



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
VASA YRKESHÖGSKOLA
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Keijo Silvasti

TILASTOLLINEN KOON VAIKUTUS STAATTISESSA KUORMITUKSESSA

Tekniikan yksikkö
2015

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Keijo Silvasti
Opinnäytetyön nimi	Tilastollinen koon vaikutus staattisessa kuormituksessa
Vuosi	2015
Kieli	suomi
Sivumäärä	89 + 4 liitettä
Ohjaaja	Matti Makkonen

Tarkoituksena tässä työssä oli tutkia materiaalin käyttäytymistä, eli käykö kuten väsymisessä: lujuus alenee, kun kappaleen koko kasvaa. Aikaisempien tietojen perusteella voidaan epäillä, että ilmiö esiintyy lähinnä haurailta aineilla, siksi tutkitaan sitkeyden vaikutusta.

Tutkittavana materiaalit olivat lattasauvat, materiaali oli alunperin tarkoitus olla S-235-J0 (tai S-235-J2) -terästä, toinen tutkittu materiaali oli valurauta (EN-GJL-350).

Vetosauvoista tehtiin vetosarjoja, tarkoituksena oli saada paljon mittaustuloksia myöhemmin tehtävää tilastollista analyysiä varten. Tehtiin myös Charpy-iskukokeet S-235- lattasauvoille. Työ alkoi koessauvojen piirtämisellä Inventor ohjelmistoa käyttäen. Tämän jälkeen kappaleet leikattiin konepajalla, ja osat toimitettiin Technobotniale, jossa tehtiin veto- ja iskukokeet. Terässauvojen kokeet tehtiin kolmesta eri koeerästä, joita oli lämpökäsittely eri tavoin, tällä tavalla saatiin aikaan eri tutkimustuloksia.

Seuraava vaihe oli saatujen mittaustulosten tilastointi, ja tulosten analysointi. Tulosten perusteella voitiin huomata, että koe-erissä 1 ja 2 pienempien Lc 50-vetokoesauvojen vetomurtolujuus oli suurempi kuin isompien Lt 400-sauvojen.

Erästä 3 tehtiin vain Charpy-koe. Erä 4 oli uudelleenhehkutettu erä 3, joka vedettiin -60 °C lämpöisenä. Tässä erässä Lt 400-sauvojen vetomurtolujuus oli suurempi kuin Lc 50-sauvojen. Tehtiin myös FEM-analyysi Inventorilla, ja verrattiin kokeissa saatuja tuloksia siihen.

Lopputuloksena oli päätelmä, että koon vaikutus on syytä ottaa huomioon, kun käytetään terästä koneenrakennuksen materiaalina.

Avainsanat teräs, murtuminen, sitkeys, vetokoe, Charpy-iskukoe

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES
Kone- ja tuotantotekniikka

ABSTRACT

Author	Keijo Silvasti
Title	Statistical Effect of Size in Static Stress
Year	2015
Language	Finnish
Pages	89 + 4 Appendices
Name of Supervisor	Matti Makkonen

The purpose of this thesis work was to examine mechanical behaviour of engineering materials, whether the strength is reduced when the size of the object increases. On the basis of previous studies, it was possible to assume, that this phenomenon occurs mostly in brittle materials, that is why we examined the effect of toughness.

The methods used in this thesis were tensile strength test and the Charpy impact test. The material that was tested was S235 steel. There was the total of three test series. Another tested material was cast iron EN-GJL-350.

The S235 results were as expected in two first test series, but the results in last test series were deviating from the others.

The conclusions were that there was the size has an effect on the strength of material, and it should be taken into account when steel is used as an engineering material.

Keywords Steel, fracture, toughness, Charpy impact test, tensile testing

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO	5
1 JOHDANTO.....	10
2 TEORIAA.....	12
2.1 Materiaalin sitkeys	12
2.2 Haurasmurtuma.....	15
2.3. Sitkeä murtuma.....	16
2.4. Murtumismekaniikka.....	17
2.5 Sitkeyden testausmenetelmät	20
2.6 Tilastollinen koon vaikutus väsymislujudessa.....	24
2.7. Tilastollinen koon vaikutus staattiseen lujuuteen	29
3 TYÖN SUORITUS	30
3.1. S235-vetosauvojen kuvien piirtäminen	30
3.2. S235-Sauvojen valmistus	30
3.3. Kokeiden suoritus S235 sauvoilla	32
3.4. Analyysit.....	42
FEM analyysi Lt 400-sauva.....	42
FEM analyysi Lc 50-sauva	46
3.5. Tuloksia	49
3.6. S235-sauvojen tulosten analysointia	55
3.7. EN-GJL-350 Valurautasauvat	73
3.8. Kokeiden suoritus valurautasauvoille.....	74
3.9. Valurautasauvojen tuloksia	80
3.10. Valurautasauvojen tulosten analysointia	82
4 JOHTOPÄÄTÖKSIÄ	89
LÄHTEET.....	90
LIITTEET	

KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuva 1.	Lämpötila riippuvuus iskusitkeyteen	s. 13
Kuva 2.	Erilaiset murtumatyypit	s. 14
Kuva 3.	Sitkeän murtuman syntyminen	s. 16
Kuva 4.	Särön eri kuormitustavat	s. 19
Kuva 5.	Charpy iskukoesauvan asettelu.	s. 20
Kuva 6.	Charpy-koelaitteisto	s. 21
Kuva 7.	Energia absorptio-lämpötiläkäyrä, lämpökäsittely	s. 22
Kuva 8.	Vetokone.	s. 24
Kuva 9.	Charpy-sauva	s. 31
Kuva 10.	Lc 50-vetosauva	s. 31
Kuva 11.	Lc 400-vetosauva	s. 33
Kuva 12.	Rauta-hiili tasapainopiirros	s. 33
Kuva 13.	Charpy-sauva kokeen jälkeen.	s. 34
Kuva 14.	Lc 400-sauva kiinni vetokoneessa	s. 35
Kuva 15.	Vedettävä sauva alkaa kuroutua	s. 35
Kuva 16.	Sauva on katkennut	s. 36
Kuva 17.	Katkenneita Lt 400-sauvoja erästä 2	s. 36
Kuva 18.	Katkennut Lc 50-sauva	s. 37

Kuva 19.	Charpy-sauvoja erästä 3	s. 38
Kuva 20.	Putkieristettä Lt400-sauvassa	s. 39
Kuva 21.	Jäinen sauvan pinta vedon jälkeen	s. 39
Kuva 22.	Lc 50-sauva putkieristeessä	s. 40
Kuva 23.	Lt 400-sauvoja erästä 3 (merkitty kuvassa eräksi 4)	s. 41
Kuva 24.	Katkenneita Lc50-sauvoja erästä 3	s. 41
Kuva 25.	FEM analyysin tulos Lt 400-sauvalle	s. 42
Kuva 26.	Suurennettu kuva Lt 400-sauvan vetopäästä	s.43
Kuva 27.	Von Mises Stress Lt 400-sauvalle	s. 44
Kuva 28.	1. pääjännitys Lt 400-sauvalla	s. 44
Kuva 29.	FEM analyysin tulos Lc 50-sauvalle	s. 46
Kuva 30.	Suurennettu kuva Lc 50 sauvan vetopäästä	s. 47
Kuva 31.	Von Mises Stress Lc 50-Sauvalle	s. 48
Kuva 32.	1. pääjännitys Lc 50 sauvalle	s. 48
Kuva 33.	Jännitys-venymäkuvio erä 1.	s 55
Kuva 34.	Jännitys-venymäkuvio erä 2.	s. 56
Kuva 35.	Jännitys-venymäkuvio erä 3.	s. 57
Kuva 36.	Lc 50 pinta-alan mukaan	s. 59
Kuva 37.	Lc 50 tilavuuden mukaan	s. 60
Kuva 38.	Lt400 pinta-alan mukaan	s. 61

Kuva 39.	Lt400 tilavuuden mukaan	s. 62
Kuva 40.	Lc 50 pinta-alan mukaan.	s. 64
Kuva 41.	Lc50 tilavuuden mukaan.	s. 65
Kuva 42.	Lt400 pinta-alan mukaan.	s. 66
Kuva 43.	Lt400 tilavuuden mukaan	s. 67
Kuva 44.	Lc 50 pinta-alan mukaan	s. 69
Kuva 45.	Lc 50 tilavuuden mukaan	s. 70
Kuva 46.	Lt400 pinta-alan mukaan	s. 71
Kuva 47.	Lt400 tilavuuden mukaan	s. 72
Kuva 48.	Valurautasauva koe-erästä K, Lc 45, d 10.	s. 73
Kuva 49.	Valurautasauva koe-erästä T, Lc 200, d 20.	s. 74
Kuva 50.	K ja T koe-eristä suoritettiin kummastakin 10 vetokoetta.	s. 75
Kuva 51.	Vetokoe K-erän sauvalla.	s. 76
Kuva 52.	K-erän sauvoja ennen koetta.	s. 77
Kuva 53.	T- erän sauvoja ennen koetta.	s. 77
Kuva 54.	Vetokoe T- erän sauvalla.	s. 78
Kuva 55.	Katkenneita T- erän sauvoja.	s. 77
Kuva 56.	Katkenneita K- erän sauvoja.	s. 77
Kuva 57.	Jännitys-venymä kuvio K- ja T erän sauvoille.	s. 81
Kuva 58.	Jännitys-venymä kuvio K- ja T erän sauvoille.	s. 81
Kuva 59.	K-sauva pinta-alan mukaan	s. 83

Kuva 60. K-sauva tilavuuden mukaan s. 86

Kuva 61. T-sauva pinta-alan mukaan s. 87

Kuva 62. T-sauva tilavuuden mukaan s. 88

TAULUKOT

Taulukko 1. Erä 1/ Lc 50 s. 50

Taulukko 2. Erä 1/ Lt400 s. 50

Taulukko 3. Erä 2/ Lc 50 s. 51

Taulukko 4. Erä 2/ Lt400 s. 52

Taulukko 5. Erä 3/ Lc 50 s. 53

Taulukko 6. Erä 3/ Lt400 s. 54

Taulukko 7. Erä 1 tulokset. s. 55

Taulukko 8. Erä 2 tulokset. s. 56

Taulukko 9. Erä 3 tulokset. s. 57

Taulukko 10. Erän 1 Ksize kerroin. Erä 1/ Lc 50 s. 58

Taulukko 11. Erän 2 Ksize kerroin. Erä 2/Lc 50 s. 63

Taulukko 12. Erän 3 Ksize kerroin s. 68

Taulukko 13. K-erän sauvat s. 80

Taulukko 14. T-erän sauvat s. 81

Taulukko 15. ”Normaalisti” katkenneet T-erän sauvat s. 82

Taulukko 16. Valurautasauvojen K- ja T-sauvojen K ja Ksize kerroin s. 84

LIITELUETTELO

LIITE 1. S235 Koesauvojen piirustukset

LIITE 2. Veto ja iskukokeiden tuloksia

LIITE 3. FEM analyysin tulokset taulukossa

LIITE 4. Koonvaikutuskertoimet-aulukot

1 JOHDANTO

Työn tarkoituksena oli tutkia materiaalin käyttäytymistä monotonisessa kuormituksessa, eli käykö kuten metallien väsymislujuudessa: lujuus alenee, kun kappaleen koko kasvaa. Aikaisempien tietojen perusteella voitiin epäillä, että ilmiö esiintyy lähinnä haurilla aineilla, siksi tässä työssä tutkitaan myös sitkeyden vaikutusta ilmiöön.

Asiaan liittyviä aiempia tutkimuksia on mm. tekn. tri M. Makkosen väsymislujuuden tilastollinen ennustaminen /5/. Se käsittelee alkusäröjakaumiin perustuvaa väsymislujuuden mitoitustapaa.

Aineiden murtumiseen liittyviä ensimmäisiä tutkimuksia on teki jo vuonna 1939, ja erityisesti 60-luvulla, ruotsalainen professori W. Weibull. Häntä voidaan pitää yhtenä tämän tutkimusalan uranuurtajista, hänen tutkimustuloksiaan mm. posliinille löytyy, mutta teräksille ei liene tehty. /9/.

Tutkittavana materiaalit olivat teräslevystä leikatut lattasauvat, materiaali oli alunperin tarkoitus olla S-235-J0 (tai S-235-J2) terästä. Toinen tutkittu materiaali oli EN-GJL-350 valurauta.

Terästen koneessa pitkille Lt 400-sauvoille ja lyhyille Lc50-sauvoille tehtiin 3 vetosarjaa, tarkoituksena oli saada paljon mittaustuloksia myöhemmin tehtävää tilastollista analyysiä varten. Tehtiin myös Charpy-iskukokeet S-235-lattasauvoille. Työ alkoi koesauvojen piirtämisellä Inventor 2013 ohjelmistoa käyttäen. Tämän jälkeen kappaleet tilattiin. Ne leikattiin konepajalla, ja osat toimitettiin Technobotnialle, jossa tehtiin veto- ja iskukokeet.

Tehtiin koesarjat 1-3. Eristä tehtiin sekä veto- että iskukokeet.

Seuraava vaihe oli saatujen mittaustulosten tilastointi, ja tulosten analysointi. Tulosten perusteella voitiin huomata, että koe-erissä 1 ja 2 pienempien Lc 50 veto- koesauvojen vetomurtolujuus oli suurempi kuin isompien Lt 400 sauvojen. Tässä tapauksessa teoria koonvaikutuksesta lujuuteen piti hyvin paikkansa.

Valuraudalle tehtiin vetokokeet 10 ja 20 mm halkaisijan sauvoille, joiden koepituus Lc olivat vastaavasti 45 ja 200 mm.

Kiitokset:

- Wärtsilä Oyj:lle koemateriaalista valurautakoeasauvojen tekemiseen
- Asko Hannukselalle VAKK:sta valurautakoeasauvojen valmistuksesta
- Marko Rantasalolle VAMK:sta avusta lattasauvojen koestuksessa
- Petter Forthille Noviasta avusta valurautasauvojen koestuksessa
- Matti Makkoselle työni ohjaamisesta.

2 TEORIAA

Tämä luku kertoo työn teoriapohjasta.

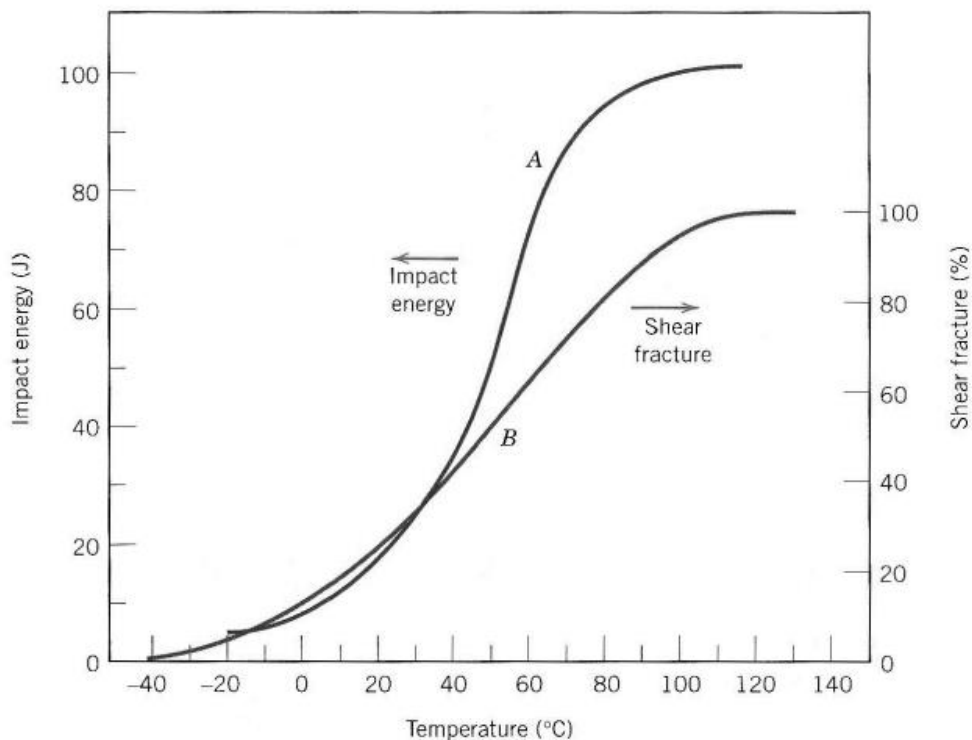
2.1 Materiaalin sitkeys

Sitkeä murtuma ja hauras murtuma

Seostamattomien ja niukkaseosteisten terästen mikrorakenne on suurimmaksi osaksi ferriittiä. Niille on tyypillistä murtumiskäyttäytymisen muutos sitkeästä hauraaksi transitiolämpötila-alueella. Transitiolämpötila on tyypillisesti huoneenlämpötilan ja -100 °C välillä. Teräksen haurautta tai sitkeyttä kuvataan yleisimmin iskusitkeys-käsitteellä. Aineenkoetustavasta riippuen puhutaan myös murtumissitkeydestä, tai yksinkertaisesti vain sitkeydestä. /2, 8/

Sitkeä-hauras muutos liittyy lämpötilariippuvuuteen mitatussa iskuenergian absorptiossa.

Korkeammissa lämpötiloissa CNV-energia (Charpy v-kokeen energia) on suhteellisen suuri, riippuvuussuhteessa sitkeään murtumatyyppiin. Kun lämpötilaa alennetaan, iskuenergia putoaa yhäkkinä yli suhteellisen kapean lämpötilan vaihteluvälin, alle sen missä energialla on vakio, mutta pieni arvo, tällöin murtuma on hauras. (Kuva 1) /1, 251/



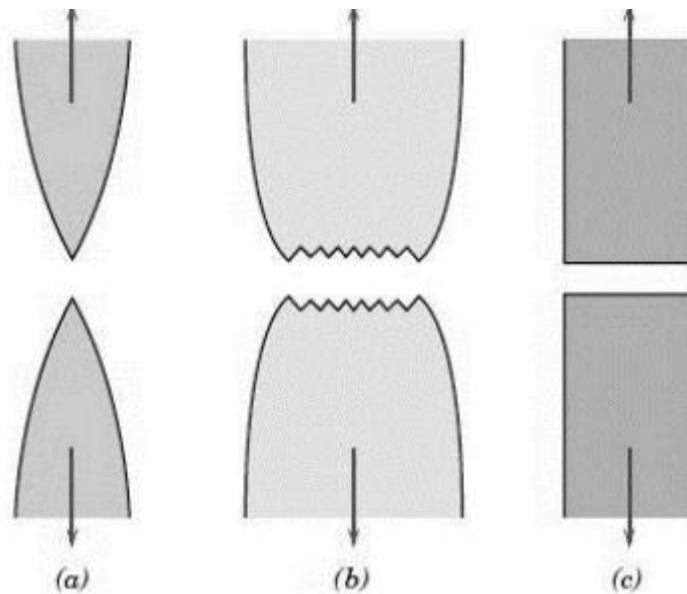
Kuva 1. Lämpötilariippuvuus Charpy v- iskutkeyteen (A) ja sitkeän murtuman osuus murtopinnasta (B) teräksellä A283 /1, 253/.

Murtuma on kahden tai useamman materiaalin osan irtoaminen seurauksena, jonka on aiheuttanut staattinen (jatkuva tai hitaasti muuttuva) jännitys lämpötilassa joka on suhteellisen alhainen aineen sulamislämpötilaan verrattuna. Murtuma voi ilmaantua myös väsymisen (kun syklinen eli jaksollinen jännitys esiintyy) ja virumisen (aikariippuvainen muodonmuutos, yleensä kohonneissa lämpötiloissa) seurauksena.

Vaikuttava jännitys voi olla aksiaalista- tai leikkausjännitystä.

Metalleilla kaksi murtumatyyppiä on mahdollista: sitkeä- ja haurasmurtuma. Luokitus perustuu materiaalin kykyyn kohdata plastinen eli palautumaton muodonmuutos.

Kuvassa 2 on esitetty murtumatyyppit.



Kuva 2. Erilaiset murtumatyypit, (a) täysin sitkeä murtuma, (b) tyypillinen sitkeä murtuma ja (c) täysin hauras murtuma /1, 237/.

Sitkeät materiaalit tyypillisesti osoittavat huomattavassa määrin palautumatonta muodonmuutosta ennen murtumista.

Toisaalta, normaalisti haurasmurtumassa on normaalisti vähän, tai ei ollenkaan plastista muodonmuutosta alhaisella energia-absorptiolla. Sitkeä ja hauras ovat suhteellisia termejä, joko tietty murtuma on yksi moodi tai toiset riippuvat tilanteesta. Sitkeys voi myös määrittää termeillä prosenttia pitenemisestä, prosenttia pinta-alan pienentymisestä. Lisäksi, materiaalin sitkeys on funktio lämpötilasta, jännityksen nopeudesta, ja jännityksen asemasta (suunnasta). Kaikki murtumatyypit sisältävät kaksi askelta – särön muodostuminen ja eteneminen – ovat tulosta jännityksestä. Murtumisen tyyppi on suuresti riippuvainen särön etenemisestä. /1, 236/

Sitkeä murtuma kuluttaa paljon energiaa aineen plastiseen muodonmuutokseen murtoalueen läheisyydessä ja vaatii suuria siirtymiä edetäkseen.

2.2 Haurasmurtuma

Haurasmurtuma kuluttaa vähän energiaa. Haurasmurtuma voi edetä lähes äänennopeudella.

