikä laajenee joskus jopa yli 100 %, jolloin reiän sisäpuolelle ilmaantuu paljon pieniä säröjä. Säröjen vuoksi halkaisijan tarkka mittaus on joskus vaikeaa, ja säröistä aiheutuu usein pieniä mittavirheitä. ISO- testin mittavirheet johtuvat usein siitä, että reikä on soikea. Useasti ISO- testissä reikä saattaa laajetessaan muuttua soikeaksi. Reiästä voi tulla myös soikea, jos reikää ei ole keskitetty keskelle paininta. Usein lyhyet näytelevyt on vaikea saada asetettua keskelle paininta. Pienikin virhe reiän keskittämisessä aiheuttaa reiän laajenemista toisesta reunasta enemmän kuin toisesta ja tämä saa aikaan soikean reiän.

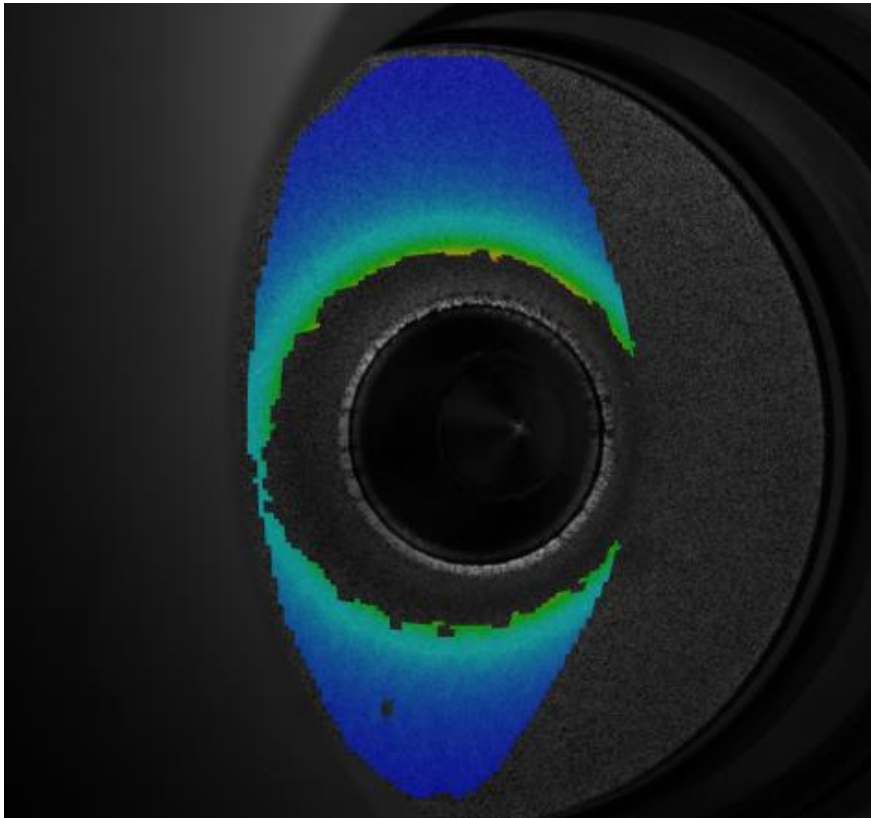
#### 6.1.2 Venymäjakaumat

KWI- reiänlaajennuskokeen venymiä mitattiin Aramis- kamerajärjestelmän avulla. Kuvaukset onnistuivat pääasiassa hyvin, vain muutamat testit menivät hieman yli johtuen lämpökameran huonosta havainnointikyvystä.

KWI- reiänlaajennuskokeessa venymät olivat korkeat verrattuna ISO- testiin. Tämä johtuu KWI- testissä käytettävän painimen muodosta, sekä laajentamisessa vaadittavista voimista. KWI- testissä suurimmat venymät kohosivat melkein 90 % ja etäisyyden kas-

vaessa venymät pienenivät tasaisesti siten että 10mm päässä reiän reunasta venymät olivat vielä 20%:n luokkaa.

ISO- testi jouduttiin kuvaamaan Argus kamerajärjestelmällä, sillä Aramis kameroilla ei saatu reiän ympäristöstä riittävän hyvää kuvaa. Painin nostaa ISO- testin aikana reiän ympäristöä ylöspäin jolloin Aramoksen toiselta kameralta peittyi näkyvyys reiän reunaan josta venymiä mitattiin.



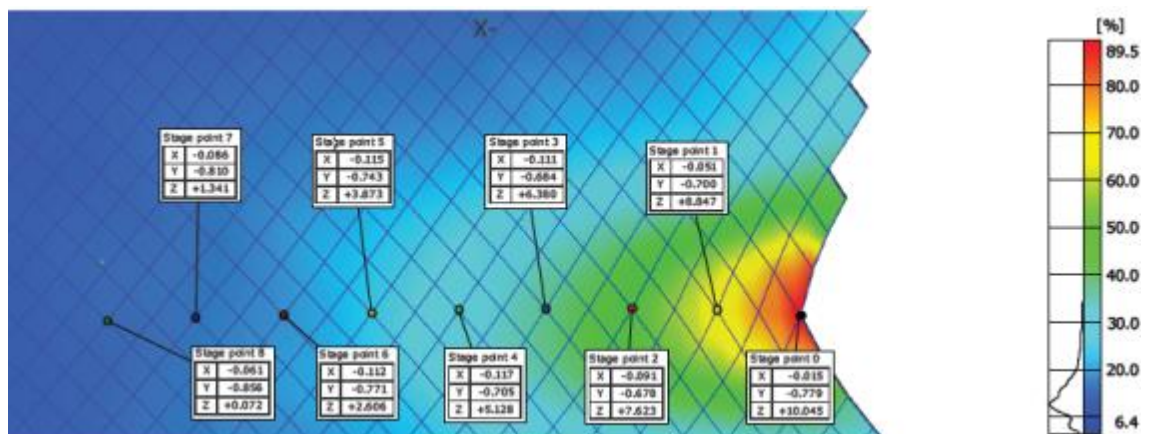
Kuva 16. Aramis kamerajärjestelmän kameroiden näkyvyys ISO- reiänlaajennuskokeessa.