Haurasmurtuman tekee vaaralliseksi sen vähäinen energia-absorptio. Se tekee murtumisen arvioimisen perinteisin lujuusopin keinoin erittäin vaikeaksi.

Haurasmurtuma voi edetä teräksessä joko raerajamurtumana tai lohkomurtumana.

Puhdas raerajamurtuminen on harvinainen. Lohkomurtumaa edeltää plastinen muodonmuutos, joka ydintää mikrosärön.

Haurasmurtuman etenemisessä erotetaan kaksi vaihetta; ydintyminen ja eteneminen. Ydintymisellä tarkoitetaan särön muodostumista ehyeen aineeseen. Se on kynnysarvo, jonka jälkeen murtuminen etenee hauraassa aineessa niin pitkälle kuin energiaa riittää. Murtuman eteneminen edellyttää myös riittävää jännitystilaa särön kärjen läheisyydessä ja jännitystilaa kolmiakselisuutta.

Jos plastisen muodonmuutoksen mahdollistavat dislokaatiomekanismit eivät kykene toimimaan, materiaaliin ydintyy haurasmurtuma.

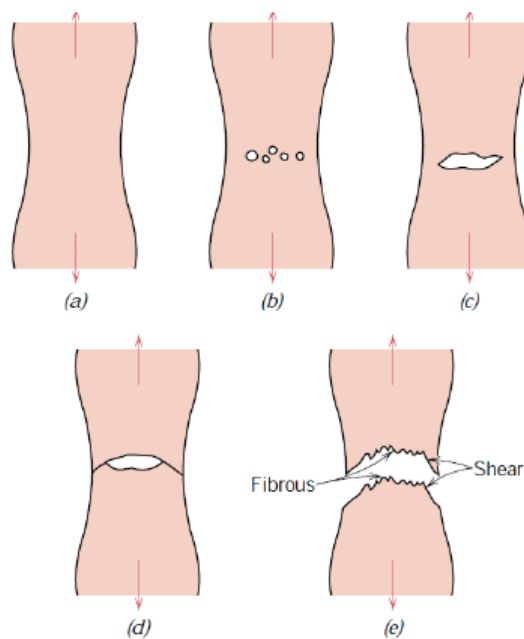
Sitä edesauttavat tekijät:

- korkea vetojännitys
- alhainen lämpötila
- suuri ainepaksuus
- kolmiakselinen jännitystila
- hauras materiaali
- jäännösjännitykset
- iskumainen kuormitus
- jännityskeskittymät
- särömäiset alkuviaat.

Viisi ensin mainittua tekijää voidaan mitata tai laskea suhteellisen helposti. Kolme akselinen jännitystila syntyy lovelliseen kappaleeseen jos loven geometria esittää poikkileikkauksen suppenemisen jännitykseen nähden kohtisuorissa suunnissa. Iskumainen kuormitus on vaarallinen, koska se edistää haurasmurtuman ydintymistä, ja se aiheuttaa hetkellisen jännitystason nousun /2, 8-9/.

2.3. Sitkeä murtuma

Sitkeässä murtumassa tapahtuu ydintyminen, kasvu, raerajan murtuminen jatkuvana metallin poikkipinta-alan vähenemisenä kunnes se on nolla tai leikkautuu pitkin suurinta mahdollista leikkaustasoa. Sitkeän murtuman ydintyminen ja kasvaminen alkaa tavallisesti toisen faasin partikkeleista /1, 466/. Kuvassa 3 on esitetty sitkeän murtuman syntyminen vetokuormituksen alaisena.



Kuva 3. Sitkeän murtuman syntyminen. (a) Kuroutuminen (b) Pienten onkaloiden muodostuminen (c) Onkaloiden yhteenkasvamisen särön muotoon (d) Särön eteneminen (e) Lopullinen murtuminen 45° kulmassa jännityksen suuntaan /1, 237/.

2.4. Murtumismekaniikka

Murtumismekaniikan avulla voidaan selvittää yhteydet materiaalin ominaisuuksiin, jännityksen määrän, säröä tuottavien virheiden ja särön syntymisen ja etenemisen välillä.

Mitatut murtumislujuudet ovat useimmille materiaaleille huomattavasti alemmat kuin teoreettisiin atomien välisiin sidoksiin perustuvat teoreettiset laskelmat. Tätä epäjohdonmukaisuutta on selitetty mikroskooppisilla virheillä tai halkeamilla, joita on materiaalin sisällä. Nämä virheet ovat haitta murtumislujuudelle, koska vaikuttava jännitys voi vahvistua riippuen särön suunnasta ja geometriasta.

Jos oletetaan, että särö on vastaava kuin elliptinen reikä tason läpi ja se on koh-tisuora vaikuttavaan jännitykseen nähden, maksimijännitys σ_m esiintyy särön kärjessä ja voidaan arvioida kaavasta

$$\sigma_m = 2\sigma_0 \left(\frac{a}{\rho_t}\right)^{1/2} \quad (1)$$

σ_m = maksimijännitys

σ_0 = nimellisjännitys

a = särön pituus

ρ_t = särön kärjen kaarevuussäde

Joskus suhdetta $\frac{a}{\rho_t}$ kutsutaan jännityskonsentraatiokerroimeksi K_t

jolla mitataan määrää, jonka ulkopuolinen jännitys vahvistaa särön kärkeen.

/1, 242- 243/

Maksimijännitys särön kärjessä voidaan laskea myös kaavalla

$$\sigma_{max} = \sigma \left(1 + 2 \frac{a}{b}\right) \quad (2)$$

σ on nimellisvetojännitys ja a ja b ovat ellipsin iso- ja pikkuakselien puolikkaat

$$\text{Määritellään termi } K_t = 2\sqrt{a/\rho} \quad (3)$$

a = särön pituus

ρ = särön kärjen kaarevuussäde

$$\text{myöskin } K_t = \sigma_{max}/\sigma$$

σ = maksimi kokonaisjännitys

/3, 410/

Tekijä K_t yksinkertaisesti kuvailee särön geometrisen vaikutuksen paikalliseen jännitykseen. K_t riippuu enemmän muodosta kuin koosta /3, 410/.

Lineaarielastisen murtumismekaniikan perussuure on jännitysintensiiteetti kerroin K . Se ottaa huomioon sekä särön koon että orientaation.

Haurasmurtuma lähtee etenemään, kun jännitysintensiiteetti saavuttaa materiaalille ominaisen kriittisen arvon /2, 14/.

Käyttämällä murtumismekaniikan periaatteita, on kehitetty yhtälö, jossa kuvailaan kriittistä jännitystä särön etenemiseen.

$$K_C = Y \sigma_C \sqrt{\pi a} \quad (4)$$

K_C = murtuman iskutkeys ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)

σ_C = kriittinen jännitys särön etenemiselle

a = särön pituus

Y = tapauskohtainen kerroin, joka riippuu jännityksen jakautumasta ja kappaleen muodosta

Suhteellisen ohuilla kappaleilla arvo K_C riippuu kappaleen paksuudesta. Kuitenkin, kun kappaleen paksuus on paljon suurempi kuin särön mittasuhteet,

K_C tulee riippumattomaksi paksuudesta.

Näissä olosuhteissa tason suuntaista jännitystä esiintyy. K_C arvo ohuille kapaleille tunnetaan nimellä murtumissitkeys K_{IC} . Se on määritetty myös

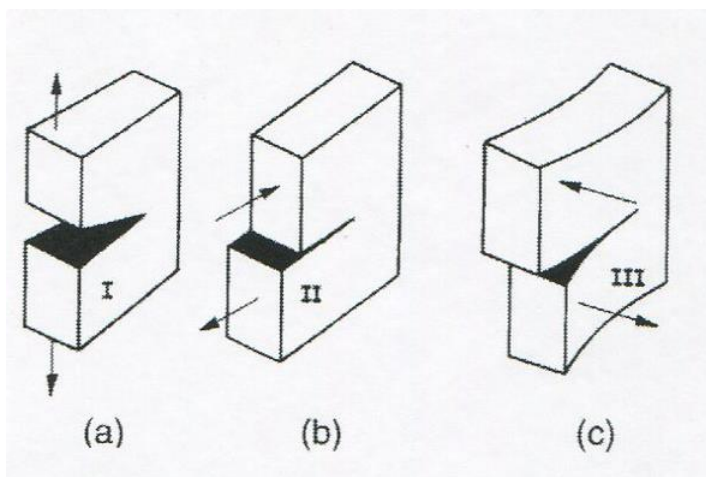
$$K_{IC} = Y \sigma \sqrt{\pi a} \quad (5)$$

Haurilla materiaaleilla on alhainen K_{IC} arvo, ja sitkeillä suhteellisen suuri arvo. K_{IC} on olennainen materiaalin ominaisuus, joka riippuu monista tekijöistä, eniten merkittäviä ovat lämpötila, jännitystaso ja mikrorakenne.

K_{IC} on murtuman sitkeys jota käytetään monissa tilanteissa. Haurilla materiaaleilla, joilla on alhainen K_{IC} :n arvo, ovat alttiita murtumiselle /1, 244-245/.

Särön kuormitustapoja on kolme. Kuormitustapa I avausmuoto, jännitys on vetojännitystä. Kuormitustapaa II kutsutaan liukumuodoksi tai leikkausjännitykseksi. Tässä tavassa jännitys on kohtisuorassa etenevää särörintamaa vastaan.

Tapaa III kutsutaan kiertomuodoksi, siinä on vääntöjännitystä. Kuvassa 4 on esitetty eri kuormitustavat. /3, 423-424/.



Kuva 4. Särön eri kuormitustavat: (a) avausmuoto, (b) liukumuoto, (c) kiertomuoto /3, 423/.

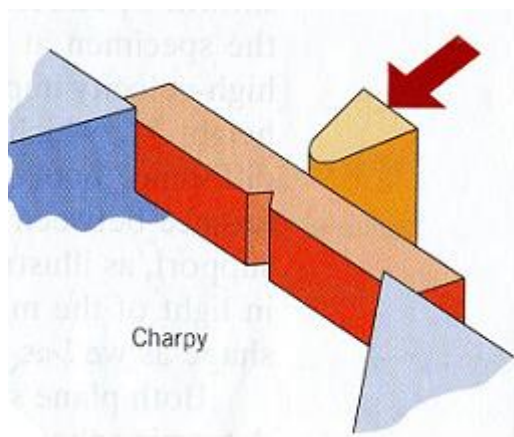
Vetokokeessa on kyseessä muoto a.

2.5 Sitkeyden testausmenetelmät

Charpy V –koe

Charpy V –kokeessa iskukoesauva, jossa on 2 mm syvyinen lovi, murretaan heilurivasaran avulla tietyssä lämpötilassa, ja kulunut energia mitataan.

Iskukoe esitetään kuvassa 5.

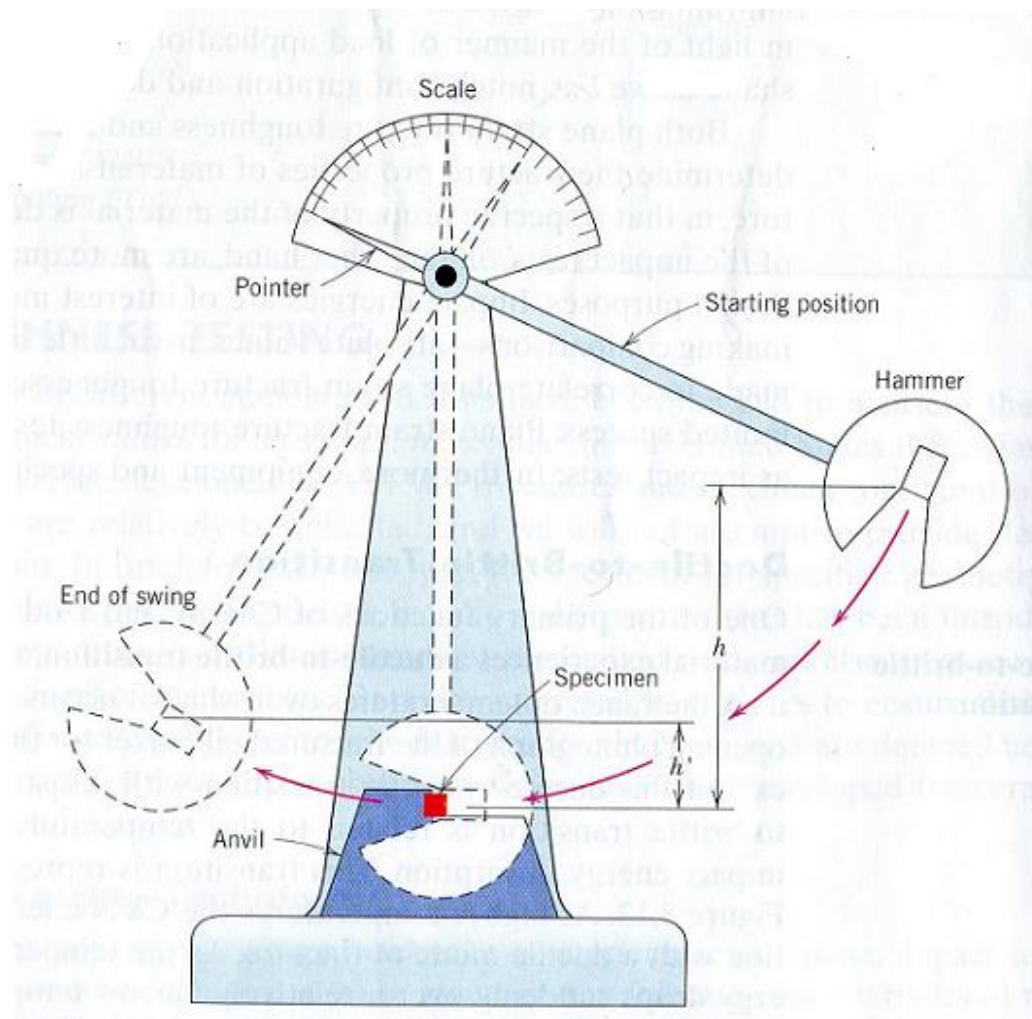


Kuva 5. Charpy-iskukoesauvan asettelu /1, 252/.

Charpy V –kokeen tulos on riippuvainen levyn päävalssaussuunnasta siten, että päävalssaussuuntaan nähden pitkittäisillä koesauvoilla on suurempi energia absorptio kuin poikittaisilla sauvoilla.

Charpy V –kokeella määritetty transitiokäyttäytyminen riippuu myös teräksen koostumuksesta /2, 10 – 11/.

Iskukoe suoritettiin SFS standardin SFS-EN ISO 148-1 mukaisesti /11/.



Kuva 6. Charpy-koelaitteisto /1, 252/.

Charpy V-laitteiston toiminta: Paikalleen kiinnitetty vasara vapautetaan korkeudelta h , ja se osuu koesauvaan, ja vasara heilahtaa korkeudelle h' . Murtumisessa kulutettu energia vastaa korkeuseroa välillä $h - h'$. Tämä energia absorptio on siis mitattu iskuenergia. Charpy V-laitteisto on esitetty kuvassa 6.

Sitkeä- haurasmurtuma on läheisesti lämpötilasta riippuvainen mitatussa iskuenergian absorptiossa. /1, 251/.

Absorboitu energia on siis

$$E_f = mg(h_0 - h_1) \quad (6)$$

E_f = plastisen deformaation energian summa

m = vasaran massa

g = putoamiskiihtyvyyys

h_0 = iskuvasaran alkuperäinen korkeus

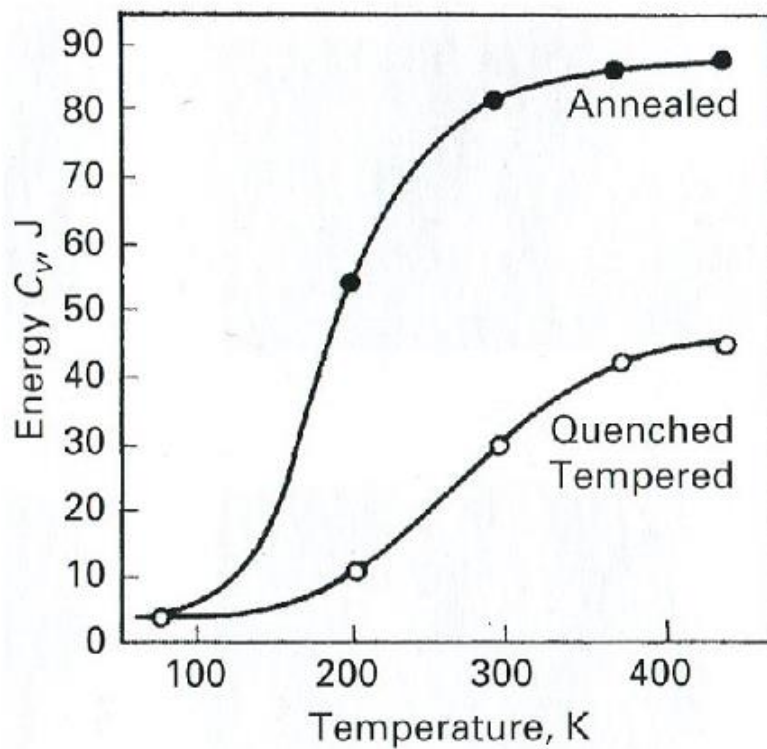
h_1 = vasaran loppukorkeus

Ensimmäinen termi on tärkeä, ja voidaan olettaa että Charpy energia on

$$CV \approx mg(h_0 - h_1) \quad (7)$$

Absorboituun energiaan vaikuttaa myös teräksen lämpökäsittely.

Kuvassa 7 ylempi käyrä kuvaa lämpötilan vaikutusta iskusitkeyteen, ylempi käyrä on esim. hehkutettua terästä, ja alempi käyrä sammutettua ja päästettyä terästä (nuorrutusterästä) /3, 527/.



Kuva 7. Energia absorptio-lämpötiläkäyrä, lämpökäsittelyn vaikutus.

Vetokoe

Yksi yleisimmistä mekaanisista jännitys-rasitustesteistä suoritetaan jännitystä mitaamalla. Testiä voidaan käyttää useisiin materiaalin mekaanisten ominaisuuksien varmistamiseen, joilla on merkitystä suunnittelun kannalta. Koekappale kiinnitetään vetokoneeseen, joka vetää kappaletta. Jännitys ja pituuden muutos mitataan. Vetokone on kuvassa 8.

Jännitys

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (8)$$

F = kuorma (N)

A_0 = poikkipinta – ala (m²)

suhteellinen venymä ε

$$\varepsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (9)$$

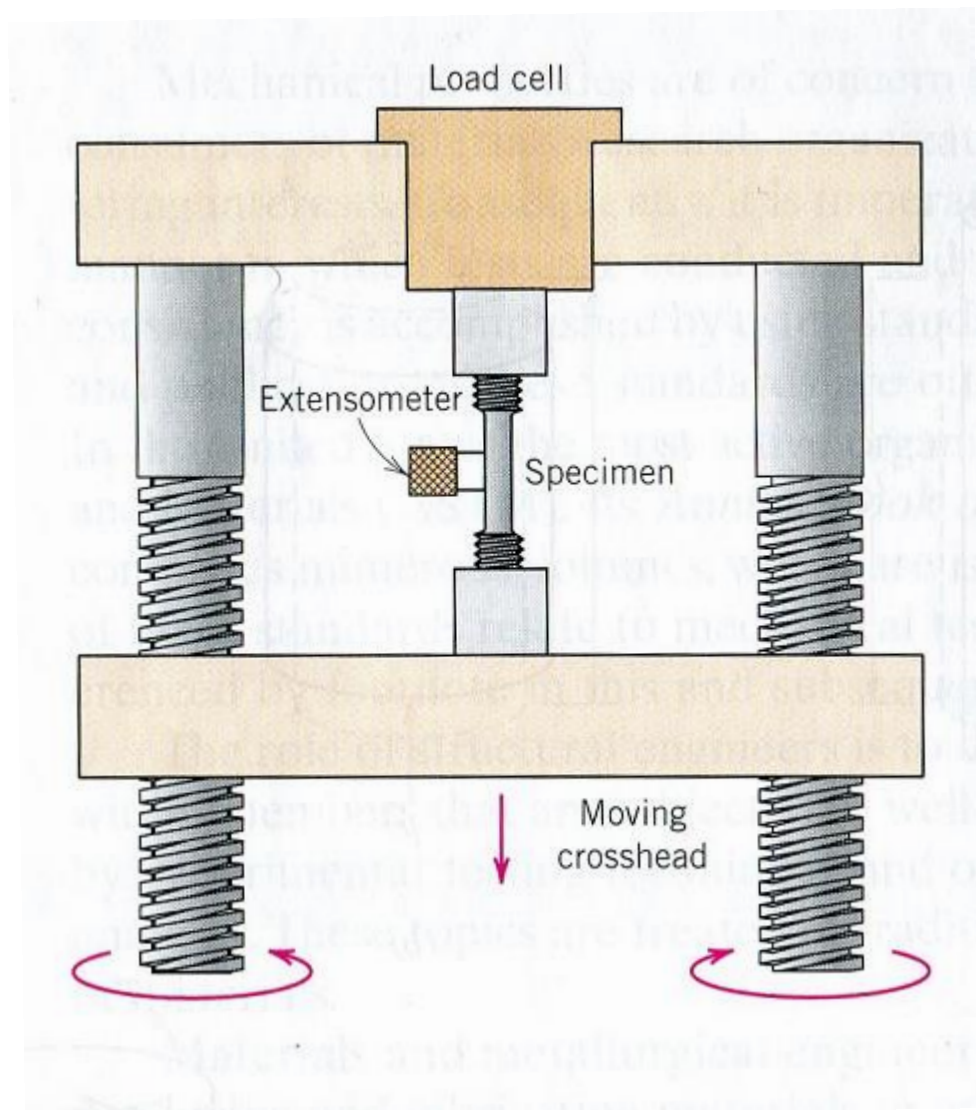
Hooken laki

$$\sigma = E\varepsilon \quad (10)$$

σ =jännitys

E = kimmokerroin (teräksellä $E \approx 207$ GPa)

/1, 152-154/



Kuva 8. Vetokone /1, 154/.

Vetokoe suoritettiin standardin SFS-EN ISO 6892-1 mukaan /10/.

2.6 Tilastollinen koon vaikutus väsymislujudessa

Koneenosan koko vaikuttaa väsymisrajaan. On havaittu seuraavaa asia: mitä suurempi koneenosa on, sitä matalampi on myös sen väsymisraja.

Ajatellaan ensin niin, että väsymisamplitudi on kaikkialla sama. Väsymisraja on satunnaismuuttuja, se johtaa siihen että isommissa pinnoissa väsymisraja on todennäköisesti matalampi kuin pienissä pinnoissa, sen takia että isommasta pinnas-

ta löydetään todennäköisemmin suurempi defekti (virhe) kuin pienestä pinnasta. Väsymissärö alkaa yleensä ydintymään jostakin defektistä.

Y. Murakami on kehittänyt menetelmän, joka perustuu defektijakaumiin ja tilastolliseen ääriarvomenetelmään /8/

Väsymislujuuden ennustamiseen on olemassa myös M. Makkosen väitöskirjassa esittelemä menetelmä, joka perustuu ydintyneiden alkusäröjen jakaumaan. /7/

M. Makkosen kehittämä menetelmä on seuraavan kaltainen:

Dynaamisesti kuormitetun kappaleen pintaan ydintyy mikrosäröjä. Niille voidaan laskea odotusarvo, kun käytetään tilastollisia menetelmiä. Se tehdään laskemalla erikokoisista kappaleista löytyvä suurin särö. Tätä arvoa voidaan käyttää kun halutaan ennustaa kappaleen väsymislujuus.

Yleisimmin käytetään (Rabb mm.) heikoimman lenkin menetelmää. Siinä koesauvan ajatellaan muodostavan ”yhden lenkin”. Isommassa kappaleissa on n kpl tämän kokoista lenkkiä, jolloin voidaan käyttää alla kuvattua laskentatapaa. /4/

Kokokerroin voidaan laskea heikoimman lenkin teorian avulla. Katso kaavat alla. Ajatellaan koneenosa jaetuiksi osiksi. Jos väsymissärö ydintyy missä tahansa näissä kohdista, niin koneenosa murtuu eli voidaan siis ajatella että kysymys on sarjakytkenästä /4, 107-108/.

Jos oletetaan että jokaisen yksittäisen lenkin luotettavuus on R , ja osia on n kappaletta

$$R = \sqrt[n]{0,5} \quad (11)$$

Voidaan olettaa että yksittäinen lenkki vastaa väsytestissä käytettyä testisauvaa. Tällöin väsymisrajaa vastaava sauvan vaurioitumisriski P saadaan laskettua kaavalla

$$P = 1 - R \quad (12)$$

Tilastollinen kokokerroin tarvitaan, jotta saataisiin komponentin väsymisraja, se lasketaan normaalijakaumaa käyttäen kaavalla

$$K_{size} = \frac{1}{1 + \lambda s_r} \quad (13)$$

tai logaritmijakaumaa käyttäen kaavalla

$$K_{size} = e^{-\lambda s_{ln}} \quad (14)$$

Tässä kaavassa

K_{size} tilastollinen kokokerroin

R yksittäisen lenkin (esim. testisauvan) luotettavuus, kun kaikilla on sama arvo

P yksittäisen lenkin vaurioitumistodennäköisyys, silloin kun kaikilla on sama arvo

λ vaurioitumistodennäköisyyttä P vastaava standardoidun normaalijakauman muuttujan arvo

s_r väsymisrajan suhteellinen keskihajonta

s_{ln} väsymisrajan logaritminen keskihajonta

Väsymisen yhteydessä on todettu, että särö alkaa miltei poikkeuksetta pinnasta (mm. Rabb /4/, Makkonen /7/)

Jännitysamplitudi vaihtelee useimmiten koneenosan eri pisteissä, mikä on huomioitava laskuissa. Siinä tapauksessa kun käytetään heikoimman lenkin teoriaa tilastollisen kokokertoimen laskemiseksi todellisille koneenosille, pitää huomioida myös niissä vallitseva jännitys jakauma. Tällöin on laskettava osalle ns. tehollinen pinta-ala. Se on vaurioitumistodennäköisyyden perusteella laskettu pienennetty pinta-ala, joka vastaa maksimijännitystä.

Menetelmä lenkkien lukumäärän laskemiseksi on muodostaa suhde tutkittavan koneenosan ja väsytestissä käytettyjen sauvojen tehollisten jännityspinta-alojen välille /4, 109/.

Tehollinen jännityspinta-ala on mahdollista laskea käyttäen heikoimman lenkin teoriaa tähänkin tapaukseen. Pinnassa A_1 vaikuttaa jännitysamplitudi σ_{a1} . Jos oletetaan, että luotettavuus on 50 % eli $R_1 = 0,5$. On olemassa toinen alue, jonka pinta-ala on A_2 , ja jossa vaikuttaa pienempi jännitysamplitudi σ_{a2} .

$$\sigma_{a2} = \sigma_{a1} (1 + \lambda s_r) \quad (15)$$

Pintojen A_1 ja A_2 välinen tilastollinen kokokerroin saadaan laskettua seuraavalla kaavalla:

$$n = \frac{A_{2,eff}}{A_1} \quad \text{lenkkien lukumäärä, kun } A_{2,eff} > A_1 \quad (16)$$

$$n = \frac{A_1}{A_{2,eff}} \quad \text{lenkkien lukumäärä, kun } A_1 > A_{2,eff} \quad (17)$$

Tilastollinen kokokerroin lasketaan kaavojen avulla heikoimman lenkin teoriaa käytettäessä. Tilastollista kokokerrointa voidaan käyttää redusoimaan (vähentämään) pienemmän jännityspinta-alan omaavaa väsymisrajaa vastaamaan suuremman jännityspinta-alan omaavan väsymisrajan odotusarvoa.

Yleisesti ottaen,

tapaus jossa $A_{eff} > A_{ref}$

$$\text{lenkkien lukumäärä } n = \frac{A_{eff}}{A_{ref}} \quad (18)$$

jossa

A_{eff} = koneenoson tehollinen jännityspinta – ala

A_{ref} = referenssisauvan jännityspinta – ala

Komponentin väsymisraja on koesauvan väsymisraja kerrottuna edellä saadulla koon vaikutusluvulla tai kokokertoimella

/4, 110,113/

Yleensä on ollut tapana esittää kappaleen koon vaikutuskertoimen avulla. Se on annettu perinteisesti graafisessa muodossa, käyränä. Yleensä tarvitaan enemmän kuin yksi käyrä, koska koon vaikutus riippuu myös materiaalin väsymislajuuden hajonnan suuruudesta. Yleensä tämä hajonnan variaatiokertoimen arvo on välillä 0,03 – 0,09.

Mitoitustyössä koon vaikutuslukuna annetaan 1,0 koesauvalle, jolle on jo aiemmin määritetty materiaalin väsymisominaisuudet. Koesauvaa suuremmille kappaleille annetaan ykköstä pienempiä arvoja, ja pienemmille ykköstä suurempia. Tässä tapauksessa suurempi ja pienempi arvo määräytyvät tehollisen jännityspinta-alan mukaan, eikä jonkin muun mitan, esim. halkaisijan mukaan /5/.

2.7. Tilastollinen koon vaikutus staattiseen lujuuteen

Väsymisen primäärinen syy on siis syntyvät mikrosäröt, kuten luvussa 2.2. ja 2.3. kerrotaan. Myös oletettu murtuma lähtee liikkeelle alkuvioista. Tarkoitus on selvittää tässä työssä että riippuuko asia pinta-alasta, kuten väsymisessä, vai voiko särö lähteä pinnan alta, eli vaikuttaako murtumisen todennäköisyyteen myös kappaleen tilavuus.

Tässä työssä sovelletaan vain heikoimman lenkin teoriaa kaavan 13 perusteella.

3 TYÖN SUORITUS

Tämä osuus sisältää tutkimuksen keskeisiä havaintoja ja tuloksia.

3.1. S235-vetosauvojen kuvien piirtäminen

Piirretty kuvat Autodesk Inventor Professional 2013-ohjelmistoa käyttäen. Piirustukset ovat liitteessä 1.

3.2. S235-Sauvojen valmistus

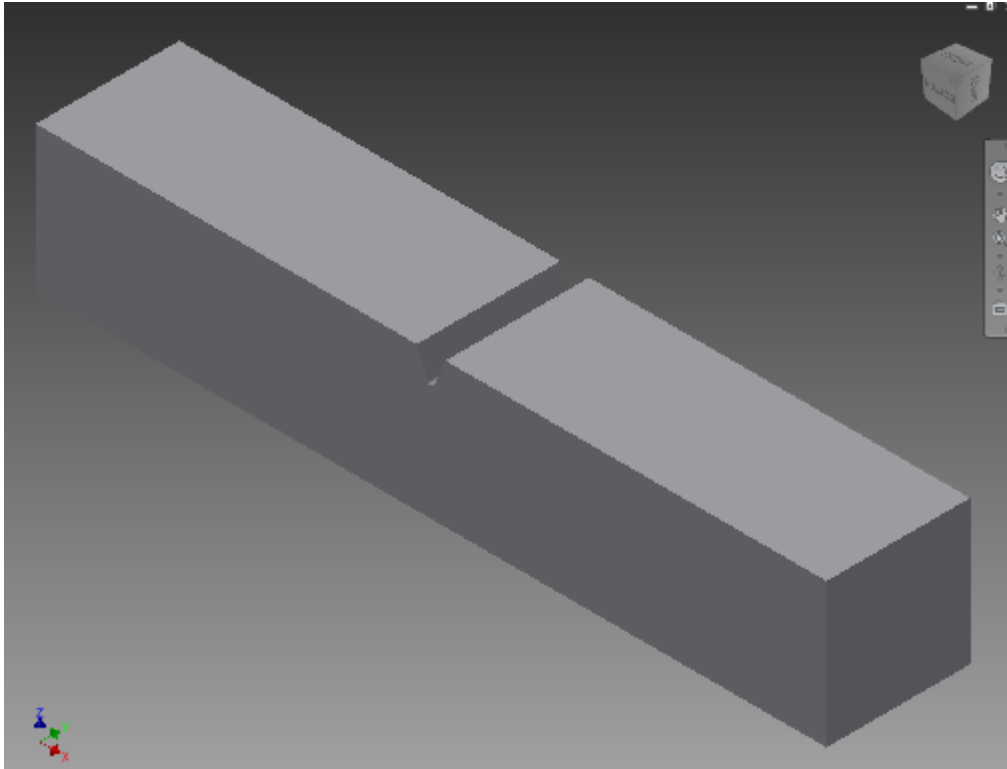
Vetosauvat valmistettiin leikkaamalla ne teräslevystä.

Rajaukset:

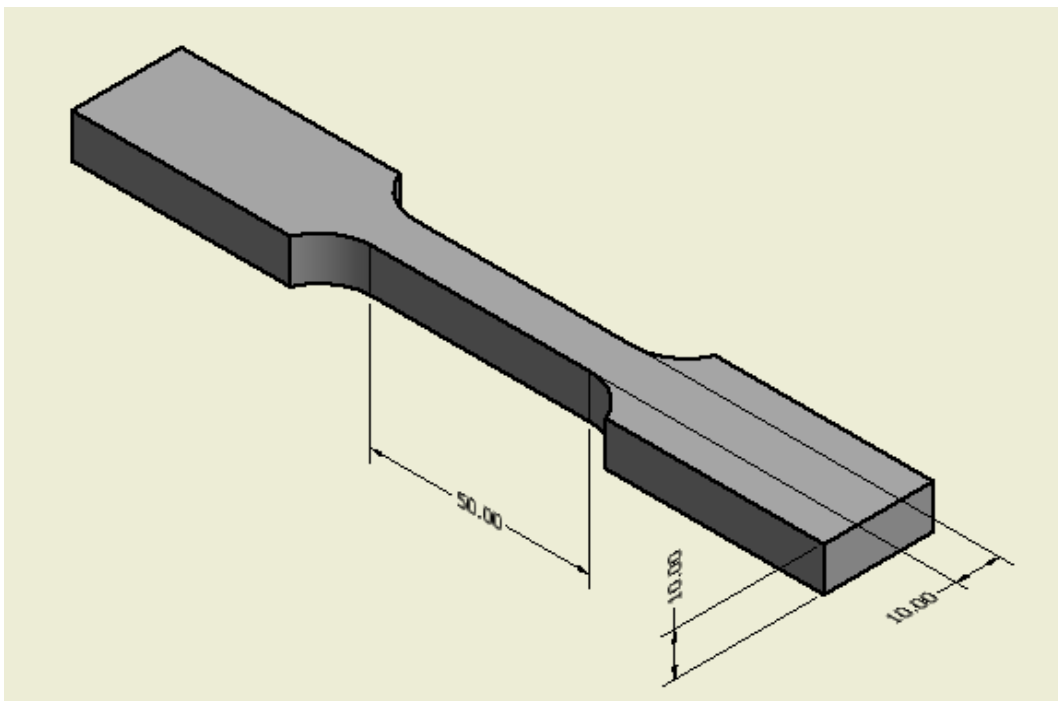
Levy on S235-terästä. Kaikki sauvat leikattava samasta P110-levystä. Sauvoja ei saa leikata 10 mm lähempää levyn reunasta. Sauvojen pituussuunnan oltava sama kuin valssaussuunta.

Tutkittavana materiaalit olivat lattasauvat, materiaali oli alunperin tarkoitus olla S-235-J0 (tai S-235-J2) terästä, mutta koska kyseistä teräslaatua ei enää valmisteta Suomessa, niin materiaalin hankkimisen kanssa oli hankaluuksia. Tästä syystä ihan täyttä varmuutta tutkittavan teräksen laatuluokasta ei ollut, S 235 terästä se kuitenkin oli, levynosat leikanneen konepajan omasta varastosta.

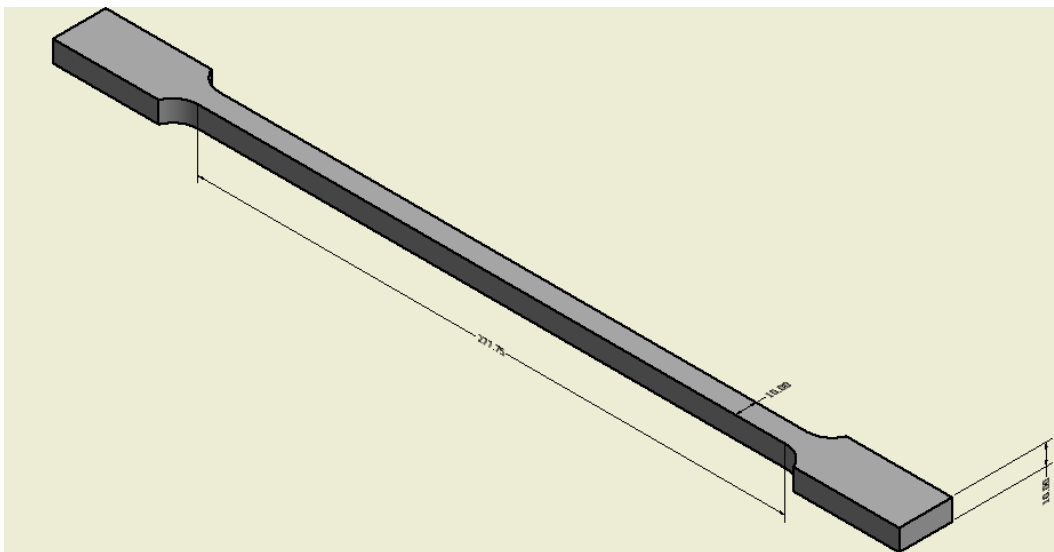
Levystä leikattiin HT Laser Oy:n konepajalla 40 kpl Lc 50- ja 40 kpl Lt 400-vetosauvoja, sekä 20 kpl Charpy-sauvoja. Charpy-sauvoihin tehtiin keskelle 2 mm syvä v-ura Technobotnialla. Koesauvat ovat kuvissa 9-11.



Kuva 9. Charpy-V-sauva.



Kuva 10. Lc 50-vetosauva.



Kuva 11. Lc 400-vetosauva.

3.3. Kokeiden suoritus S235 sauvoilla

Tavoitteena oli selvittää, esiintyykö tilastollista koon vaikutusta. Käsittelemätön materiaali oli $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassakin täysin sitkeää, joten yritettiin huonontaa sitkeysominaisuuksia lämpökäsittelyin.

Tehtiin 3 lämpökäsittelyä, joiden koesauvoista tehtiin vetokokeet. Kokeet tehtiin Technobotnialla VAMK:n venäläisellä vetokoneella.

Molemmista vetosauvoista tehtiin vetokoesarjat, erä 1, erä 2, ja erä 3. Vedettiin yhteensä 51 sauvaa.

Lämpökäsittellyt erät olivat seuraavan kaltaiset:

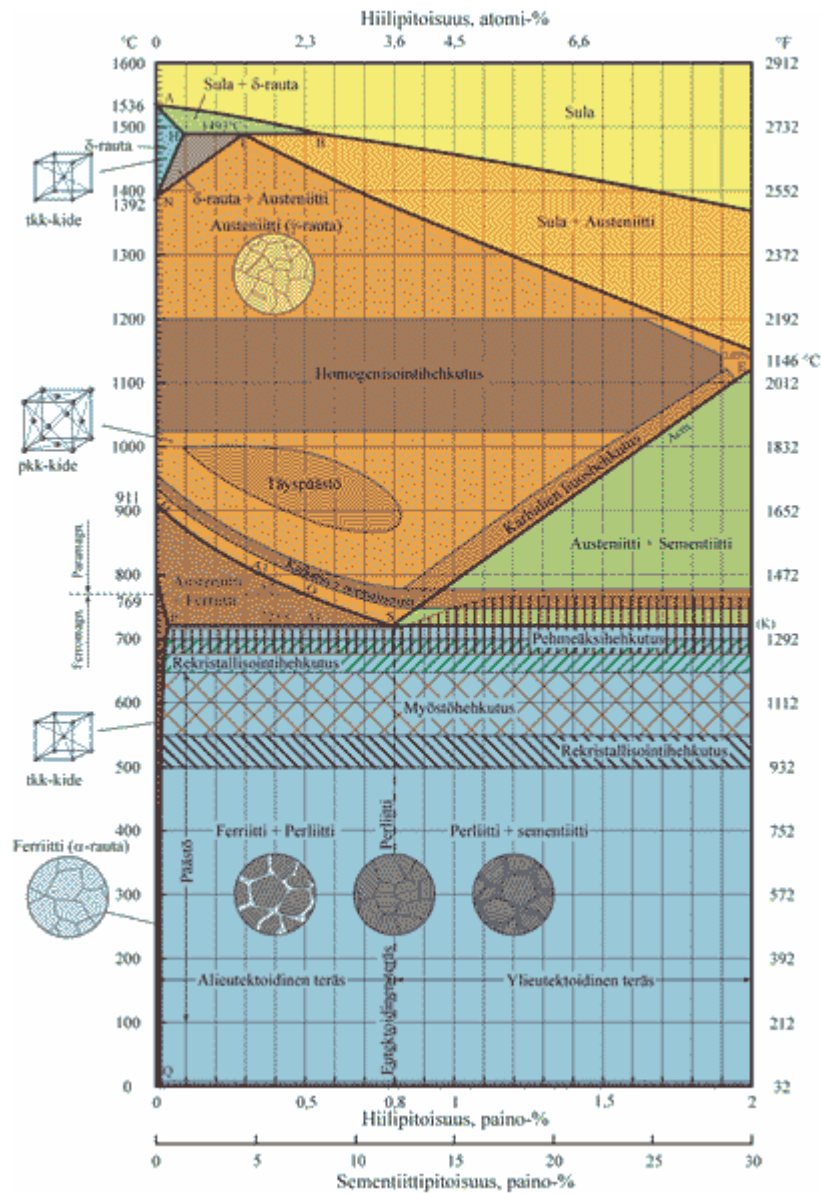
Erä 1 käsittelemätön

Erä 2 lämpökäsittely 1, lämpötila $920\text{ }^{\circ}\text{C}$, hehkutus 2h, jäähtyminen uunin mukana.

Erä 3 lämpökäsittely 2, hehkutus aluksi 1,5 h lämpötilassa $950\text{ }^{\circ}\text{C}$, 2h siinä, sitten 1,5 h $680\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötila ja 2h hehkutus siinä, lopuksi hitaasti jäähdytys uunin mukana. Tavoitteena saada rakeenkasvua sekä austeniitti- että ferriittialueella.

Jokaisesta erästä tehtiin Charpy-kokeet sekä huoneenlämpötilassa, että $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa (liite 2).

Kuvasta 12 voi havaita teräksen rakenteen eri lämpötiloissa /6/. Lämpötilat valittiin kuvan avulla, hiilipitoisuus n. 0,2 %.