Yllä olevasta kuvasta nähdään, kuinka ISO- testissä kameroiden näkyvyys, peitti vain sellaisia alueita, joissa venymät ovat pienet. Tästä johtuen jouduttiin ISO- reiänlaajennuskokeen venymien määrittämiseen käyttämään Argus- kamerajärjestelmää.

ISO- testissä venymät olivat huomattavan paljon pienempiä kuin KWI- testissä ja suurimmat venymät laajennetun reiän reunalla olivat vain vähän yli 20 %. Reiän reunalta etäisyyden kasvaessa venymät putosivat lähes nollaan.

KWI- reiänlaajennuskokeen venymien mittaukset onnistuivat hyvin. Tuloksista huomataan testin olevan paljon enemmän materiaalia muovaavampi kuin ISO- testi. KWI- testissä venymät ovat paljon suuremmat ja ulottuvat laajemmalle alueelle kuin ISO- testissä. Tästä johtuen KWI- reiänlaajennuskokeita tehdessä joudutaan alkureikien etäisyyttä toisistaan kasvattamaan paljon enemmän kuin ISO- reiänlaajennuskokeessa.

Venymät määritettiin Aramis/Argus kamerajärjestelmästä tuotujen kuvien avulla. Reiän reunalta piirrettiin suora viiva noin 10mm reiästä poispäin ja viivalle laitettiin tasaisin välein pisteitä. Tämän jälkeen määritimme venymät jokaisen pisteen kohdalla sekä pisteiden etäisyydet reiän reunalta.



Kuva 17. Aramis/Argus kamerajärjestelmän tietokoneelta saatu kuva venymien määrittämistä varten.

### 6.1.3 Lämpötilan kehitys

Lämpötilojen tutkiminen testien aikana onnistui lämpökameran avulla, joka saatiin kiinnitettyä Aramis- kamerajärjestelmään kiinni. Lämpökamerasta saatiin live-kuvaa, joka tallennettiin tietokoneelle. Lämpökamerakuvista ja tuloksista ilmeni että KWI- testin aikana lämpötilat nousivat huomattavan paljon korkeammalle kuin ISO- testissä. KWI- testissä lämpötila jakautuu tasaisesti koko painimen alueelle, kuitenkin sillä tavoin että lämpimimmät kohdat ovat yleensä painimen reunan pyöristysten kohdalla. ISO- testissä suurimmat lämpötilat syntyvät laajenevan reiän ympärille.

KWI- testin korkeammat lämpötilat johtuvat painimen suuresta koosta, tylpistä muodosta ja testissä esiintyvistä suurista muovausvoimista. ISO- testissä muovausvoimat

ovat huomattavan paljon pienemmät ja kohdistuvat pääasiassa reiän lähistöön. Tästä syystä lämpötilakaan ei kohoa muutamaa astetta enempää.

Työssä selvisi myös se, että lämpökameran käytöstä ei ole hyötyä murtuman havainnoinnissa. Molemmissa reiänlaajennuskokeissa parhaimman tuloksen saa käyttämällä silmää murtuman havainnoinnissa. Lämpökameralla kuvatessa murtuman havainnointi on erittäin paljon vaikeampaa kuin silmällä, johtuen kameran epätarkasta kuvasta.

ISO- testin loppuvaiheessa laajennettavaan reikään tulee paljon pieniä hiusmurtumia jotka eivät kuitenkaan ole riittäviä testin pysäyttämiseen. Nämä kaikki pienet halkeamat näkyvät lämpökamerassa sekavana ja kuvasta on erittäin vaikea huomata milloin ainevahvuuden läpi tunkeutuva murtuma syntyy. Lämpökameralla huomataan murtuma vasta sitten kun murtuma laajenee suuremmaksi.

KWI- testissä murtuman havainnointi lämpökameralla on hieman helpompaa kuin ISO- testissä. Paras tulos KWI- reiänlaajennuskokeessa saadaan kuitenkin silloin, kuin murtuma katsotaan silmällä. Vaikka KWI- testissä lämpökamerasta on enemmän hyötyä kuin ISO- testissä, niin sen käyttöä tulee kuitenkin välttää oikeiden tulosten saamiseksi.



## 6.2 Korrelaation määrittäminen

Tässä osiossa oli tarkoituksena tutkia löytyykö kahdeksan eri materiaalin KWI- ja ISO-reiänlaajennuskokeetulosista yhtäläisyyksiä. Molempien reiänlaajennusmenetelmien tulosten pitäisi olla sellaisia jotta ne löytyisivät kuvaajaan piirretyltä suoralta.

Materiaalin 1.4003 testaukset onnistuivat hyvin. ISO- reiänlaajennuskokeen tuloksista huomataan materiaalin omaavan hyvät reiänlaajennusominaisuudet. KWI- testi antoi samaiselle materiaalille puolta pienemmän reiänlaajennettavuuden. ISO- reiänlaajennuskokeen tuloksissa oli eroja KWI- tuloksia enemmän, sillä laajennetuissa rei'issä oli useamman millin eroja.

EN 1.4404 materiaalille tehdyt reiänlaajennuskokeet onnistuivat hyvin ja ISO- testillä saatiin kyseiselle materiaalille hyvä reiänlaajennuskerroin. Tuloksissa ei ollut edellisen materiaalin tapaan juurikaan eroja ja tulosta voidaan pitää luotettavana. Samalle materiaalille tehdyissä KWI- testeissä reiät laajenivat paljon vähemmän kuin ISO- testissä. Reiänlaajennuskertoimeksi KWI- testillä saatiin vain neljäsosa ISO- testin tuloksesta.

Materiaalille 1.4162 tehdyt ISO- reiänlaajennuskokeet onnistuivat hyvin. Materiaalin reiänlaajennuskerroin kuitenkin oli erittäin huono. ISO standardin mukaisella reiänlaajennuskokeella saatiin tulokseksi 52,43% kun KW- testillä samainen luku oli 54,98%. Kaikilla aiemmin testatuilla materiaaleilla ISO- testin tulos on ollut aina paljon suurempi kuin KWI- testin.

Materiaali 1.4318 reiänlaajennustuloksiksi saatiin paljon huonommat lukemat kuin edelliselle materiaalille. Tällekin materiaalille KWI- testi antoi paremman reiänlaajennettavuuden kuin ISO- testi.

ISO- reiänlaajennuskokeet antoivat materiaalille EN 1.4521 hyvän reiänlaajennettavuuden. Kaikki laajennetut reiät laajenivat tasaisesti ja tuloksista saatiin tarkat. Materiaalin reiänlaajennustuloksia voidaan pitää luotettavina. Samaiselle materiaalille tehdyt KWI- reiänlaajennuskokeet antoivat paljon huonomman tuloksen. KWI- testi ei onnistunut haluamallamme tavalla sillä testissä halkeama ei tullut kupin päälyosaan muiden materiaalien tapaan vaan halkeama ilmestyi painimen pyöristysten kohdille. Tälle materiaa-

lille tuli KWI- testin osalta rajavetosuhde vastaan eikä näitä tuloksia voida vertailla muihin tuloksiin.



Kuva 18. KWI- reiänlaajennuskokeen murtuma materiaalille EN 1.4521

Materiaali 1.4301 oli testatuista materiaaleista kolmas, jonka reiänlaajennuskertoimeksi saatiin suurempi lukema KWI- testin avulla. KWI- testin reiänlaajennuskerroin oli n. 4% suurempi kuin ISO- testin. Molemmissa testeissä oli eroja laajennettujen reikien halkaisijoissa, joten testien tulokset eivät ole tarkkoja.

Ruukki Metals Oy:ltä saimme testattavaksi kahta eri materiaalia, joista ensimmäinen oli B24+ZF100-B. Materiaalin reiänlaajennettavuuskerroin oli ISO- testissä melko vähäinen. Laajennettujen reikien halkaisijoissa oli jonkin verran eroja, mutta erot eivät vaikuttaneet tuloksiin ratkaisevasti. Materiaalille tehdyt KWI- testit onnistuivat hyvin ja antoivat hieman pienemmän reiänlaajennettavuuden kuin ISO- testi.

Toinen Ruukin materiaali oli HX 420 LAD joka antoi ISO- testissä hyvän reiänlaajennettavuuden. Laajennetuissa rei'issä oli pientä eroavaisuutta, joten reiänlaajennettavuuskerroin olisi saattanut olla vieläkin parempi. Myös KWI- testit onnistuivat hyvin ja antoivat kohtuulliset tulokset.

Korrelaation määrittäminen onnistui kaikin puolin hyvin alun ongelmista huolimatta. Alussa KWI- testissä ongelmana oli levyn ruttuun meneminen ja täten testin epäonnistuminen. Pienten selvitysten ja toimenpiteiden jälkeen saimme levyn pysymään suorassa KWI- testin ajan. KWI- testeissä jouduimme käyttämään suurinta mahdollista Erichsenin pidinvoimaa. Ajanpuutteen vuoksi emme alkaneet kokeilemaan testejä pienemmillä pidinvoimilla. KWI- testin suuren kupin vuoksi, jouduimme myös käyttämään testissä paljon ISO- testiä pitempiä reikien etäisyyksiä, sekä isompia näytelevyjä.

Toisen vaiheen päätarkoituksena materiaalien reiänlaajennettavuuksien määrittämisen lisäksi oli tutkia materiaalien välistä korrelaatiota. Materiaalien välinen korrelaatio olisi ollut mahdollista, jos kaikilla materiaaleilla ISO- testin tulos olisi ollut KWI- testin tulosta suurempi. Kolmen materiaalin kohdalla tämä ei kuitenkaan toteutunut, joten kaikkien testissä mukana olleiden materiaalien välillä ei esiinny korrelaatiota reiänlaajennettavuuksia tarkastelemalla. Tämän syytä on vaikea arvailla, sillä KWI- testaus on vielä täysin alkuvaiheessa ja vaatii lisätutkimuksia. Tuloksiin olisi voitu saada muutoksia voitelua käyttämällä, mutta tässä työssä voitelua ei kuitenkaan otettu käyttöön.

B24+ZF100-B materiaalin tulokset eivät ole virallisia, sillä alkureikien stanssauksessa käytettiin väärällä välyksellä olevaa työkalua. Tästä johtuen materiaalin tuloksia ei voida vertailla eikä ottaa huomioon.

### 6.3 Reiänlaajennuskokeiden erot

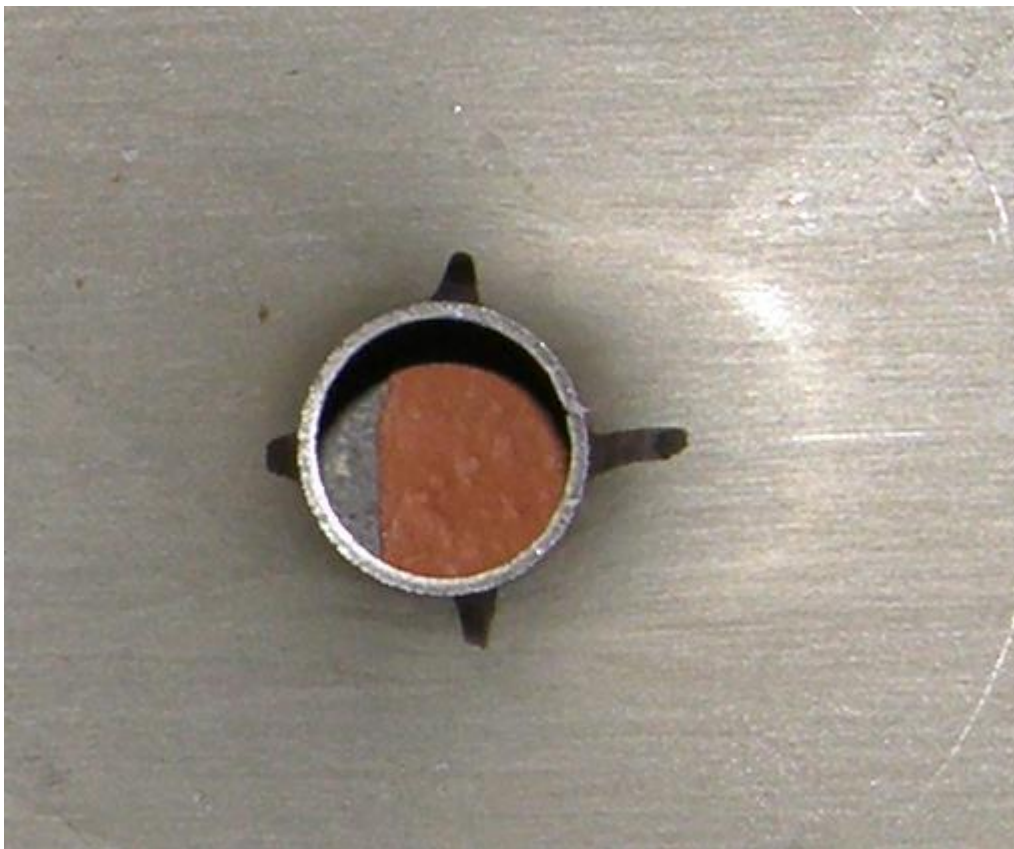
Reiänlaajennuskokeet eroavat toisistaan painimen muodon perusteella. ISO- standardin mukaisessa testissä painimena toimii kartion muotoinen kappale, kun KWI- testissä painimena käytetään tylppäpäistä kappaletta.