Kuva 12. Rauta-hiili tasapainopiirros.

Lämpökäsittelyn jälkeen terässauvat laitettiin pakastimeen $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilaan.

Erä 1 oli käsittelemätön erä. Charpy- ja vetokokeiden jälkeen varmistuttiin siitä, että koesauvoille pitää tehdä lämpökäsittely, koska materiaali oli niin sitkeää.

Erälle 2 tehtiin siis lämpökäsittely, ja pakastus. Ennen vetokokeita tutkittiin teräs-sauvojen sitkeys Charpy-kokeella. Kuvassa 13 näkyy testissä murtunut erän 2 Charpy-sauva.



Kuva 13. Charpy-sauva kokeen jälkeen.

Charpy-kokeen jälkeen suoritettiin vetokoe. Koe-erän 2 tutkiminen alkoi isojen Lt400 -sauvojen vetämisellä. Kuvissa 14-16 esitetään Lt 400-sauvan vetokokeen eri vaiheita.



Kuva 14. Lc400-sauva kiinni vetokoneessa.



Kuva 15. Vedettävä sauva alkaa kuroutua.



Kuva 16. Sauva on katkennut.

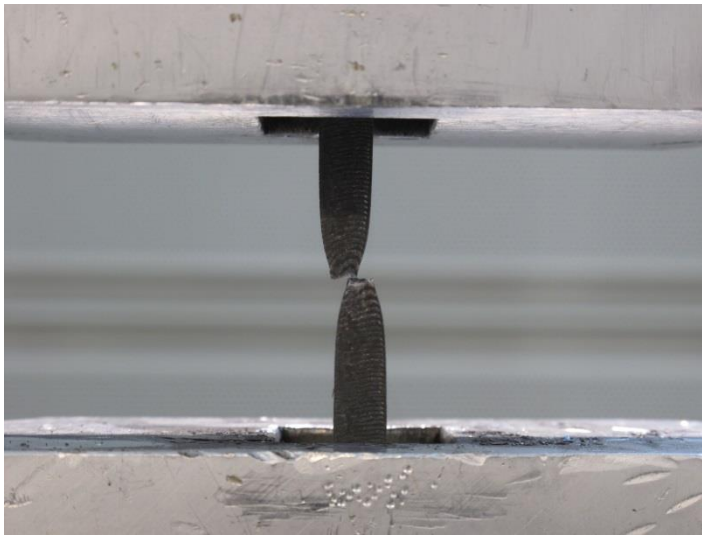
Lopuksi katkenneet sauvat järjestettiin pöydälle mittausta varten. Mittaus suoritettiin digitaalisella työntömitalla.



Kuva 17. Katkenneita Lt 400-sauvoja erästä 2.

Kokeen jälkeen kappale mitattiin, ja siitä laskettiin suhteellinen venymä ε ja murtokurouma Z (pinta-alan muutos). Kuvassa 17 näkyy mitattuja kappaleita.

Tämän jälkeen oli vuorossa pienten Lc 50-sauvojen veto. Lc 50-sauvat menivät lähes aina keskikohdalta poikki (kuva 18).



Kuva 18. Katkennut Lc 50-sauva.

Tämän jälkeen oli vuorossa erä 3. Se jouduttiin hehkuttamaan 2 kertaa, koska Charpy-kokeen perusteella sauvat olivat edelleenkin liian sitkeitä.

Tehtiin uudet Charpy-kokeet, ja näissä Charpy-tuloksissa oli iso hajonta. Osa sauvoista oli sitkeitä, ja osa hauraita. (kuva 19)



Kuva 19. Charpy-sauvoja erästä 3.

Sen jälkeen oli vuorossa vetokokeet. Erässä 3 vetosauvoihin oli laitettu uunikäsittelyn ja jäähdityksen jälkeen niiden päälle kerros putkieristettä, ja sen jälkeen pakastettu ne, tavoitteena oli että sauvan lämpötila pysyisi vedonkin aikana pakkasen puolella. Pienemmillä Lc 50-sauvoilla tämä ei onnistunut, sauvat lämpenivät eristeestä huolimatta. Isommat Lt400-sauvat sen sijaan pysyivät kiinnityspäitä lukuun ottamatta jäisinä.

Kuvat 20-22 esittävät erän 3 vetokoetta ja kuvat 23-24 katkenneita sauvoja.



Kuva 20. Putkieristettä Lt400-sauvassa.



Kuva 21. Jäinen sauvan pinta vedon jälkeen.



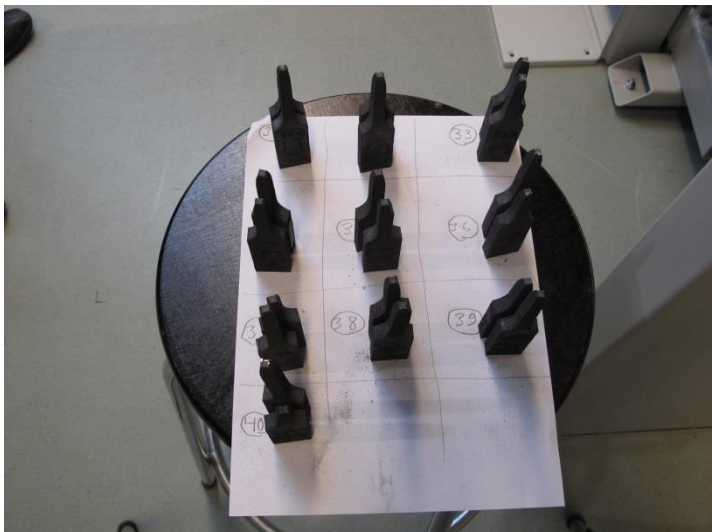
Kuva 22. Lc 50-sauva putkieristeessä.

Seuraavassa kuvissa näkyy tarkemmin miten erän 3 koesauvat ovat murtuneet.

Useat sauvat erästä 3 murtuivat läheltä kiinnityspäätä. Erästä 2 sauvan keskikohdan ja kiinnityspään puolivälistä, ja taasen erässä 1 ne menivät poikki läheltä sauvan puoliväliä. Yksikään sauva eivät katkennut kohonneen jännityksen kohdalta, vaan jonkin verran sen alapuolelta, sauvan keskikohdan ja kiinnityspään väliltä. Erässä 3 murtumiskohta oli lähellä suurinta jännitystä sauvan kiinnityspäässä. Tulokseen saattoi tosin vaikuttaa myös koe-erän 3 muista eristä poikkeavat olosuhteet (esim. lämpötila). Kaikki murtumat läheltä kiinnityspäätä (Kuva 23).



Kuva 23. Lt 400-sauvoja erästä 3 (merkitty kuvassa eräksi 4).



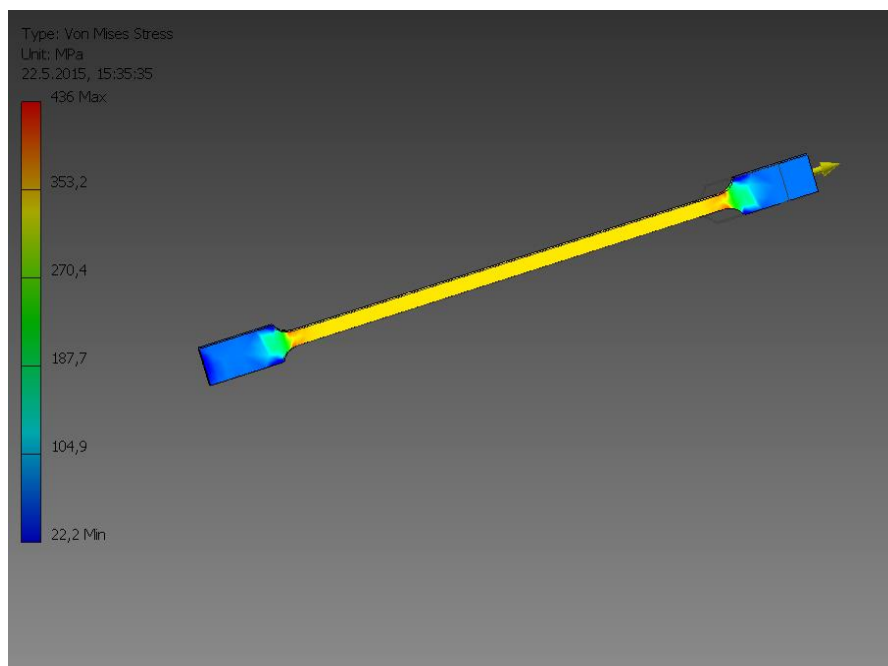
Kuva 24. Katkenneita Lc50-sauvoja erästä 3.

Eli nämä murtumiskohdat ovat korkeamman jännityksen alueelta. Ilmeisesti sauva ehti lämmentä läheltä kiinnityspäätä, sitkeys parani ja lujuus aleni. Erän 3 vetoko-
keessa ei saatu selville sitä mitä haettiin. Koe-erä 3 siis epäonnistui, koska lyhyet
sauvat lämpenivät vedettäessä ja sitkistyivät. Pitkät sauvat lämpenivät läheltä pää-
tä ja murtuivat sitkeällä alueella. Erän 3 tuloksiin ja koon vaikutukseen ei voida
näin ollen luottaa .

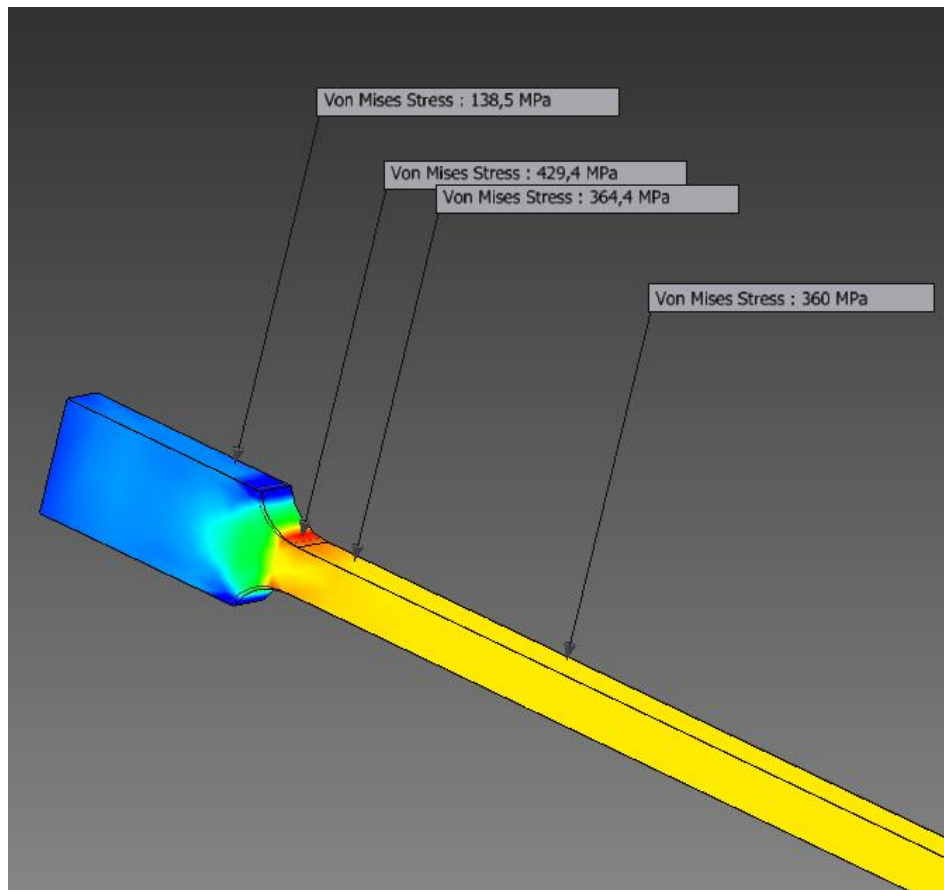
3.4. Analyysit

Tehtiin sauvoille myös FEM-analyysi, käyttäen Inventorin FEMiä.

FEM analyysi Lt 400-sauva



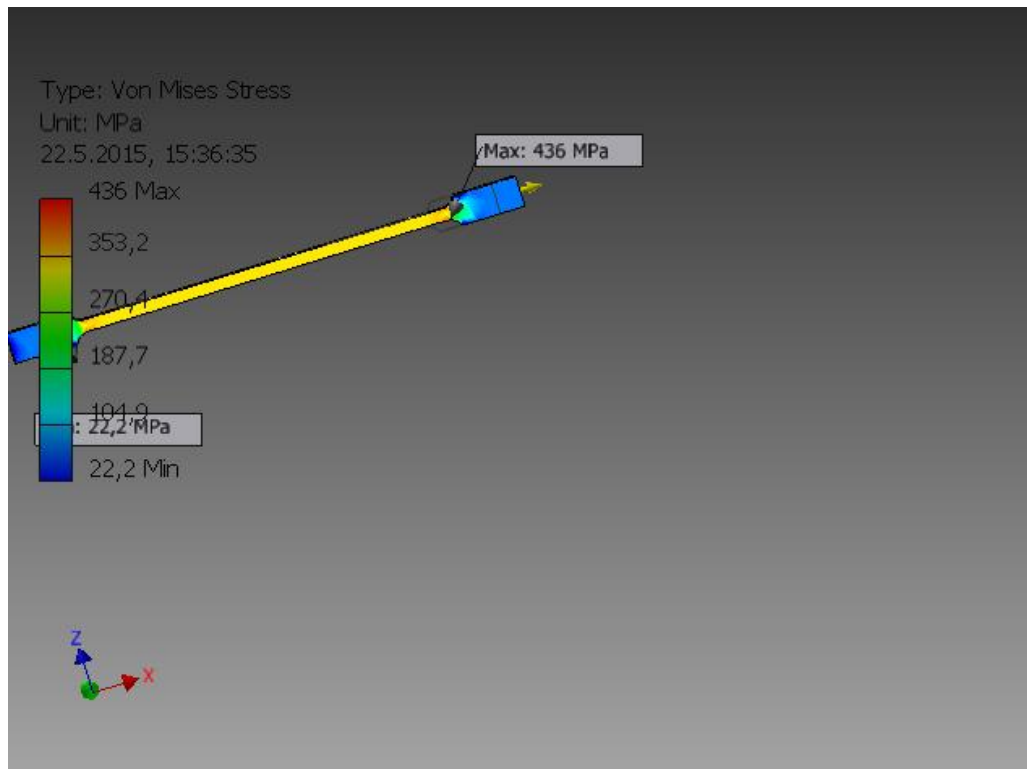
Kuva 25. FEM analyysin tulos Lt 400-sauvalle.



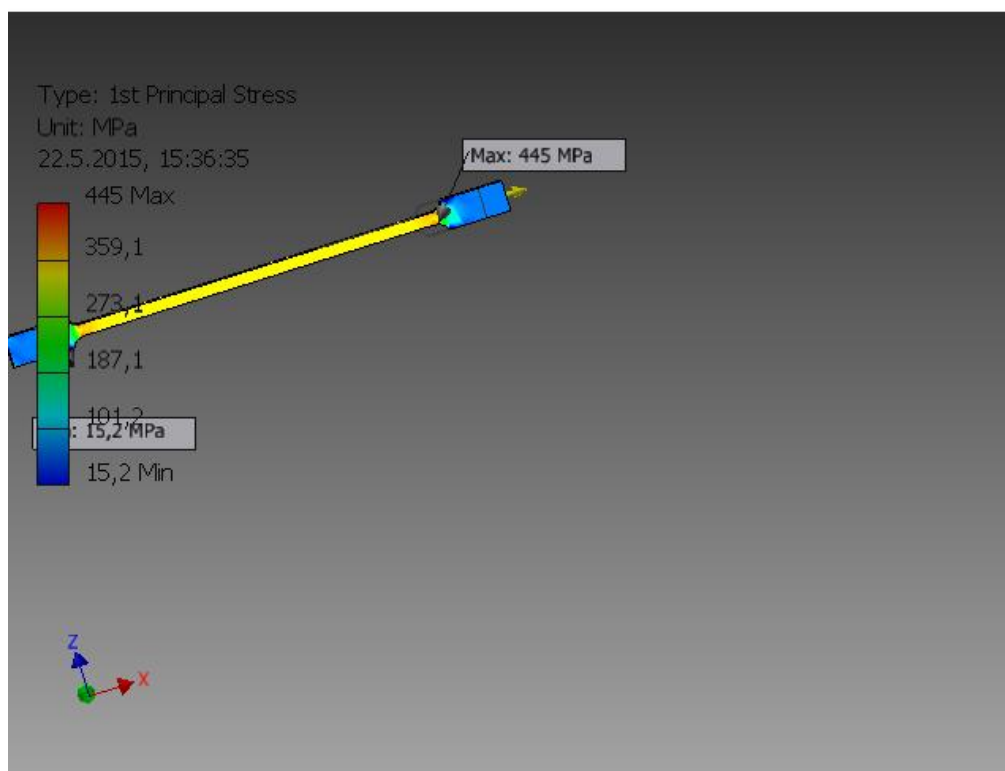
Kuva 26. Suurennettu kuva Lt 400-sauvan kiinnityspäästä.

Suurennetusta kuvasta huomaa, että jännitys oli suurimmillaan kiinnityspään pyöristyssäteen kohdalla. Max Von Mises jännitys oli siinä 436 MPa, ja 1. pääjännitys 445 MPa.. Keskellä sauvaa jännitys oli noin 360 MPa.

Murtuminen ei tapahtunut täsmälleen kohonneen jännityksen alueelta.



Kuva 27. Von Mises Stress Lt 400-sauvalle.

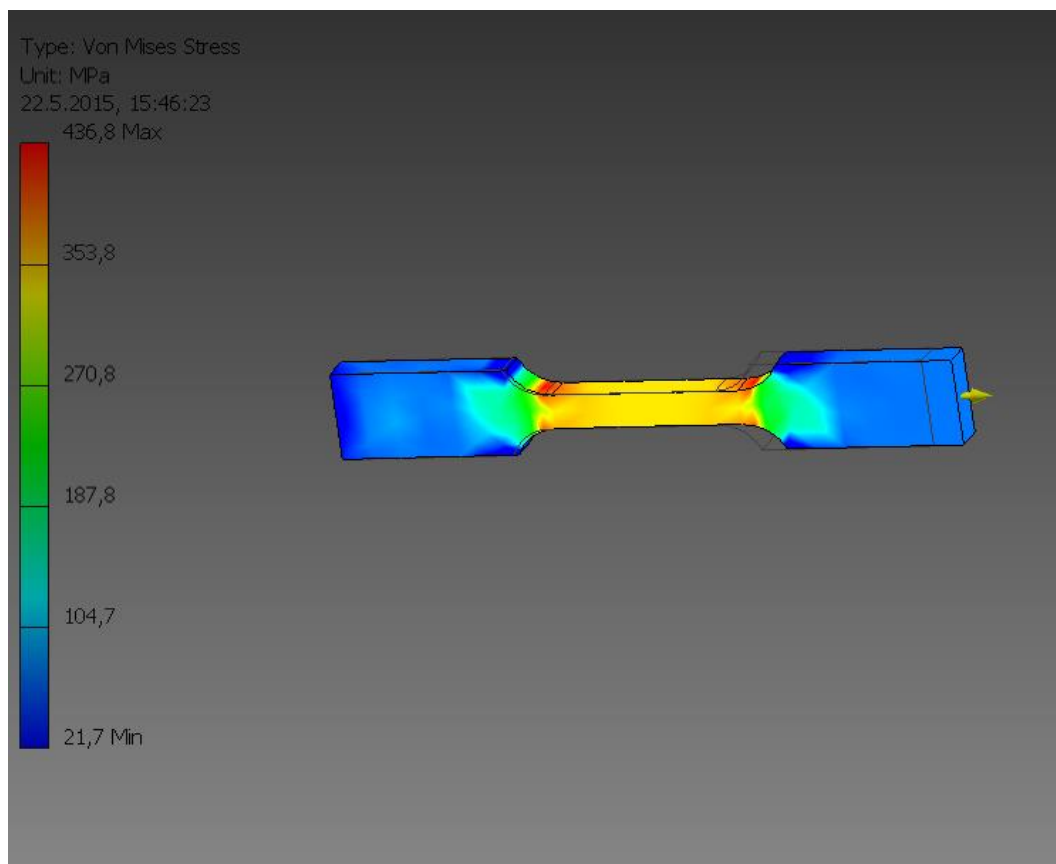


Kuva 28. 1. pääjännitys Lt 400-sauvalla.

Kuvat 26-28 esittävät FEM-analyysin tulosta. Jos tarkastelee jännitystä Lt 400 sauvassa, niin se on FEM:in mukaan suurin R12 suuruisen pyöristyksen kohdalta. Kappaleet kuitenkin menivät poikki vähän alemmaa, mutta varsinkin erissä 2 ja 3 murtumiskohta oli Lt 400-sauvoilla kuitenkin lähempänä R12 pyöristyssädettä kuin kappaleen keskikohtaa, jossa oli tällä sauvalla siis niin FEM:in kuin vetoko-keidenkin perusteella pienin jännitys.

FEMin tulostaulukot ovat liitteessä 3.