ISO- standardin mukaisessa testissä painin laajentaa reikää pääsääntöisesti enemmän kuin KWI- testissä, mutta muutamilla tässä työssä olleilla materiaaleilla tilanne oli päinvastainen. ISO- testi ei aiheuta laajennettavan reiän ympäristöön niin suuria muodonmuutoksia kuin KWI- reiänlaajennuskoe. Tästä johtuen lämpötilat kohosivat paljon vähemmän ISO- testin aikana.

KWI testin materiaalia muovaava ominaisuus vaikuttaa pidinvoimien suuruuteen. KWI- testissä pidinvoimana joudutaan käyttämään Erichsen muovaustutkimuslaitteen suurinta

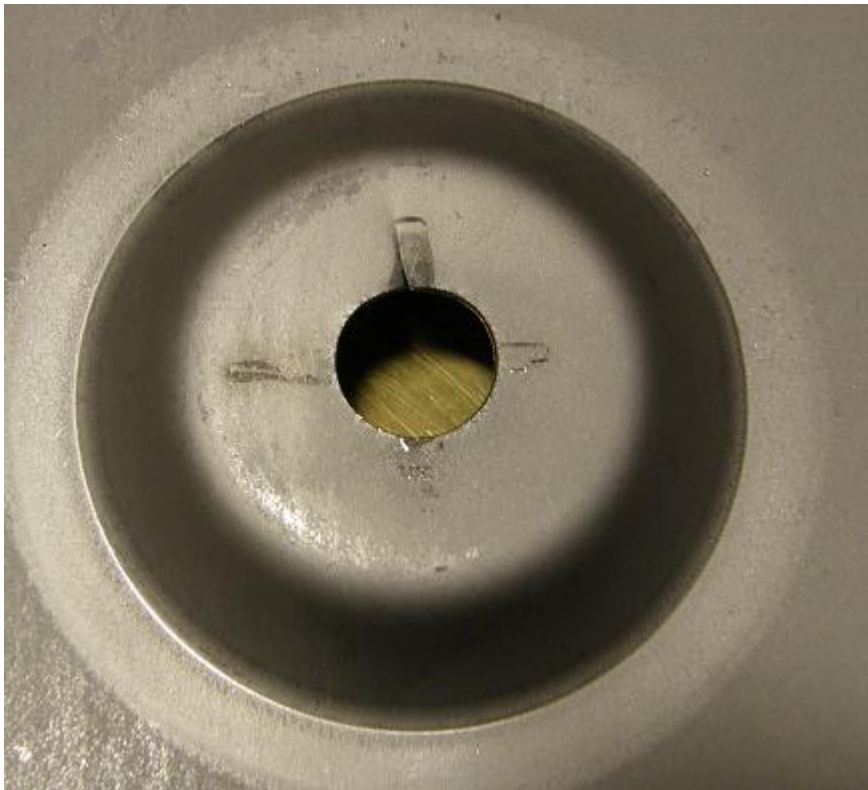
voimaa, joka on 600kN. ISO- testissä pidinvoimaksi riittää standardin määrittämä 50kN. KWI- testin suurista voimista johtuen, testin aikana olisi hyvä käyttää voitelua, mutta tässä työssä KWI- testi tehtiin ISO- standardin mukaisen testin ohjeita noudattaen.

Reiänlaajennuskokeissa on myös eroja testin lopussa syntyvää murtumaa tarkasteltaessa. Reiänlaajennuskoe tulee pysäyttää heti, kun huomataan levyn paksuuden läpi ulottuva murtuma. ISO- testissä murtuman havainnointi on helppoa, sillä reiän laajentuessa levyn ainepaksuus tulee näkyville. Alla olevassa kuvassa ISO- reiänlaajennuskokeessa syntyvä halkeama.



Kuva 19. ISO- reiänlaajennuskokeessa syntynyt murtuma

KWI- reiänlaajennuskokeessa murtuma havaitaan vasta sitten kun halkeama tulee kupin päälyosaan. KWI- testissä reiän sisäreunat eivät nouse näkyviin ISO- testin tavoin ja siitä syystä, murtuman havainnointi heti sen synnyttyä, on mahdotonta. Alla kuvassa KWI- reiänlaajennuskokeessa tullut murtuma.



Kuva 20. KWI- reiänlaajennuskokeessa tullut murtuma.

Reiänlaajennuskokeita kuvattiin myös lämpökameralla. Lämpökamerakuvauksista huomattiin että testien aikana lämpötilat muuttuvat eri tavoin. ISO- testissä lämpötilat eivät nouse niin korkealle kuin KWI- testissä. Lämpötilaerot johtuvat painimen muotojen eroista sekä testien aikana tarvittavista voimista.

#### 6.4 Yhteenveto

Työn aikana tehdyt testaukset onnistuivat kohtalaisen hyvin ja tuloksista saatiin luotettavia. Muutaman materiaalin kohdalla tulokset ovat virheellisiä, johtuen mm. alkureiän teossa sattuneista virheistä. Muutamilla KWI- testatuilla materiaaleilla tuli rajavetosuhde vastaan ja testikappaleeseen tuli murtuma väärään paikkaan. Näille materiaaleille suoritettujen testien joudutaan uusimaan oikeiden tuloksien saamiseksi. KWI testissä voitelun käytöllä saataisiin mahdollisesti estettyä edellä mainitut virheet.

Reiänlaajennuskokeiden vertailussa saatiin selvitettyä reiänlaajennuskokeiden välisiä eroja, sekä tutkittua kappaleeseen kohdistuvia jännityksiä ja kappaleen lämpötilan muu-

toksia. Myös lämpökameran hyödyt ja haitat murtuman havainnoinnissa saimme selvitettyä onnistuneesti.

## 7 POHDINTA

Tämä työ oli haastava ja tarjosi paljon mielenkiintoisia ongelmia ratkaistavaksi. Työn aikana kaikki asiat jotka riskianalyysiin oli kirjattu menivät pieleen. Laitteet hajosivat, painimen valmistuksessa oli ongelmia ja käyttäjistä johtuvia ongelmiakin esiintyi ajoittain. Kaikista pienistä vastoinkäymisistä huolimatta työssä saatiin täysin vertailukelpoisia tuloksia ja työn aikana opittiin uutta tietoa KWI- reiänlaajennuskokeesta.

Työn ensimmäisenä vaiheena oleva reiänlaajennuskokeiden välinen vertailu saatiin suoritettua ilman suurempia ongelmia. Tutkittavalle materiaalille tehtiin monia reiänlaajennuksia joiden tuloksista vertailtiin reiänlaajennusmenetelmiä. Tuloksista saatiin selville menetelmien välisiä eroja. Lämpökameran käytön hyödyt ja haitat saatiin myös selville testien aikana.

Toisen vaiheen materiaalien testauksissa ilmeni hieman enemmän ongelmia kuin ensimmäisessä vaiheessa. Muutamien materiaalien KWI- testit eivät antaneet vertailukelpoisia tuloksia, sillä materiaali murtui väärällä tavalla. Materiaaleilla tuli rajavetosuhde vastaan ja halkeama ilmestyi eri paikkaan kuin muilla materiaaleilla. Loppuvaiheessa yhdelle materiaalille tehdyt ISO- sekä KWI- reiänlaajennuskokeet menivät hylkyyn alkureiän teossa sattuneiden virheellisten työkalujen käytön johdosta. Toisen vaiheen tärkein asia oli materiaalien välisen korrelaation tutkiminen. Kaikki toisessa vaiheessa mukana olleiden materiaalien tulokset eivät korreloi keskenään. Muutamilla materiaalien tuloksissa ilmeni pientä korrelointia, mutta kaikkien materiaalien kohdalla tällaista yhteneväisyyttä ei esiinny.

Työn aikana opittiin paljon vanhasta KWI- reiänlaajennusmenetelmästä, mutta tutkittavaa riittää vielä jatkossakin. KWI- reiänlaajennuskoe on erittäin paljon materiaalia muovaava koe, joten voitelun käyttö tässä testissä voisi olla aiheellista. Tässä työssä voitelua ei kuitenkaan otettu käyttöön koska tarkoituksena oli vertailla ISO- ja KWI- reiänlaajennuskokeita keskenään. ISO 16630 standardin mukaisessa reiänlaajennuskokeessa voitelun käyttöä ei sallita, joten tästä syystä emme käyttäneet voitelua myöskään KWI- reiänlaajennuskokeessa. Teimme molemmat kokeet mahdollisimman samanlaisilla parametreilla.

KWI- reiänlaajennuskokeessa voitaisiin käyttää voittoa ja kokeilla myös reiänlaajennuskoetta suuremmalla alkureiällä. 12 mm halkaisijaltaan oleva alkureikä saattaisi antaa parempia tuloksia kuin 10 mm alkureiällä tehdyt kokeet. Myös lämpökameran käyttöä voitaisiin vielä tutkia. Jos lämpökamerasta saataisiin tarkempaa kuvaa saattaisi sen käyttö helpottaa reiänlaajennuskokeissa murtuman havainnointia. Tässä työssä käytetystä lämpökamerasta ei ollut hyötyä murtuman havainnoinnissa, sillä kuva ei ollut riittävän tarkkaa jotta pienenkin särön olisi nähnyt ajoissa.



## LÄHTEET

- Asnafi R. Journal of Materials Processing Technology. 1999, Elsevier Science S.A. sivut 198 – 214.
- Erichsen www – sivut. Hakupäivä 2.5.2013.<<http://www.erichsen.de>>
- ISO 16630(E). Hole expanding test
- Kivivuori Seppo. Teräsohutlevyjen muovattavuus ja materiaalilaadut. Aalto Yliopisto. Tekninen raportti. 2011
- Lange Metal Forming handbook s. 1813-1814
- Manninen Timo. Reiänlaajennuskokeen kehitystyö ja testin ottaminen käyttöön prosessinkehityksessä. Muistio. 13.8.2012
- Outokummun www- sivut. Hakupäivä 1.5.2013. <http://www.outokumpu.com>
- Rautaruukin www- sivut. Hakupäivä 1.5.2013. <<http://www.rautaruukki.fi>>
- Rissanen Tiina & Joutsenvaara Jukka. Aramis Venymäanalyysointilaitteen käyttöohje. Kemi-Tornion amk. Tekninen raportti. Kemi. 2.2.2011
- Saikat K. D, Anjana D, Siddhartha M & Bimal K. J, Materials and Manufacturing Processes, 2011, sivut 37 – 42.

**LIITTEET**

Liite 1. Reiänlaajennuskokeiden mittauspöytäkirja

Liite 2. KWI reiänlaajennuskokeen painimen piirustukset

Materiaali EN 1.4016			
Pidinvoima 50 kN		Nopeus 15mm/min	
ISO testi halkeama katsottu silmällä			
MAX voima [kN]		Laajentunut reikä mittaus 1 [mm]	Laajentunut reikä mittaus 2 [mm]
17,5		17,67	17,89
17,7		18,66	19,04
17,1		18,02	18,26
17,8		18,33	18,63
17,8		18,31	18,46
KESKIARVO			18,327
Reiänlaajennussuhde			83,27 %

Materiaali EN 1.4016			
Pidinvoima 50 kN		Nopeus 15mm/min	
ISO testi halkeama katsottu lämpökameralla			
MAX voima [kN]		Laajentunut reikä mittaus 1 [mm]	Laajentunut reikä mittaus 2 [mm]
21		20,76	20,29
17,4		19,22	19,64
18,6		17,7	18,02
20,5		19,04	19,47
20		20,07	20,34
KESKIARVO			19,455
Reiänlaajennussuhde			94,55 %