FEM analyysi Lc 50-sauva

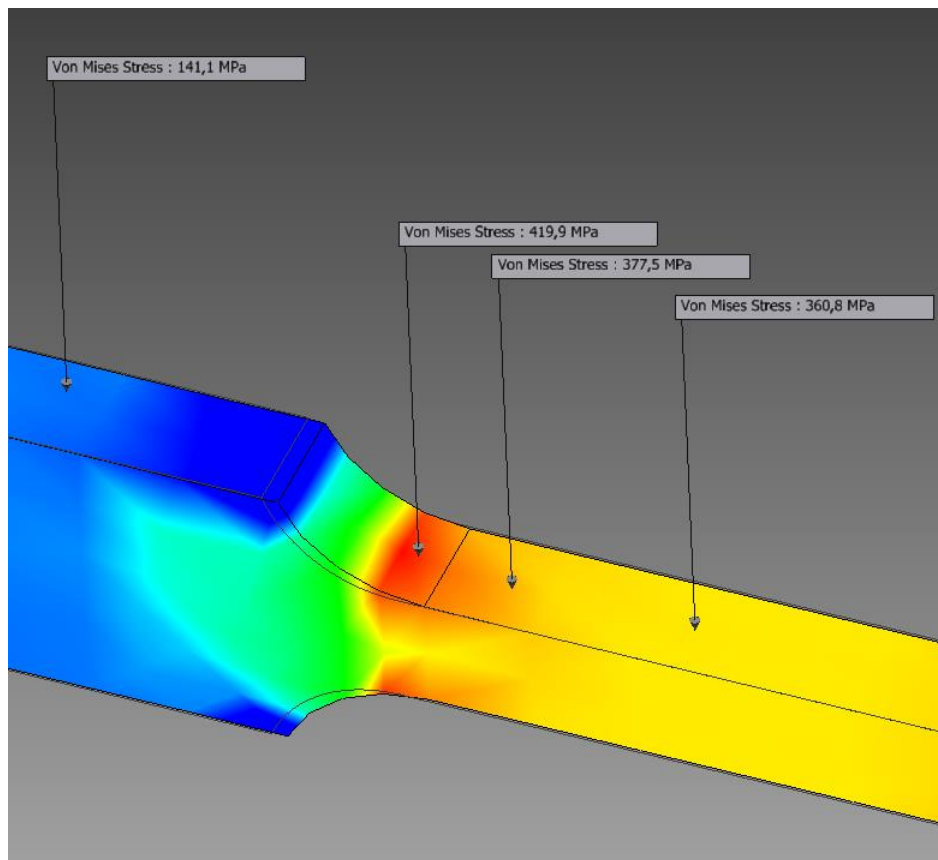


Kuva 29. FEM analyysin tulos Lc 50-sauvalle.

Lc 50-sauvoille suoritettiin myös Inventorin FEM-analyysi, jonka mukaan suurin jännitys on vetopään pyöristyksen kohdalla, ja pienin keskellä (kuva 29).

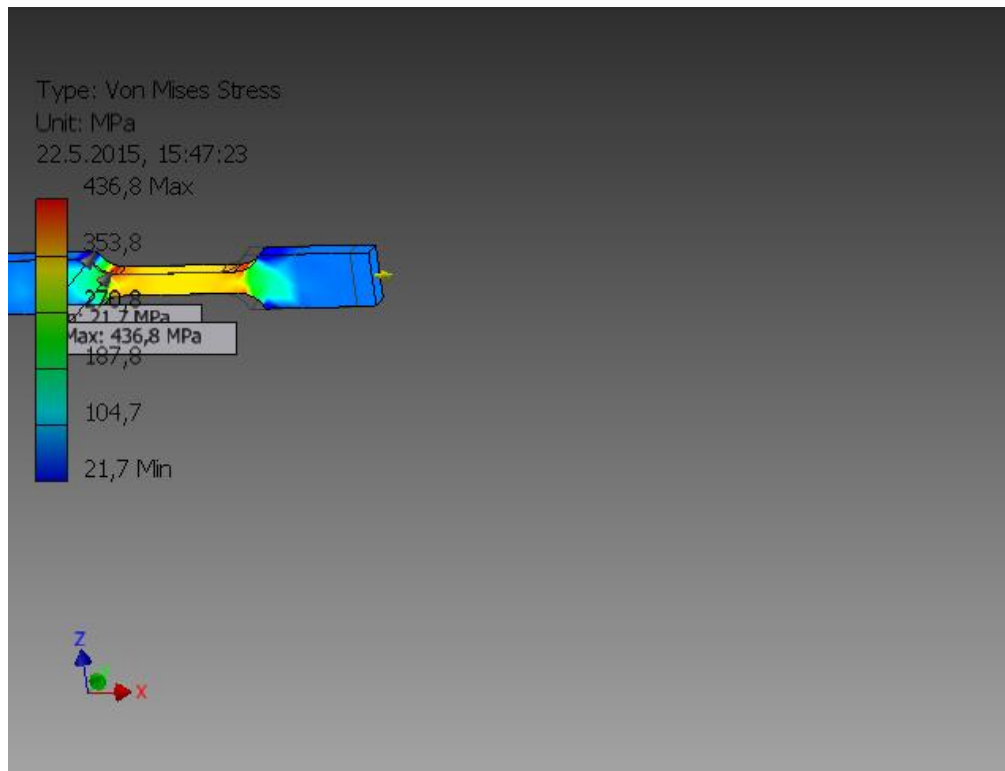
Von Mises Jännitys oli suurimmillaan kiinnityspään pyöristyssäteen kohdalla, 437 MPa. 1. pääjännitys oli siinä kohdassa 446 MPa. Jännitys pieneni kohti sauvan keskikohtaa, jossa se on noin 360 MPa. Jännitysten suuruus ja jakautuminen Lt 400 ja Lc 50 sauvilla muistuttivat toisiaan.

Lähes kaikki Lc 50 sauvat menivät poikki läheltä keskikohtaa, ja yksikään ei katkennut FEM-analyysin ilmaiseman kohonneen jännityksen kohdalta. Tosin erässä 4 koesauva numero 40 meni poikki läheltä kiinnityspäätä (kuva 24), eli se oli jo aika lähellä kohonneen jännityksen kohtaa, jonka FEM näyttää.

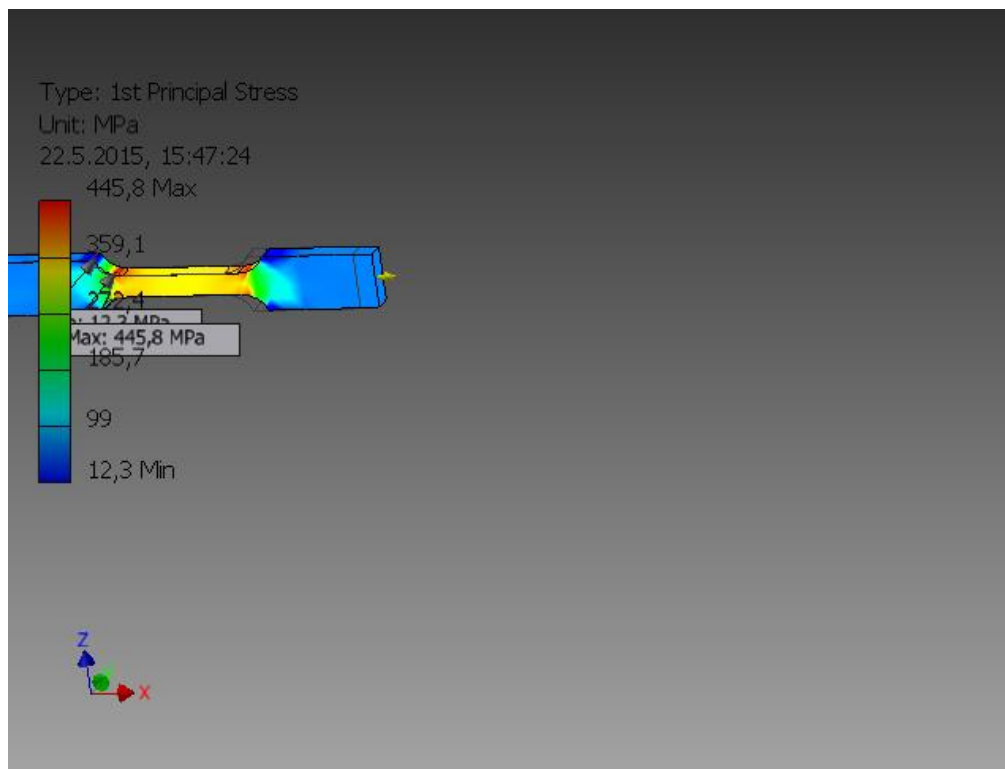


Kuva 30. Suurennettu kuva Lc 50 sauvan kiinnityspäästä.

Tarkemmat FEM-analyysin tulokset Lc 50-sauvalle ovat kuvissa 30-32, sekä liitteestä 3 löytyvästä taulukosta.



Kuva 31. Von Mises Stress Lc 50-sauvalle.



Kuva 32. 1. pääjännitys Lc 50-sauvalle.

3.5. Tuloksia

Kokeet tehtiin kolmesta eri koe-erästä, joita oli lämpökäsitelty eri tavoin, tällä tavalla saatiin aikaan eri tutkimustuloksia. Uunin lämpötila oli koe-erästä riippuen välillä 920 – 950 °C, ja pitoaika noin 3 h, jonka jälkeen se saivat jäähtyä uunissa hitaasti. Tämän jälkeen sauvat pakastettiin.

Vetokokeessa ja Charpy-kokeessa saatiin seuraavat vetomurtolujuus- ja Charpy-energia tulokset ja laskettiin mittaustulosten perusteella joka sarjalle heikoimman lenkin teorian avulla koonvaikutuskertoimet, jotka löytyvät liitteestä 4.

Eri koe-erien vetokokeissa keskimääräiset murtolujuudet Lt 400 sauvalle olivat erissä 1, 2, ja 3 seuraavat: 306, 319 ja 321 N/mm².

Lc 50 sauvalle murtolujuudet olivat vastaavasti 308, 328 ja 311 N/mm².

ERÄ 1

Charpy-koe

Iskusitkeys-kokeen keskiarvot:

287,4 J (-60 °C koelämpötila)

293,3 J (+20 °C koelämpötila)

vetokoe**Lc 50-sauvat** $R_m = 308 \text{ N/mm}^2$ (keskiarvo)

murtolujuus

koenro	F (kN)	So (mm ²)	σ (N/mm ²)
1 L (koe 1)	28,81	91,968	313,262
2 L (koe 2)	28,03	92,255	303,832
3 L (koe 3)	27,69	91,584	302,345
4 L (koe 7)	29	91,776	315,988
5 L (koe 8)	28,71	91,965	312,186
6 L (koe 9)	28,22	93,701	301,171
keskiarvo	28,41	92,208	308,131
keskihajonta	0,509	0,765	6,402

Taulukko 1. Erä 1/ Lc 50 ϵ ja Z keskiarvot :murtovenymä $\epsilon = 45,4 \%$

murtokurouma Z = 76,8 %

Lt 400-sauvat $R_m = 306 \text{ N/mm}^2$ (keskiarvo)**Lt400**

murtolujuus

koenro	F (kN)	So (mm ²)	σ (N/mm ²)
1P (koe 4)	28,13	92,929	302,705
2P (koe 5)	29,39	94,961	309,496
3P (koe 6)	28,17	92,255	305,350
4P(koe10)	29,74	95,305	312,052
5P(koe11)	27,88	92,256	302,203
6P(koe12)	28,86	94,169	306,471
keskiarvo	28,695	93,646	306,380
keskihajonta	0,756	1,352	3,845

Taulukko 2. Erä 1/ Lt400

ϵ ja Z keskiarvot :
murtovenymä $\epsilon = 28,9 \%$

murtokurouma Z = 92,8 %

ERÄ 2

Charpy-koe

Iskusitkeyskokeen keskiarvo:

272,7 J (-60 °C koelämpötila)

vetokoe

Lc 50-sauvat $R_m = 328 \text{ N/mm}^2$ (keskiarvo)

Lc 50

murtolujuus

	koenro	F (kN)	So (mm ²)	σ (N/mm ²)
huom:	22	30,91	95,745	322,837
numerointi	23	32,18	95,844	335,754
alkaa 22 ->	24	31,35	95,452	328,437
	25	31,59	96,235	328,258
	26	31,64	96,038	329,452
	27	31,25	96,137	325,056
	28	31,54	98,703	319,544
	29	31,25	97,219	321,440
	30	31,2	92,058	338,918
keskiarvo		31,434	95,937	327,744
keskihajonta		0,360	1,759	6,432

Taulukko 3. Erä 2/ Lc 50

ϵ ja Z keskiarvot :

murtovenymä $\epsilon = 45,0 \%$

murtokurouma Z = 75,9 %

Lt400-sauvat $R_m = 319 \text{ N/mm}^2$ (keskiarvo)

Lt400				
murtolujuus				
	koenro	F (kN)	So (mm ²)	σ (N/mm ²)
huom:	13	31,7	97,305	325,780
numerointi	14	31,0	97,210	318,899
alkaa 13 ->	15	30,5	97,016	314,381
	16	31,3	97,708	320,344
	17	31,2	98,305	317,379
	18	31,2	97,804	319,005
	19	30,6	98,404	310,963
	20	31,1	96,726	321,527
	21	32,3	99,995	323,016
keskiarvo		31,211	97,830	319,033
keskihajonta		0,544	0,987	4,456

Taulukko 4. Erä 2/ Lt400

ϵ ja Z keskiarvot :

murtovenymä $\epsilon = 28,3 \%$

murtokurouma Z = 75,9 %

ERÄ 3/4**Charpy-koe**

Iskusitkeyskokeen keskiarvo:

152,0 J (-60 °C koelämpötila)

Iskuenergiat välillä 11,8 ... 220,0 J

Lämpökäsittelyn jälkeen osa Charpy-sauvoista oli hauraita, ja osa edelleen sitkeitä, siis vetokokeessa oli odotettavissa vaikeuksia.

vetokoe

Lc 50-sauvat $R_m = 311 \text{ N/mm}^2$ (keskiarvo)

Lc 50				
murtolujuus				
koenro	F (kN)	So (mm ²)	σ (N/mm ²)	
31	26,42	84,541	312,512	
32	26,71	84,726	315,250	
33	26,07	88,250	295,409	
34	26,07	84,079	310,066	
35	26,81	85,096	315,054	
36	25,83	86,292	299,332	
37	27,44	87,044	315,243	
38	26,66	84,620	315,054	
39	27,05	84,089	321,685	
40	26,46	84,905	311,642	
keskiarvo	26,552	85,364	311,125	
keskihajonta	0,489	1,383	7,928	

Taulukko 5. Erä 3/ Lc 50

ϵ ja Z keskiarvot :

murtovenymä $\epsilon = 40,7\%$

murtokurouma Z = 77,7 %

Lt400-sauvat $R_m = 321 \text{ N/mm}^2$

Lt 400

murtolujuus

koeno	F (kN)	So (mm ²)	σ (N/mm ²)
41	26,81	82,338	325,611
42	27,54	87,308	315,435
43	26,95	85,101	316,684
44	27,29	85,370	319,669
45	28,42	88,803	320,033
56	27,49	85,176	322,743
47	28,81	88,065	327,145
48	26,61	84,721	314,090
49	27,34	85,004	321,634
50	28,22	87,768	321,529
51	28,47	87,512	325,328
keskiarvo	27,632	86,106	320,900
keskihajonta	0,740	1,925	4,259

Taulukko 6. Erä 3/ Lt400

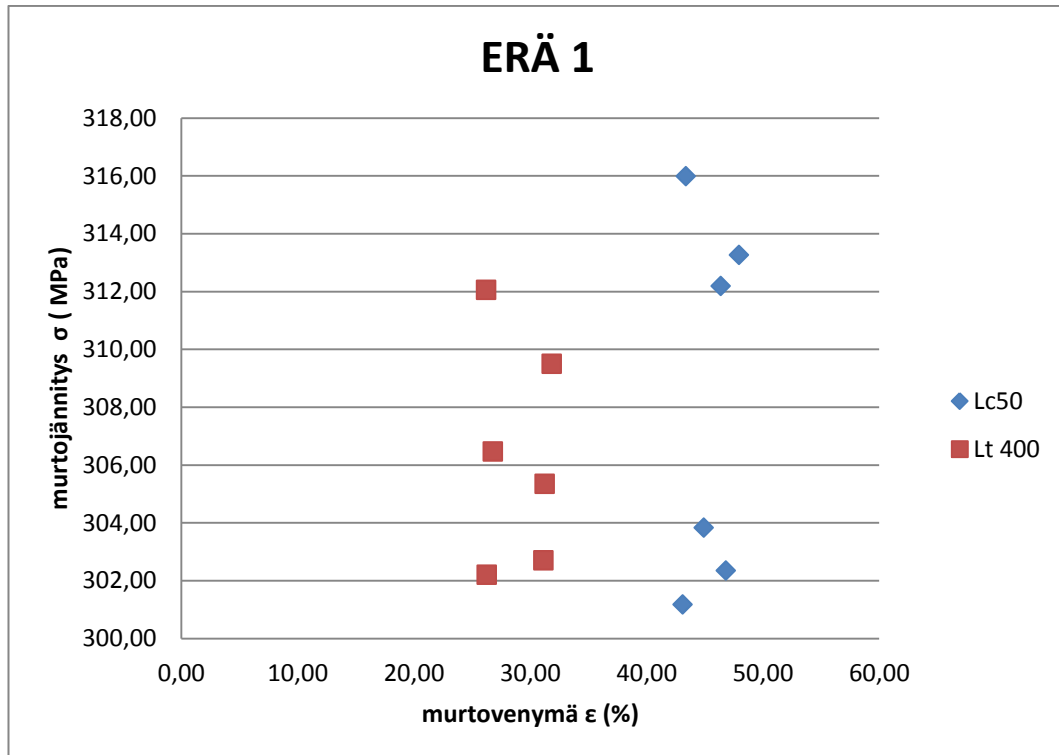
ϵ ja Z keskiarvot :

murtovenymä $\epsilon = 19,7\%$

murtokurouma Z = 75,9 %

3.6. S235-sauvojen tulosten analysointia

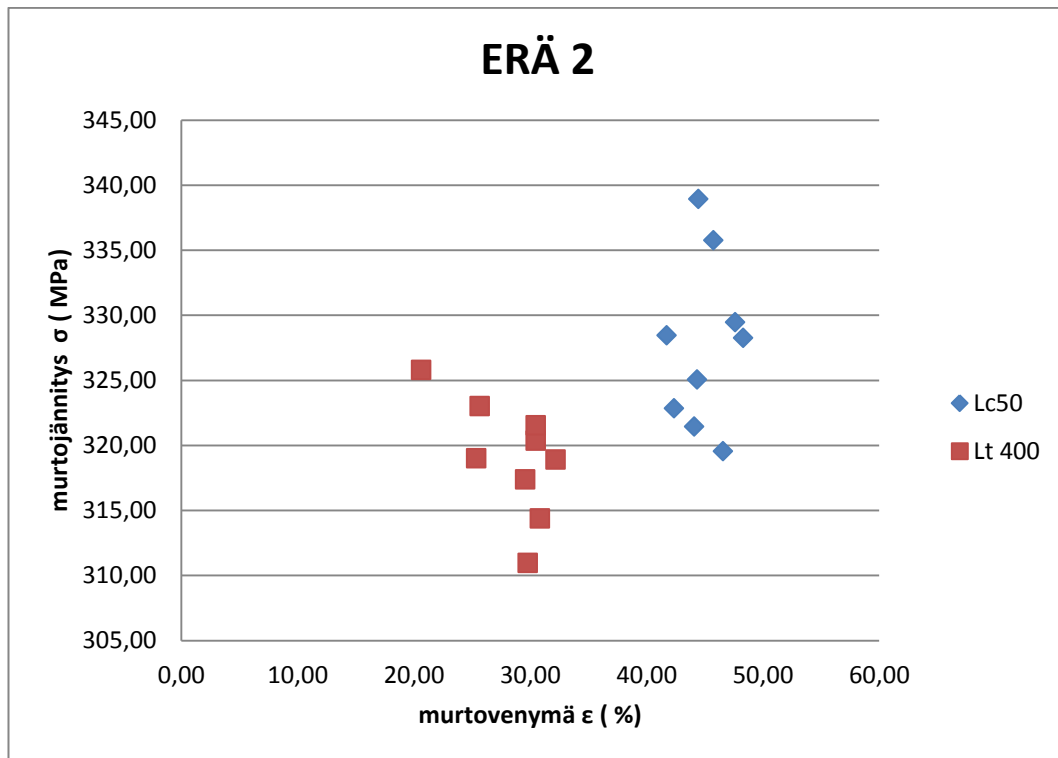
Testitulosten perusteella voitiin huomata, että koe-erissä 1 ja 2 pienempien Lc 50 vetokoesauvojen vetomurtolujuus oli suurempi kuin isompien Lt 400-sauvojen. Tässä tapauksessa teoria koonvaikutuksesta lujuuteen piti hyvin paikkansa, eli kappaleen koon suurentuessa lujuus aleni (kuvat 33 ja 34)



Kuva 33. Jännitys-venymäkuvio erä 1.

Lc 50		Lt 400	
σ (MPa)	ϵ (%)	σ (MPa)	ϵ (%)
313,26	47,96	302,71	31,13
303,83	44,93	309,50	31,84
302,35	46,81	305,35	31,24
315,99	43,38	312,05	26,22
312,19	46,39	302,20	26,26
301,17	43,10	306,47	26,79

Taulukko 7. Erä 1 tulokset.