Materiaali EN 1.4016			
Pidinvoima 600 kN		Nopeus 15mm/min	
KWI testi murtuma silmällä			
MAX voima [kN]		Laajentunut reikä mittaus 1 [mm]	Laajentunut reikä mittaus 2 [mm]
93,6		14,52	14,28
97,1		15,15	15,11
95,3		14,81	14,77
KESKIARVO			14,773
Reiänlaajennussuhde			47,73 %

Materiaali EN 1.4016			
Pidinvoima 600 kN		Nopeus 15mm/min	
KWI testi murtuma lämpökameralla			
MAX voima [kN]		Laajentunut reikä mittaus 1 [mm]	Laajentunut reikä mittaus 2 [mm]
95,6		15,98	15,89
94,1		15,24	15,17
100		15,58	15,44
KESKIARVO			15,55
Reiänlaajennussuhde			55,50 %

Materiaali EN 1.4003			
Pidinvoima 50 kN		Nopeus 15mm/min	
ISO testi			
MAX voima [kN]		Laajentunut reikä mittaus 1 [mm]	Laajentunut reikä mittaus 2 [mm]
27,5		22,9	23,26
27		23,34	23,54
24,1		21,71	21,43
20,7		19,5	19,6
22,1		20,36	20,46
KESKIARVO			21,61
Reiänlaajennussuhde			116,10 %

Materiaali EN 1.4003			
Pidinvoima 600 kN		Nopeus 15mm/min	
KWI testi			
MAX voima [kN]		Laajentunut reikä mittaus 1 [mm]	Laajentunut reikä mittaus 2 [mm]
101,9		17,17	16,34
104,9		16,28	15,76
109,3		16,63	16,11
109,3		16,16	15,51
113,2		16,08	15,32
116,6		15,22	14,87
KESKIARVO			15,954
Reiänlaajennussuhde			59,54 %

Materiaali EN 1.4404			
Pidinvoima 50 kN		Nopeus 15mm/min	
ISO testi			
MAX voima [kN]		Laajentunut reikä mittaus 1 [mm]	Laajentunut reikä mittaus 2 [mm]
33		22,47	23,08
33		22,76	23,05
32,5		21,71	22,03
34,3		22,53	22,82
30,3		20,88	21,38
KESKIARVO			22,271
Reiänlaajennussuhde			122,71 %

Materiaali EN 1.4404			
Pidinvoima 600 kN		Nopeus 15mm/min	
KWI testi murtuma silmällä			
MAX voima [kN]		Laajentunut reikä mittaus 1 [mm]	Laajentunut reikä mittaus 2 [mm]
148		14,17	13,43
148		13,28	12,69
147		12,99	12,48
147,5		12,92	12,78
KESKIARVO			13,092
Reiänlaajennussuhde			30,93 %

Materiaali EN 1.4162			
Pidinvoima 50 kN		Nopeus 15mm/min	
ISO testi			
MAX voima [kN]		Laajentunut reikä mittaus 1 [mm]	Laajentunut reikä mittaus 2 [mm]
22,9		15,92	15,97
21		15	15,07
22		14,92	15,06
20,3		14,64	14,67
22,5		15,31	15,39
22,5		15,41	15,55
KESKIARVO			15,24
Reiänlaajennussuhde			52,43 %

Materiaali EN 1.4162			
Pidinvoima 600 kN		Nopeus 15mm/min	
KWI testi			
MAX voima [kN]		Laajentunut reikä mittaus 1 [mm]	Laajentunut reikä mittaus 2 [mm]
187,7		15,3	16,16
192,6		15,85	16,24
217,5		14,5	15,4
217,5		15,21	15,33
KESKIARVO			15,49
Reiänlaajennussuhde			54,98 %

Materiaali EN 1.4318			
Pidinvoima 50 kN		Nopeus 15mm/min	
ISO testi			
MAX voima [kN]		Laajentunut reikä mittaus 1 [mm]	Laajentunut reikä mittaus 2 [mm]
26,1		14,23	14,15
25,6		14,02	13,94
25,7		13,91	13,87
27,6		14,37	14,32
28,6		14,44	14,42
26,8		14,11	14,05
KESKIARVO			14,152
Reiänlaajennussuhde			41,52 %

Materiaali EN 1.4318			
Pidinvoima 600 kN		Nopeus 15mm/min	
KWI testi			
MAX voima [kN]		Laajentunut reikä mittaus 1 [mm]	Laajentunut reikä mittaus 2 [mm]
227,2		13,72	14,09
227,2		14,26	14,16
241,7		15,45	15,68
239,3		13,93	14,07
229,6		13,56	13,78
KESKIARVO			14,27
Reiänlaajennussuhde			42,70 %



Materiaali EN 1.4521			
Pidinvoima 50 kN		Nopeus 15mm/min	
ISO testi			
MAX voima [kN]		Laajentunut reikä mittaus 1 [mm]	Laajentunut reikä mittaus 2 [mm]
27,2		22,81	22,97
26,3		22,03	22,18
26,7		22,36	22,59
27,8		22,49	22,66
28,1		22,31	22,61
KESKIARVO			22,501
Reiänlaajennussuhde			125,01 %

Materiaali EN 1.4521			
Pidinvoima 600 kN		Nopeus 15mm/min	
KWI testi			
MAX voima [kN]		Laajentunut reikä mittaus 1 [mm]	Laajentunut reikä mittaus 2 [mm]
126		15,33	15,37
123,5		14,07	13,99
123		14,42	14,32
123,5		13,96	13,96
120,6		13,49	13,68
120,1		13,37	13,73
KESKIARVO			14,14
Reiänlaajennussuhde			41,40 %

Materiaali EN 1.4301			
Pidinvoima 50 kN		Nopeus 15mm/min	
ISO testi			
MAX voima [kN]		Laajentunut reikä mittaus 1 [mm]	Laajentunut reikä mittaus 2 [mm]
20,2		17,25	17,38
14,8		15,17	15,18
18		16,29	16,03
16,6		15,61	15,66
16,8		15,86	16,01
KESKIARVO			16,044
Reiänlaajennussuhde			60,44 %

Materiaali EN 1.4301			
Pidinvoima 600 kN		Nopeus 15mm/min	
KWI testi			
MAX voima [kN]		Laajentunut reikä mittaus 1 [mm]	Laajentunut reikä mittaus 2 [mm]
145,1		17,04	16,9
145,1		16,61	16,4
140,2		16,76	16,67
135,3		15,12	15,07
156,4		16,25	16,45
166,2		16,6	17,18
KESKIARVO			16,42
Reiänlaajennussuhde			64,20 %

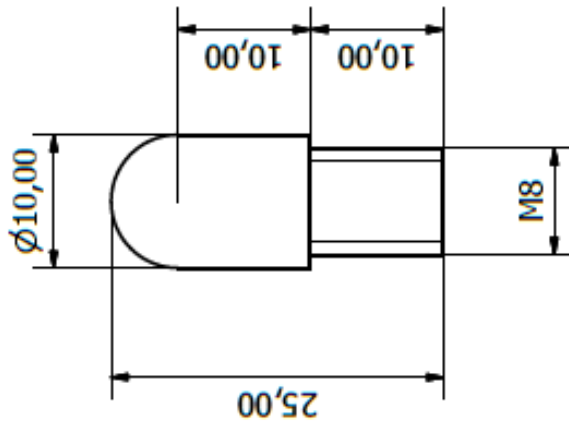
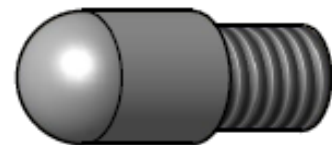
Materiaali B24+ZF100-B      3mm			
Pidinvoima 50 kN                      Nopeus 15mm/min			
ISO testi			
MAX voima [kN]		Laajentunut reikä mittaus 1 [mm]	Laajentunut reikä mittaus 2 [mm]
33,4		14,05	14,05
38		16,01	15,91
39,3		15,9	15,97
37,5		15,04	15,14
35,6		14,6	14,6
			KESKIARVO
			15,127
			Reiänlaajennussuhde
			51,27 %

Materiaali B24+ZF100-B      3mm			
Pidinvoima 600 kN                      Nopeus 15mm/min			
KWI testi			
MAX voima [kN]		Laajentunut reikä mittaus 1 [mm]	Laajentunut reikä mittaus 2 [mm]
265,9		14,85	14,65
261,1		14,31	14,33
268,3		15,04	14,65
263,5		13,94	13,66
278		14,97	14,34
265,9		14,91	14,23

KESKIARVO	14,474
Reiänlaajennussuhde	44,74 %

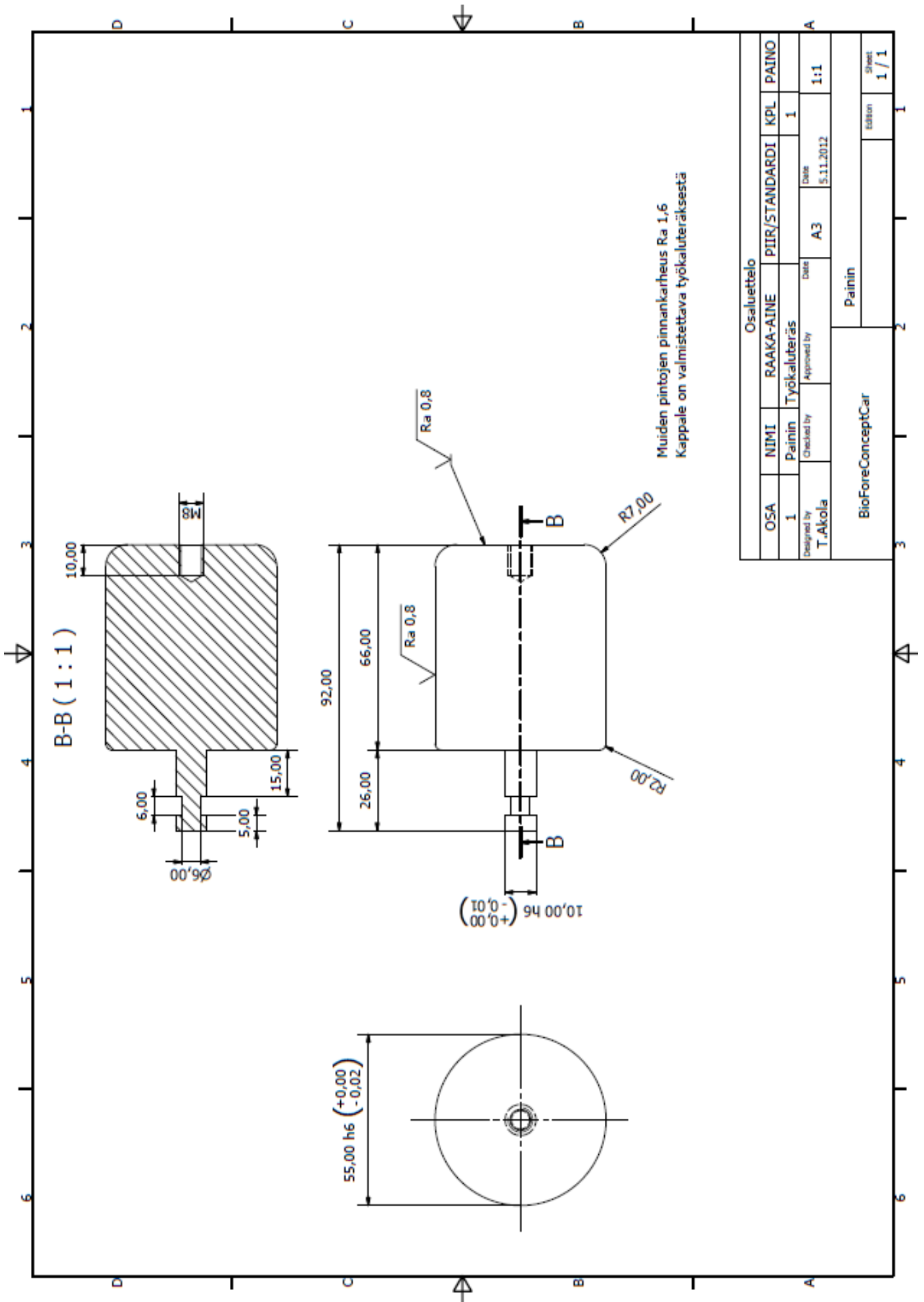
Materiaali HX 420 LAD      2,8mm			
Pidinvoima 50 kN              Nopeus 15mm/min			
ISO testi			
MAX voima [kN]		Laajentunut reikä mittaus 1 [mm]	Laajentunut reikä mittaus 2 [mm]
48		22,31	22,13
44,9		21,89	21,73
45,1		21,6	21,79
37,8		19,99	19,89
42,8		21,48	21,42
			KESKIARVO
			21,423
			Reiänlaajennussuhde
			114,23 %