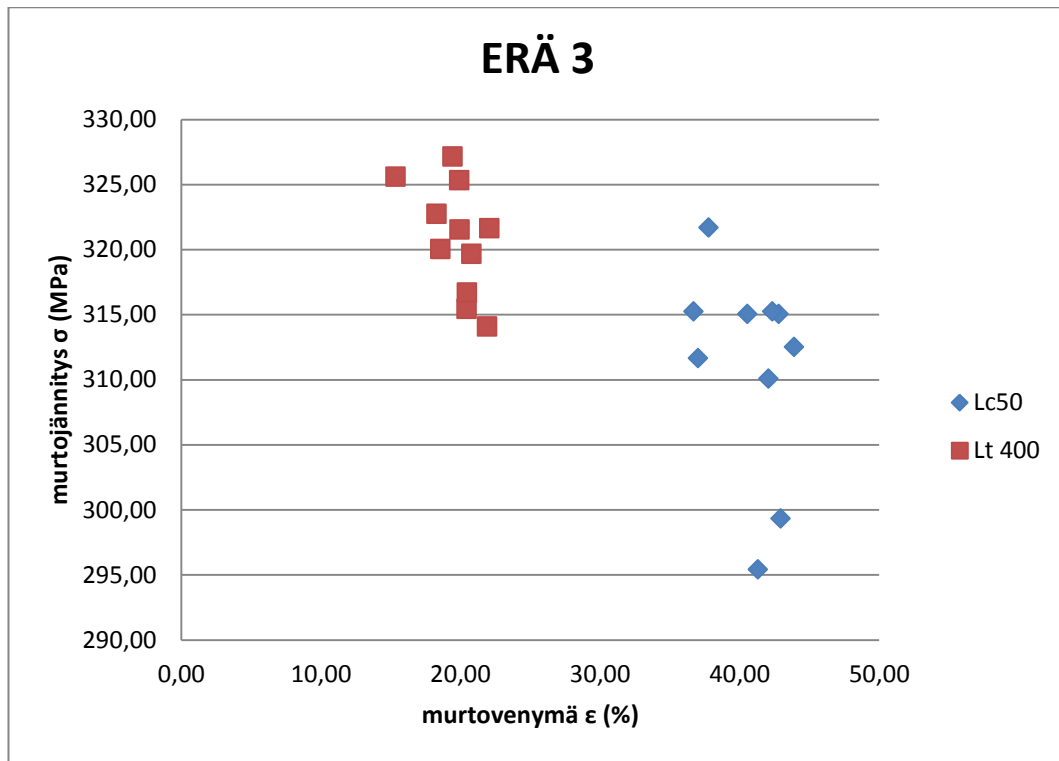
Kuva 34. Jännitys-venymäkuvio erä 2.

LC 50		Lt 400	
σ (MPa)	ε (%)	σ (MPa)	ε (%)
322,84	42,35	325,78	20,62
335,75	45,74	318,90	32,17
328,44	41,72	314,38	30,82
328,26	48,32	320,34	30,48
329,45	47,60	317,38	29,56
325,06	44,35	319,01	25,36
319,54	46,58	310,96	29,79
321,44	44,08	321,53	30,48
338,92	44,44	323,02	25,64

Taulukko 8. Erä 2 tulokset.

Erässä 3 Lt 400-sauvojen vetomurtolujuus oli suurempi kuin Lc 50-sauvojen. (kuva 35) Tässä sarjassa Lc 50-sauvoja oli 10 kpl, ja Lt 400 sauvoja 11 kpl. Erän 3 Charpy-kokeen arvot vaihtelivat yllättävän paljon. Osa sauvoista oli hauraita, ja osa sitkeitä. Osaltaan tulokseen, että suurempien vetosauvojen veto-

murtolujuus oli suurempi kuin pienien, vaikutti varmaankin myös se, että tässä koe-erässä vetosauvat oli eristetty putkieristeellä.



Kuva 35. Jännitys-venymäkuvio erä 3.

lc50		lt400	
σ (MPa)	%	σ (MPa)	ϵ (%)
312,51	43,91	325,61	15,34
315,25	36,71	315,44	20,43
295,41	41,30	316,68	20,46
310,07	42,07	319,67	20,79
315,05	42,81	320,03	18,56
299,33	42,94	322,74	18,29
315,24	42,35	327,14	19,44
315,05	40,56	314,09	21,91
321,68	37,78	321,63	22,08
311,64	37,02	321,53	19,93
		325,33	19,91

Taululukko 9. Erä 3 tulokset.

Vetokokeissa ei ollut yhtään oikein haurasta murtumaa. Sitkeässä materiaalissa plastisen venymän aiheuttama lämmöntuotto nosti koesauvan lämmön, että tultiin sitkeälle alueelle. Tämä näkyi erityisesti lyhyissä sauvoissa, koska niissä oli vähemmän materiaalia, ja tästä syystä ne lämpenivät enemmän vedon aikana.

Koonvaikutuskertoimet materiaalille S 235

Taulukkoarvot A ja V tarkoittavat liitteessä 4 olevia Ksize-kertoimen taulukoita pinta-alan ja tilavuuden mukaan tarkasteltuna.

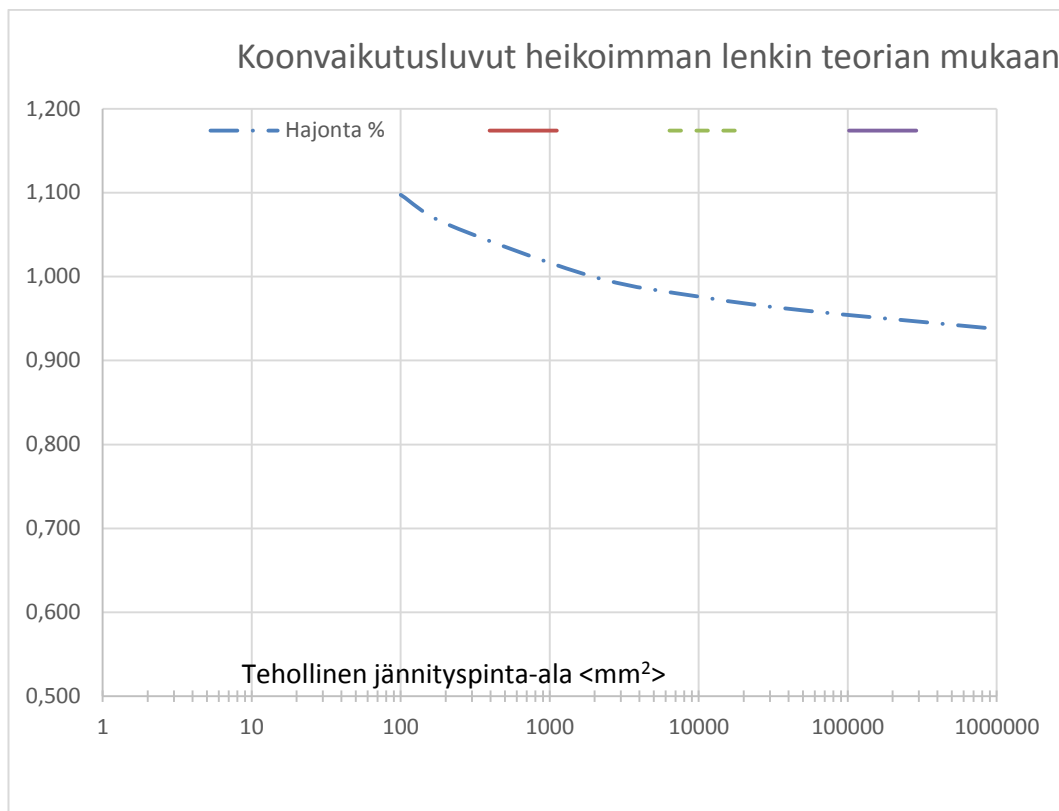
Ksize-tilukoissa (liite 4) laskettu Excelillä työn teoria osuudessa kaavassa 13 esitetty koonvaikutuskerroin K-size.

ERÄ 1

Verrattaessa koonvaikutus lukuja sarjassa 1, voidaan havaita että taulukon oikeassa reunassa oleva suhdeluku 0,994 ei oikein täsmää, kun sitä vertaa pienemmän Lc 50 sauvan arvoihin.

	Lc50	Lt 400	suhde Lc50/Lt400	suhde Lt400/Lc 50
Rm (MPa)	308,131	306,38		
Ksize taulukko A:n mukaan	0,976	0,994	1,005	0,994
Ksize taulukko V:n mukaan	0,96	0,983		

Taulukko 10. Erän 1 Ksize kerroin. Erä 1/ Lc 50

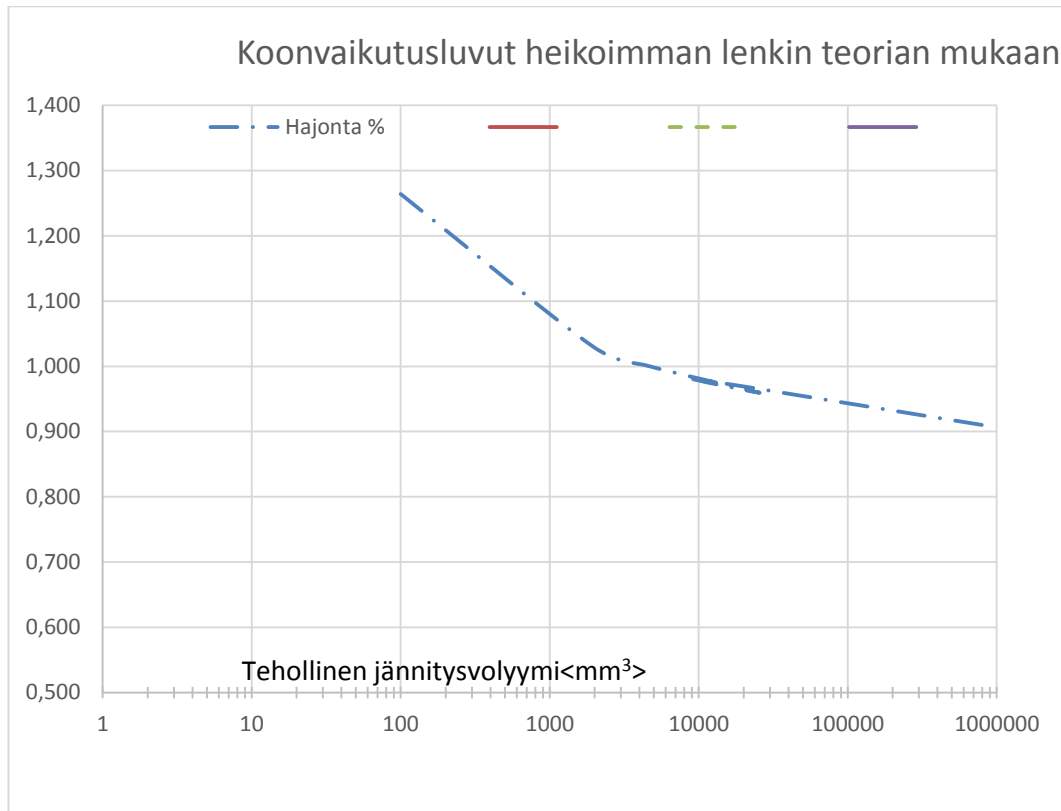


Kuva 36. Lc 50 pinta-alan mukaan

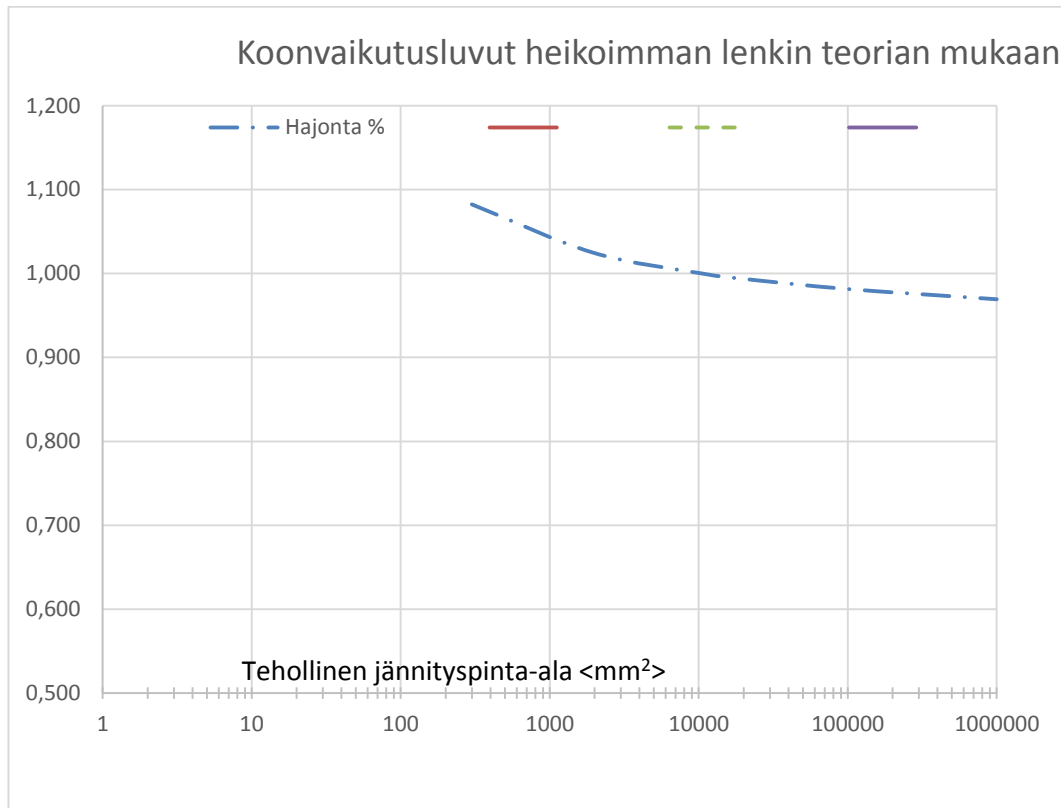
keskim. jännitys

308 N/mm²

Erä 1/ Lc 50

**Kuva 37.** Lc 50 tilavuuden mukaan

Erä 1/ Lt 400

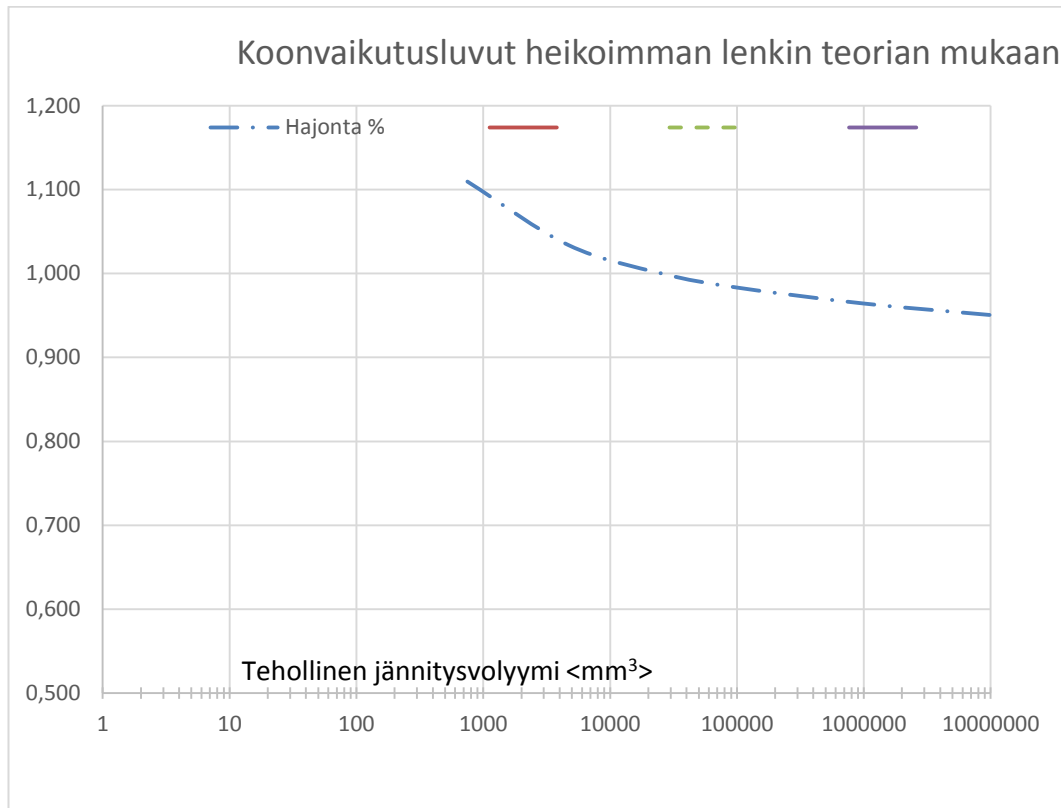


Kuva 38. Lt400 pinta-alan mukaan

keskim. jännitys

306 N/mm²

Erä 1/ Lt 400

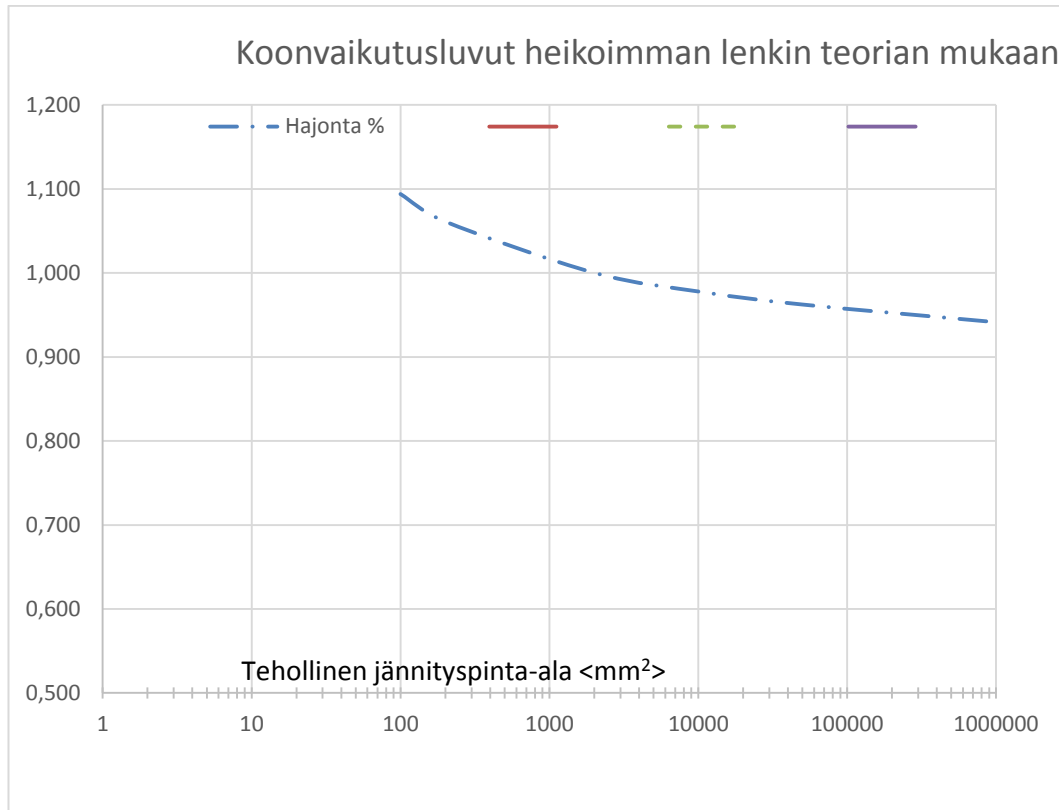
**Kuva. 39.** Lt400 tilavuuden mukaan

ERÄ 2

Verrattaessa koonvaikutus lukuja sarjassa 2, voidaan havaita että taulukon oikeassa reunassa oleva suhdeluku 0,973 on lähempänä kappaleen tilavuuden V:n antamaa ennustetta, kun sitä vertaa pienemmän Lc 50 sauvan arvoon 0,975.

	Lc50	Lt 400	suhde Lc50/Lt400	suhde Lt400/Lc 50
Rm (MPa)	327,744	319,033		
Ksize taulukko A:n mukaan	0,977	0,993	1,027	0,973
Ksize taulukko V:n mukaan	0,975	0,984		

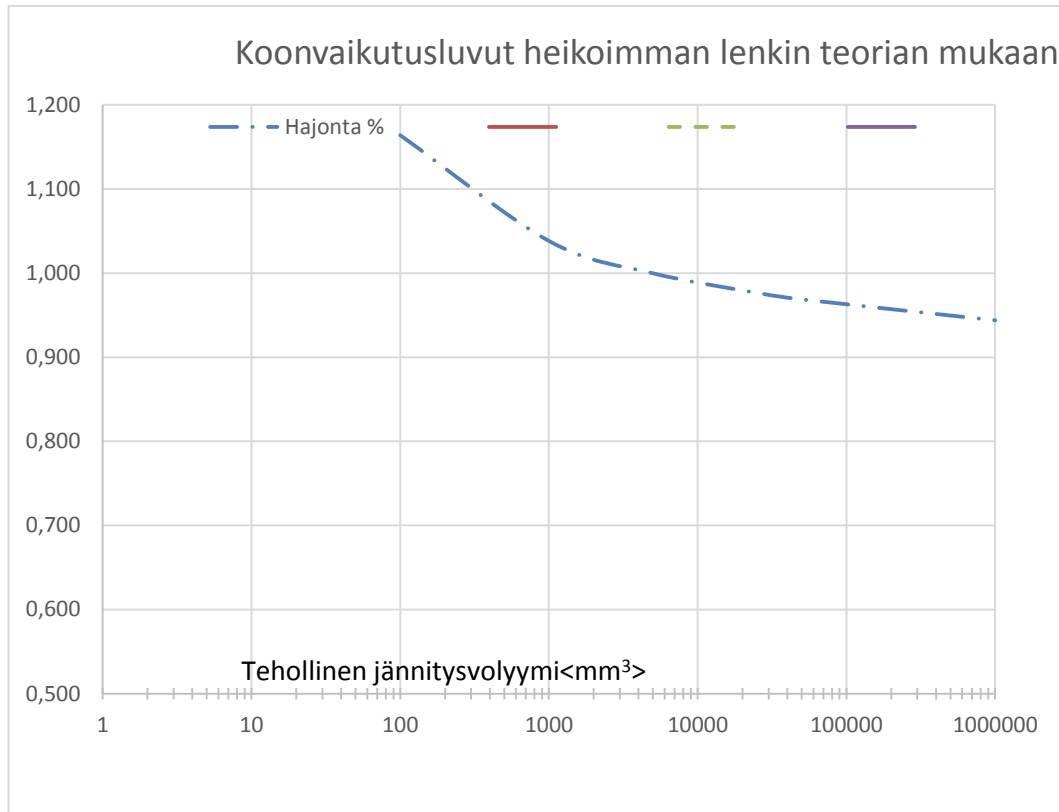
Taulukko 11. Erän 2 Ksize kerroin. Erä 2/Lc 50



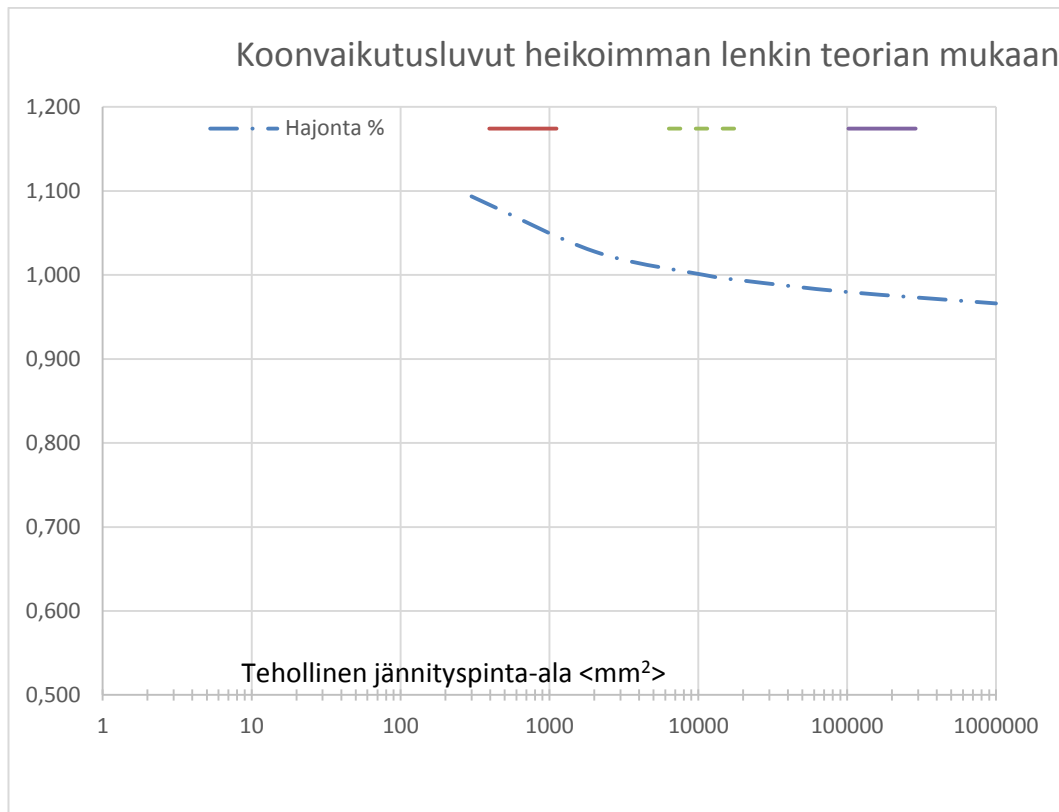
Kuva 40. Lc 50 pinta-alan mukaan.

keskim.jännitys

328 N/mm²



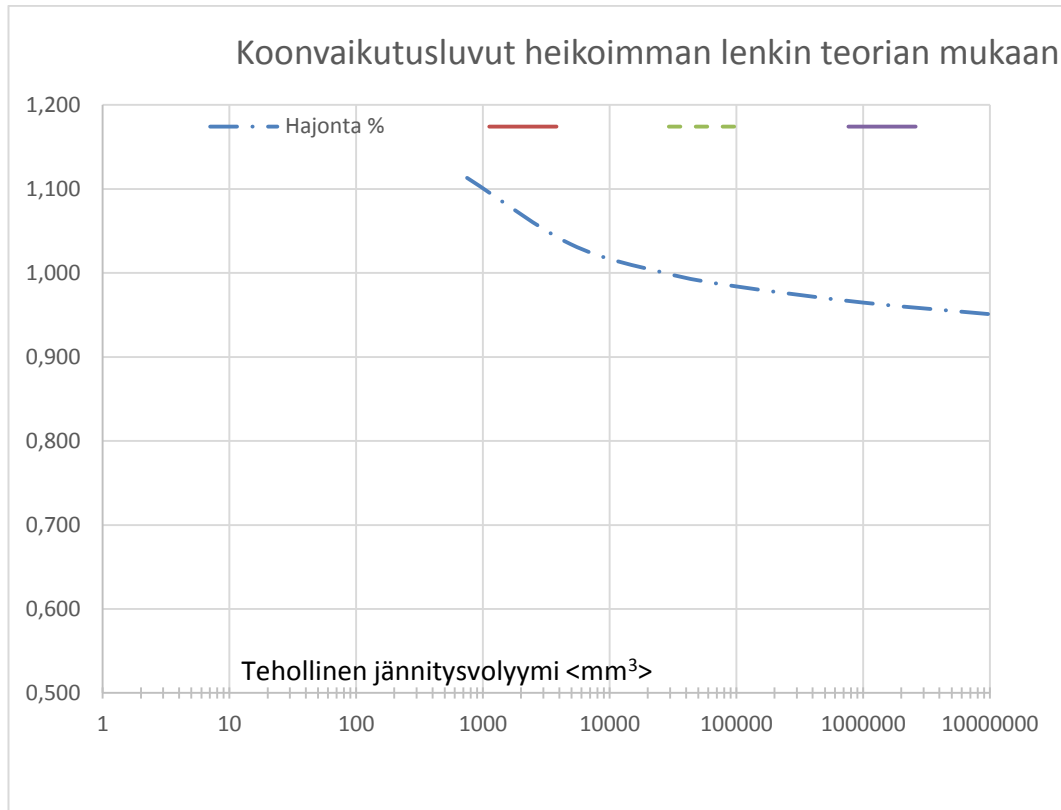
Kuva 41. Lc50 tilavuuden mukaan.



Kuva 42. Lt400 pinta-alan mukaan.

keskim. jännitys

319 N/mm²



Kuva 43. Lt400 tilavuuden mukaan

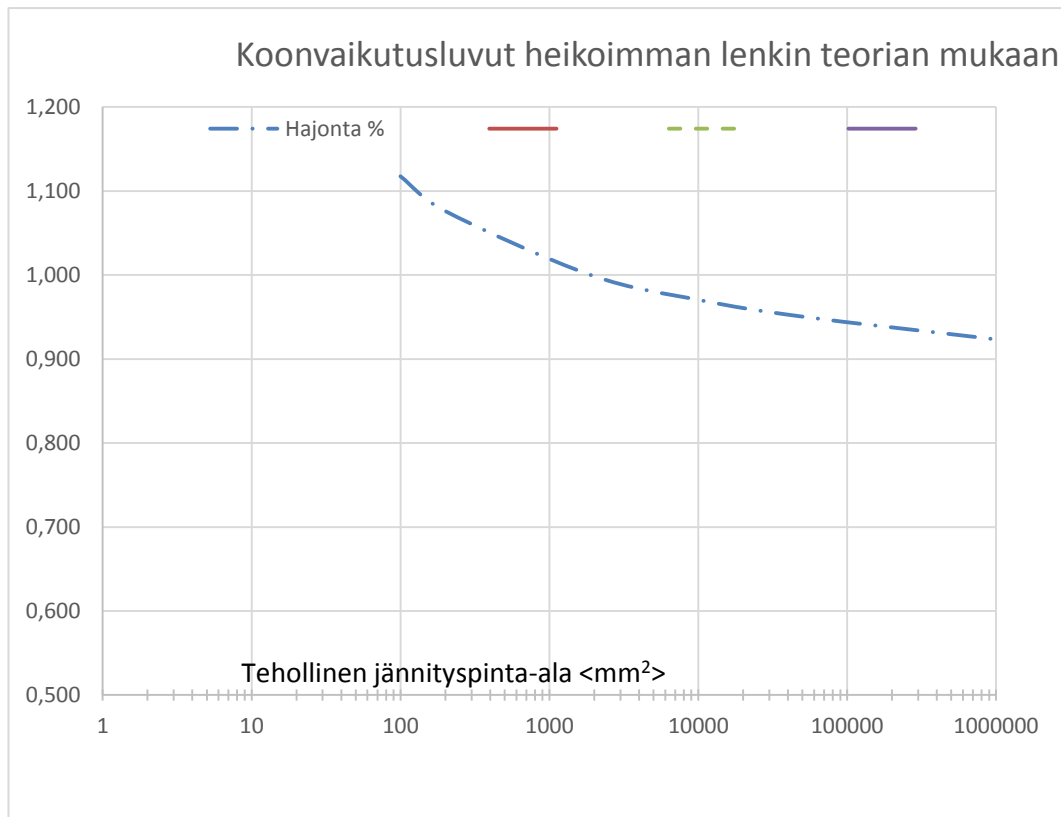
ERÄ 3

Verrattaessa koonvaikutus lukuja sarjassa 3, voidaan havaita että taulukon oikean 2 sarakkeessa olevaa suhdelukua 0,969 on lähempänä kappaleen pinta-alan A:n antamaa ennustetta, kun sitä vertaa pienemmän Lc 50 sauvan arvoon 0,970.

	Lc50	Lt 400	suhde Lc50/Lt400	suhde Lt400/Lc 50
Rm (MPa)	311,125	320,9		
Ksize taulukko A:n mukaan	0,970	0,993	0,969	1,031
Ksize taulukko V:n mukaan	0,973	0,982		

Taulukko 12. Erän 3 Ksize kerroin

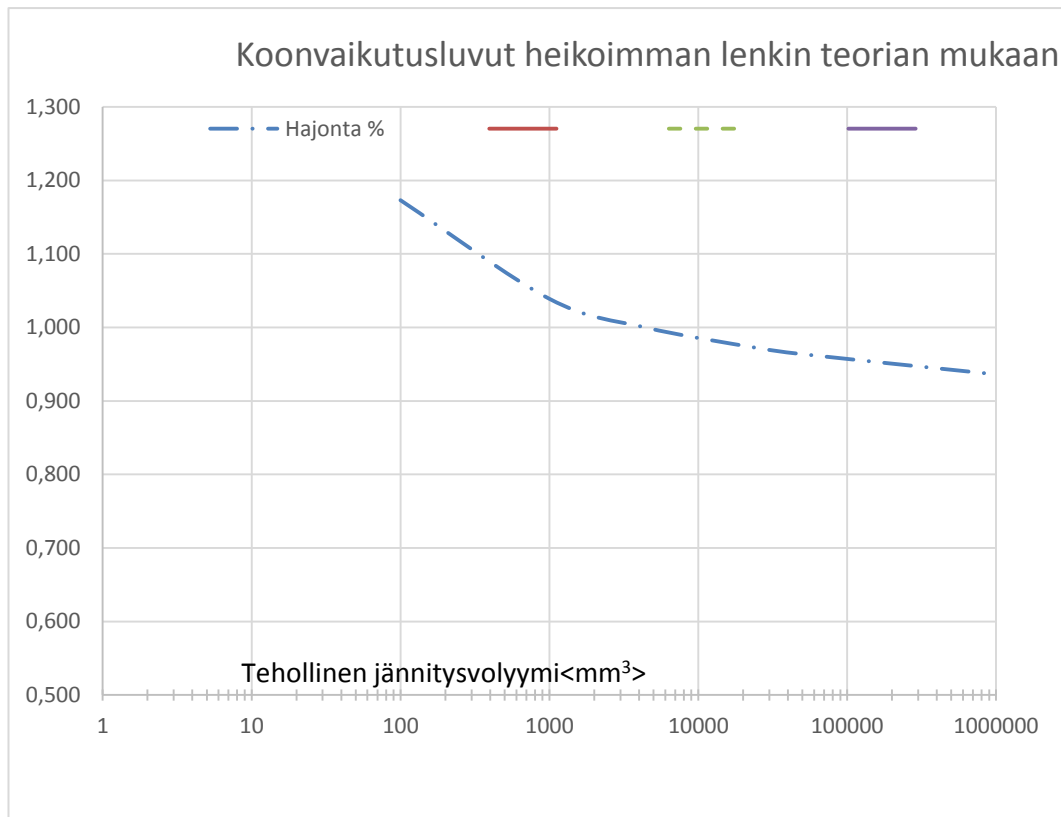
Erä 3/Lc 50



Kuva 44. Lc 50 pinta-alan mukaan

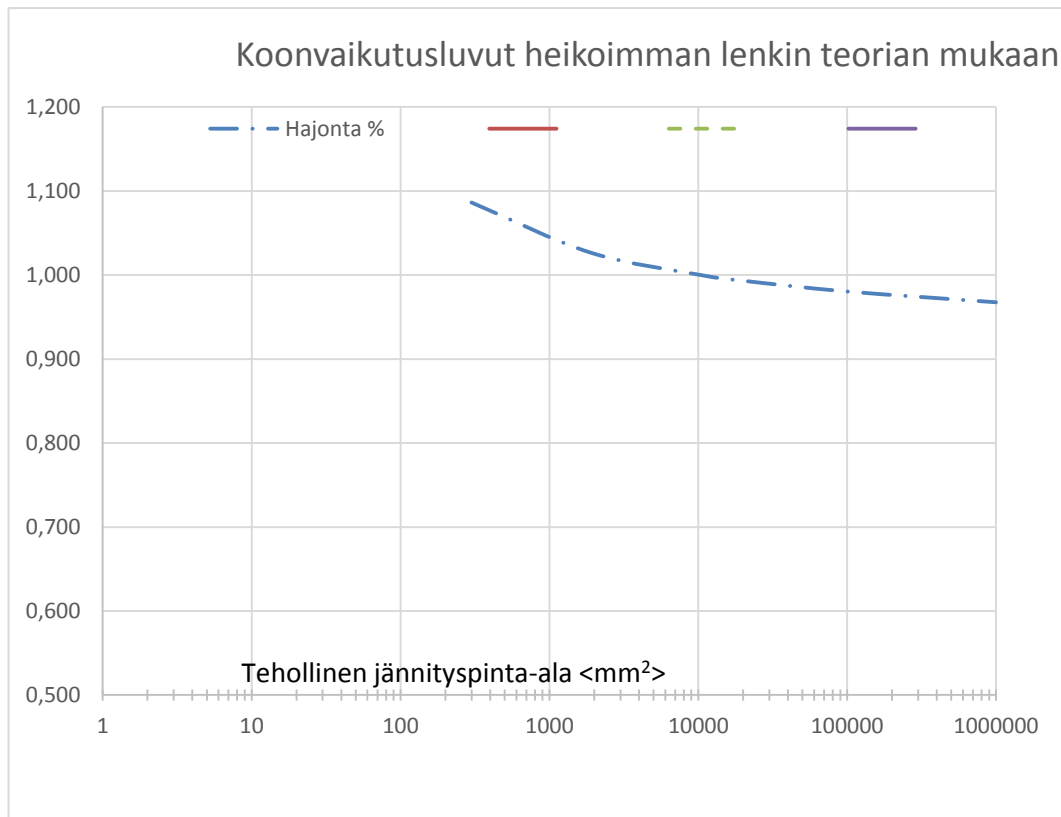
keskim. jännitys

311 N/mm²



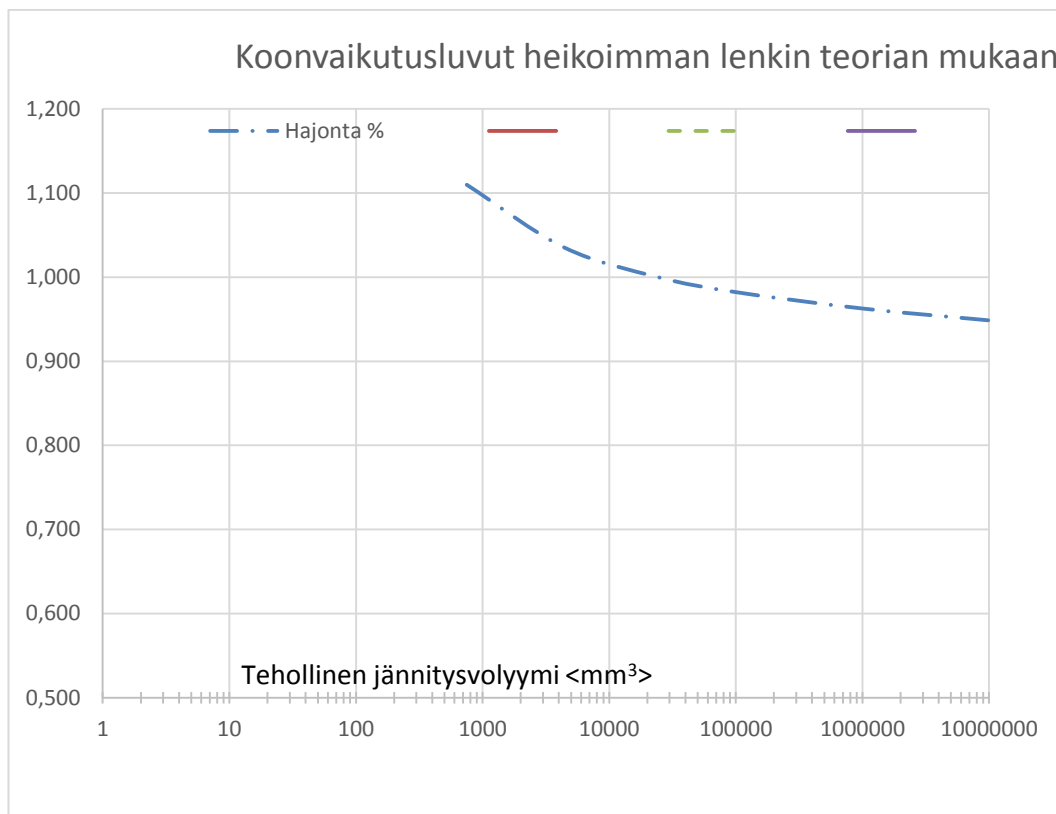
Kuva 45. Lc 50 tilavuuden mukaan

Erä 3/Lt 400

**Kuva 46.** Lt400 pinta-alan mukaan

keskim. jännitys

321 N/mm²



Kuva 47. Lt400 tilavuuden mukaan

Esimerkiksi Lc 50 sauvalle erässä 1 koonvaikutusluvulla 1 pinta ala olisi n 2000 mm² (tarkasti se on 1951 mm²), ja Lt 400 sauvan kuvaajalta katsottuna K:n arvo noin 1,03 2000 mm² arvolla.

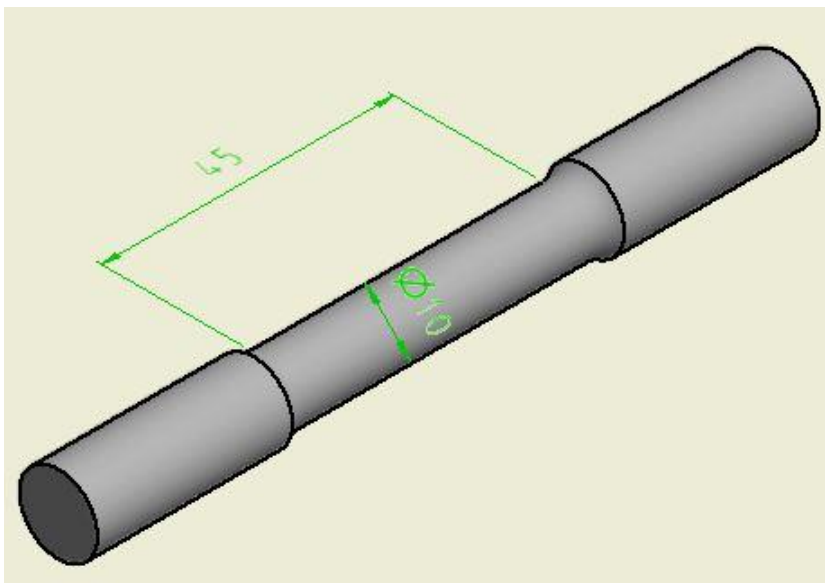
Tilavuuksia vertaillessa havaisee, niin esim erässä 1 Lc 50 sauvalla K.n arvoa 1 vastaa tilavuus 4700 mm³, ja kun vertaa sitä Lt 400 sauvan käyrään, se antaisi 4700 mm³ tilavuudella arvon K =1,03.