Materiaali HX 420 LAD      2,8mm			
Pidinvoima 600 kN            Nopeus 15mm/min			
KWI testi			
MAX voima [kN]		Laajentunut reikä mittaus 1 [mm]	Laajentunut reikä mittaus 2 [mm]
194,6		16,34	15,18
199,5		14,89	14,59
198		15,67	15,09
199		15,78	14,74
196,6		16,53	15
195,1		16,67	14,82
			KESKIARVO
			15,381
			Reiänlaajennussuhde
			53,81 %

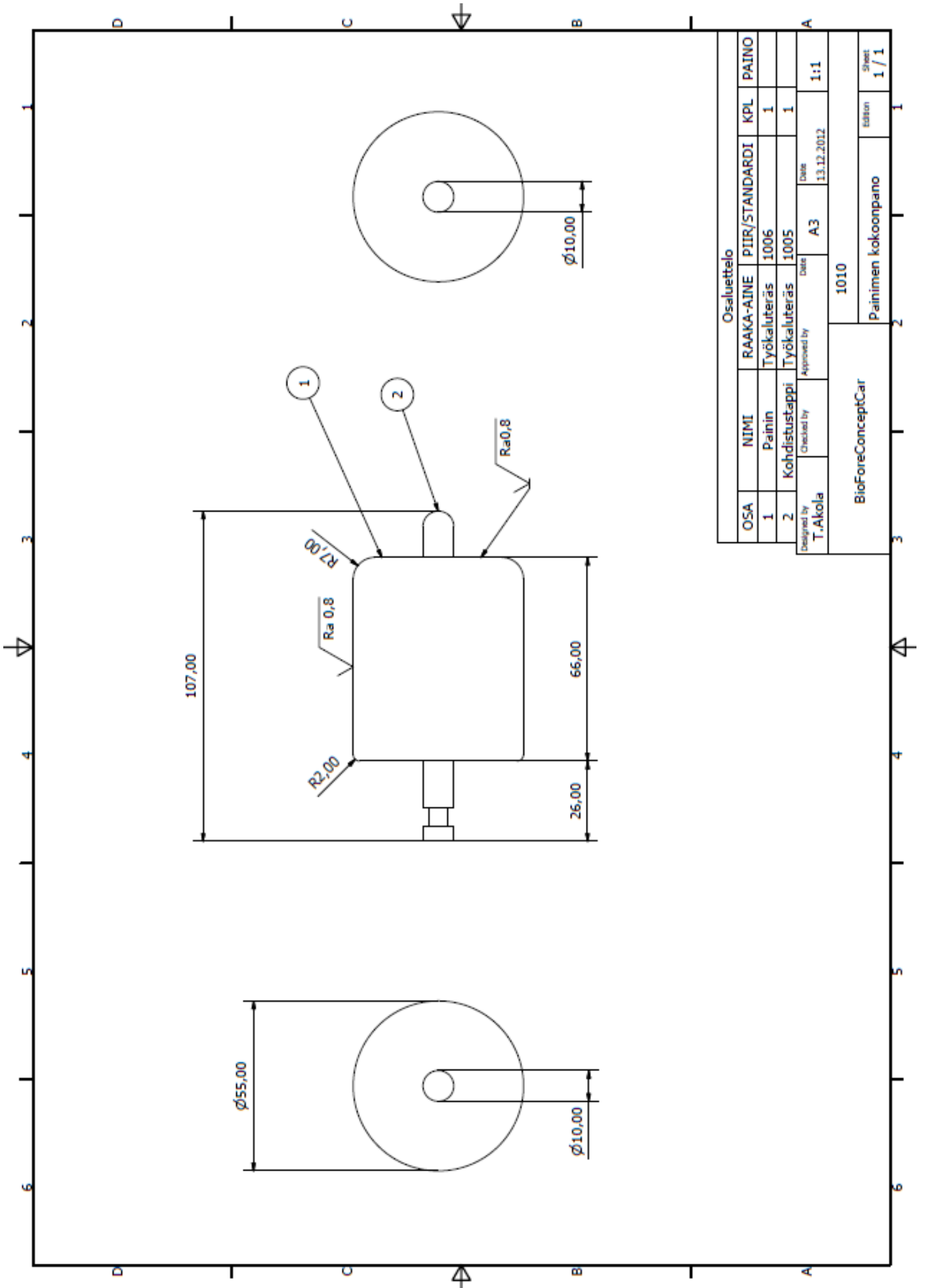


Yleispinnankarheus Ra 1,6

Osaluettelo									
OSA	NIMI	RAAKA-AINE	PIIR/STANDARDI	KPL	PAINO				
1	Kohdistustappi	Työkäluuteräs	1005	1					
Designed by T.Akola	Checked by	Approved by	Date	A4	Date				
			2.10.2012		2:1				
BioForeConceptCar		1005							
			Kohdistustappi		Edition		Sheet		
							1 / 1		



Osaluettelo					
OSA	NIMI	RAAKA-AINE	PIIR/STANDARDI	KPL	PAINO
1	Painin	Työkaluteräs		1	
Designed by T. Akola		Checked by	Date	Date	Scale
			A3	5.11.2012	1:1
BioForeConceptCar			Painin		
			edition	Sheet	
				1 / 1	



Osaluettelo					
OSA	NIMI	RAAKA-AINE	PIIR/STANDARDI	KPL	PAINO
1	Painin	Työkaluteräs	1006	1	
2	Kohdistustappi	Työkaluteräs	1005	1	
Designed by T.Äkola		Checked by	Date	Date	
			A3	13.12.2012	1:1
BioForeConceptCar			1010		
Painimen kokoonpano			Sheet		
			1 / 1		