Näyttäisi siis, että sekä V että A käyristä saa suunnilleen saman K arvon.

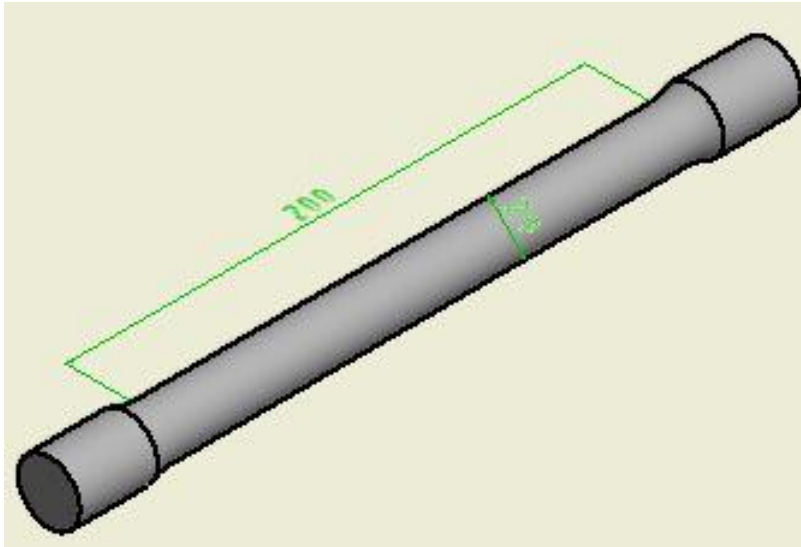
Se siis merkitsee, että sekä tilavuuden että pinta-alan perusteella piirretyillä käyrillä saadaan lähes saman tulos (vertaa käyriä taulukoihin liittessä 4).

3.7. EN-GJL-350 Valurautasauvat

Valurautasauvojen koe-erät K ja T tehtiin myös, ja sauvojen mitat olivat seuraavat: K-sauvan koepituus L_c oli 45 mm ja T-sauvan 200 mm, ja paksuudet vastavasti 10 mm ja 20 mm. Sauvat valmistettiin sorvaamalla VAKK:lla.



Kuva 48. Valurautasauva koe-erästä K, L_c 45, d 10.



Kuva 49. Valurautasauva koe-erästä T, Lc 200, d 20.

3.8. Kokeiden suoritus valurautasauvoille.

Sauvat vedettiin Novian tiloissa Technobotnialla.

Tehtiin vetosarjat K ja T. Seuraavat kuvat esittävät vetokokeen suoritusta.



Kuva 50. K ja T koe-eristä suoritettiin kummastakin 10 vetokoetta.



Kuva 51. Vetokoe K-erän sauvalla.



Kuva 52. K-erän sauvoja ennen koetta.



Kuva 53. T-erän sauvoja ennen koetta.



Kuva 54. Vetokoe T- erän sauvalla.



Kuva 55. Katkenneita T- erän sauvoja.

Kuvasta 55 näkyy, että sauvat 5, 8, 9 ja 10 menivät poikki läheltä kiinnityspäätä, murtumiskohta oli kohonneen jännityksen alueella lähellä pyörityssädettä.



Kuva 56. Katkenneita K- erän sauvoja.

Paksummalle T-erän sauvalle saatiin seuraavat tulokset

paksut sauvat (T-sarja)

vetonopeus 0,04 mm/s

koe-ro	d	murtolujuus		σ (N/mm ²)
		F (kN)	So (mm ²)	
T1	20,05	116,1	315,732	367,717
T2	20	115,4	314,159	367,330
T3	20	112,06	314,159	356,698
T4	20	113,78	314,159	362,173
T5	20	112,95	314,159	359,531
T6	20	114,66	314,159	364,974
T7	20	113,05	314,159	359,849
T8	20	113,89	314,159	362,523
T9	20	114,4	314,159	364,147
T10	20	111,02	314,159	353,388

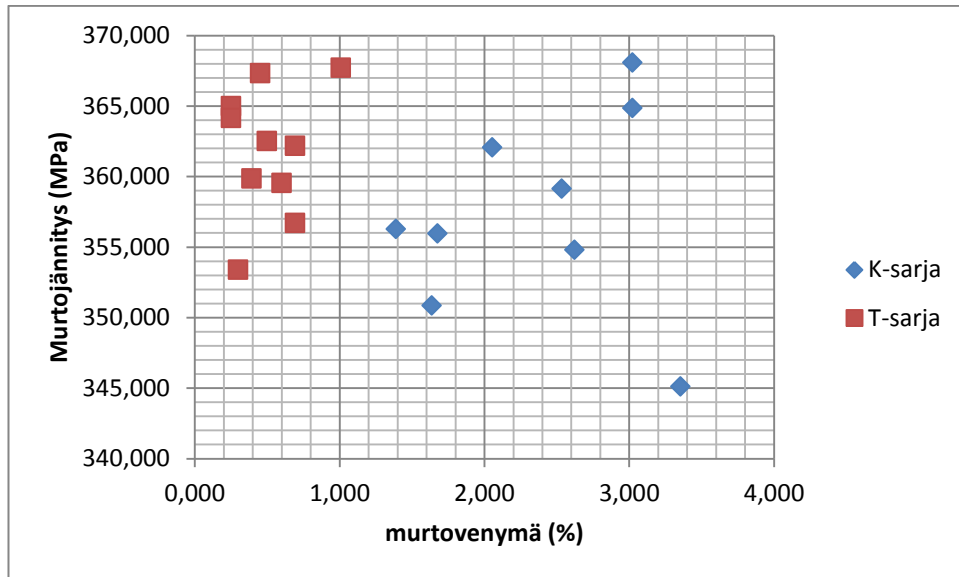
keskiarvo 113,731 314,317 361,833

keskihajonta 1,526 0,497 4,565

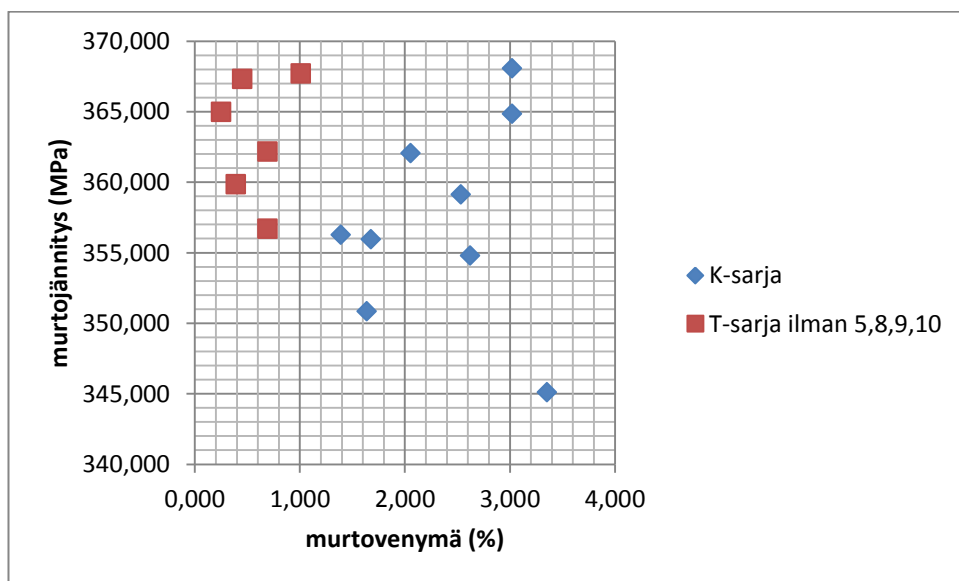
Taulukko 14. T-erän sauvat

murtovenymä 0,5 %

4 sauvaa (5, 8, 9, 10) katkesi kohonneen jännityksen alueelta. Seuraavalla sivulla taulukko, mistä nämä sauvat on otettu pois.



Kuva 57. Jännitys-venymä kuvio K- ja T erän sauvoille.



Kuva 58. Jännitys-venymä kuvio K- ja T erän sauvoille.

Koonvaikutuskertoimet materiaalille EN-GJL-350

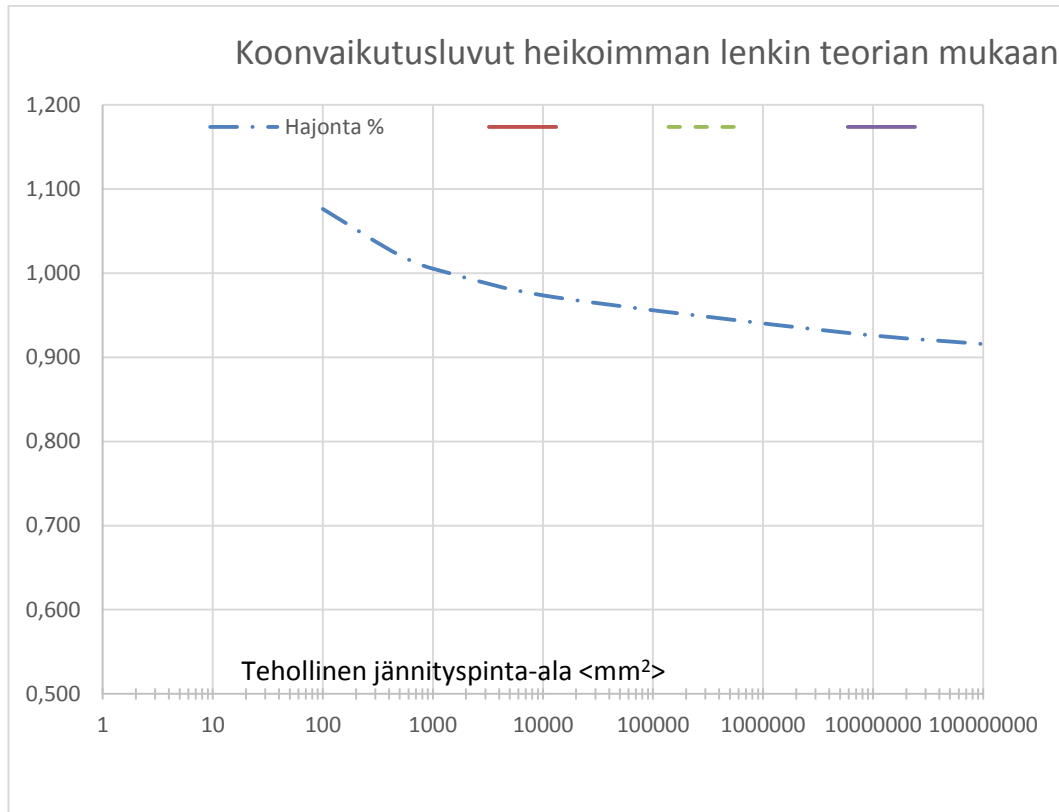
Verrattaessa koonvaikutus lukuja valurautasauvoilla, voidaan havaita että taulukon oikean 2 sarakkeessa olevaa suhdelukua 0,988 on lähempänä kappaleen pinta-alan A:n antamaa ennustetta, kun sitä vertaa pienemmän Lc 50 sauvan arvoon 0,970. Pinta-ala antaa siis paremman ennusteen tässä tapauksessa.

Ksize-taulukkoissa (liite 4) laskettu Excelillä työn teoria osuudessa kaavassa 13 esitetty koonvaikutuskerroin K-size.

K-sauvat

	K-sauva	T-sauva	suhde K-sauva/T-sauva	suhde T-sauva/Ksauva
Rm (MPa)	357,452	361,833		
Ksize taulukko A:n mukaan (3. alin luku/ vas. sarake)	0,970	0,993	0,988	1,012
Ksize taulukko V:n mukaan	0,973	0,982		

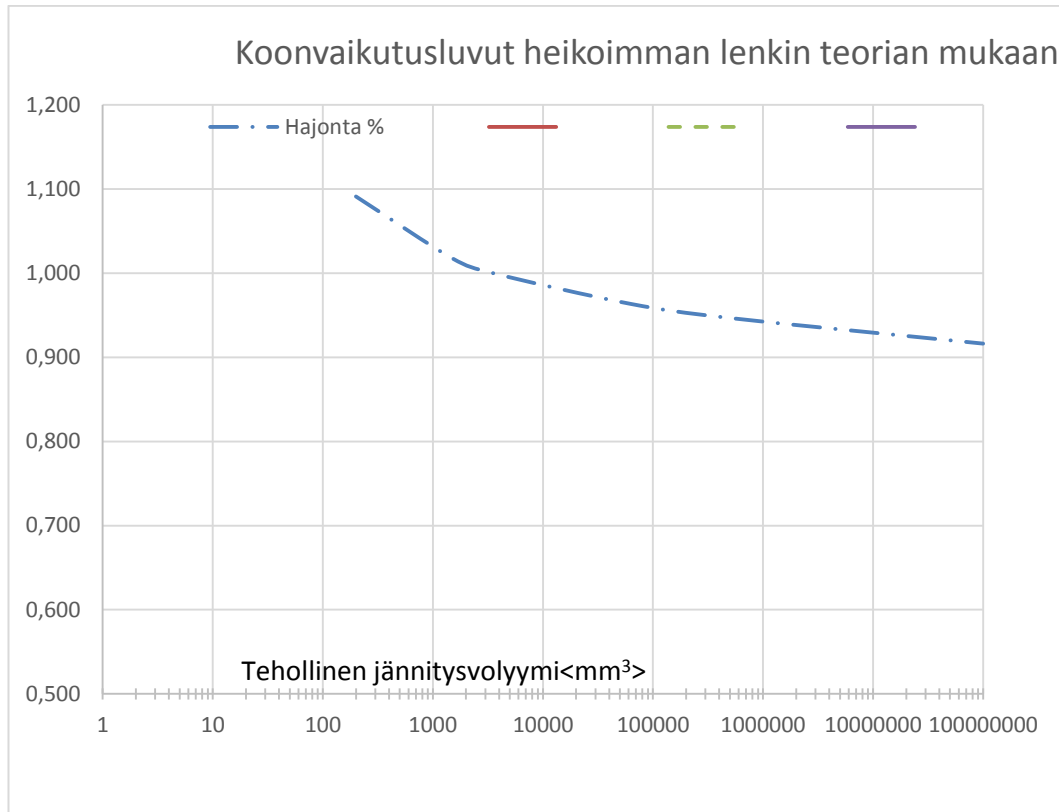
Taulukko 16. Valurautasauvojen K- ja T-sauvojen K ja Ksize kerroin



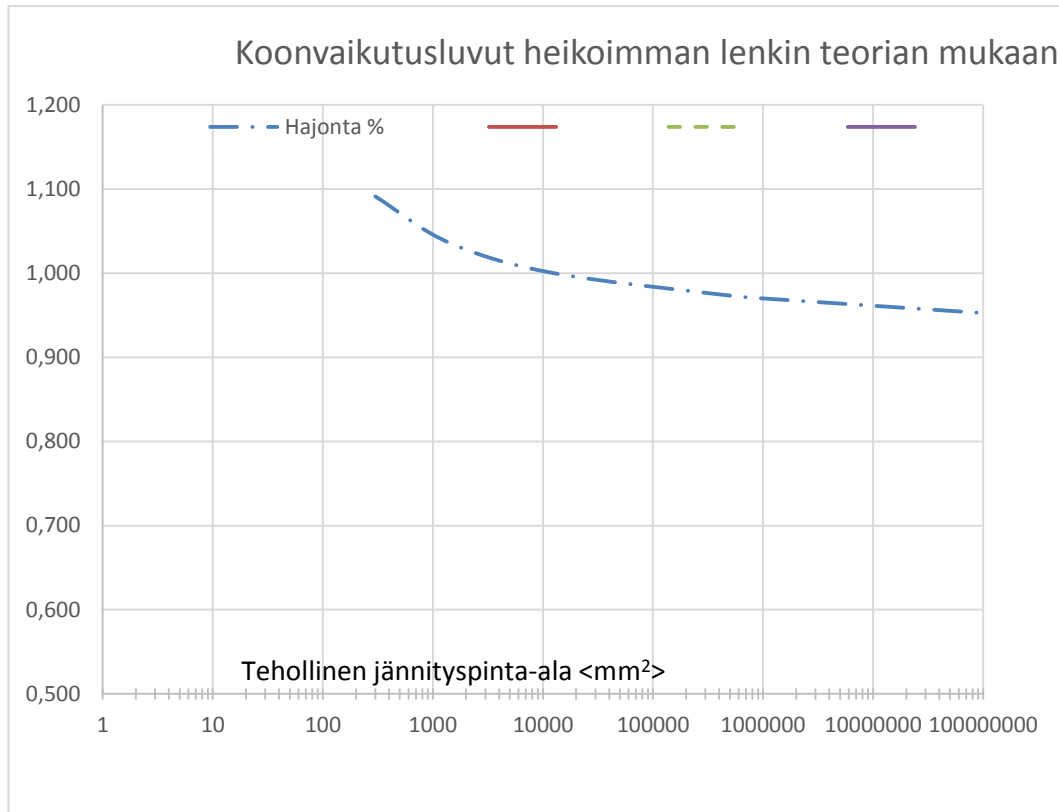
Kuva 59. K-sauva pinta-alan mukaan

keskim. jännitys

357 N/mm²

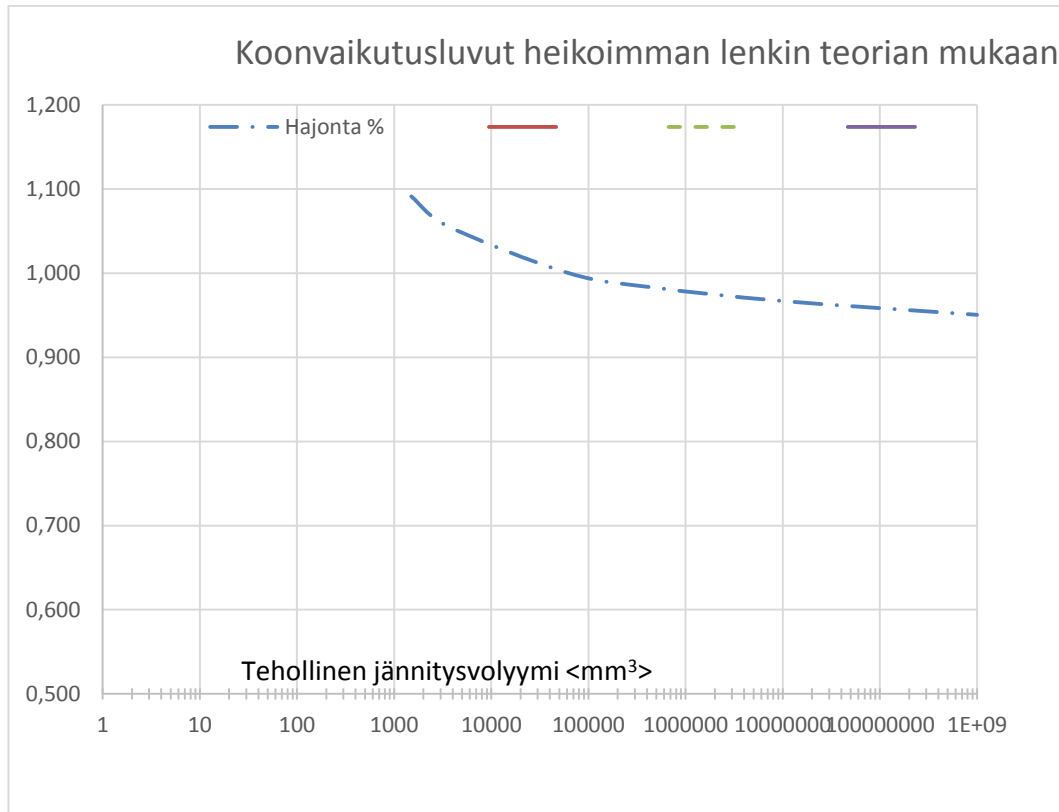


Kuva 60. K-sauva tilavuuden mukaan



Kuva 61. T-sauva pinta-alan mukaan

keskim. jännitys 362 N/mm^2



Kuva 62. T-sauva tilavuuden mukaan

4 JOHTOPÄÄTÖKSIÄ

Työssä tutkittiin tilastollista koon vaikutusta, ja miten sitkeys vaikuttaa siihen. Voitiin havaita, että S235 teräsauvat olivat lämpökäsittelyjenkin jälkeen edelleen sitkeitä, eikä kuten valurauta, joka murtui joka kerta hauraasti.

Kokonaisuudessaan testin tuloksia voinee pitää varsin luotettavina, ja johtopäätökseni olisi, että koska S235:llä 2 koe-erää 3:sta osoitti, että kappaleen koon kasvassa sen lujuus alenee, niin asia on syytä ottaa huomioon mitoitettaessa teräksestä tehtyjä koneenosia ja rakenteita.

Valuraudalla suuremman Lc 200 sauvan vetomurtolujuus oli yhden koe-sarjan perusteella jonkin verran suurempi (362 N/mm^2), kuin pienemmän Lc 45 sauvan (357 N/mm^2).

Valurautasauvoilla oli aika suuri hajonta (Lc 45 -sauva. 7 %, ja Lc 200 sauva 4,5%). Koon vaikutus tulisi ottaa tälläkin tavalla huomioon tässä tapauksessa.

Paksujen Lc 200 valurautasauvojen tuloksien syyt jäänevät vähän arvailujen varaan. Joko ainespaksuus vaikuttaa murtumisilmiöön tai sitten on toinen mahdollisuus: aihio on lujempaa pinnasta. Paksuissahan pois koneistettavaa jää vähän.

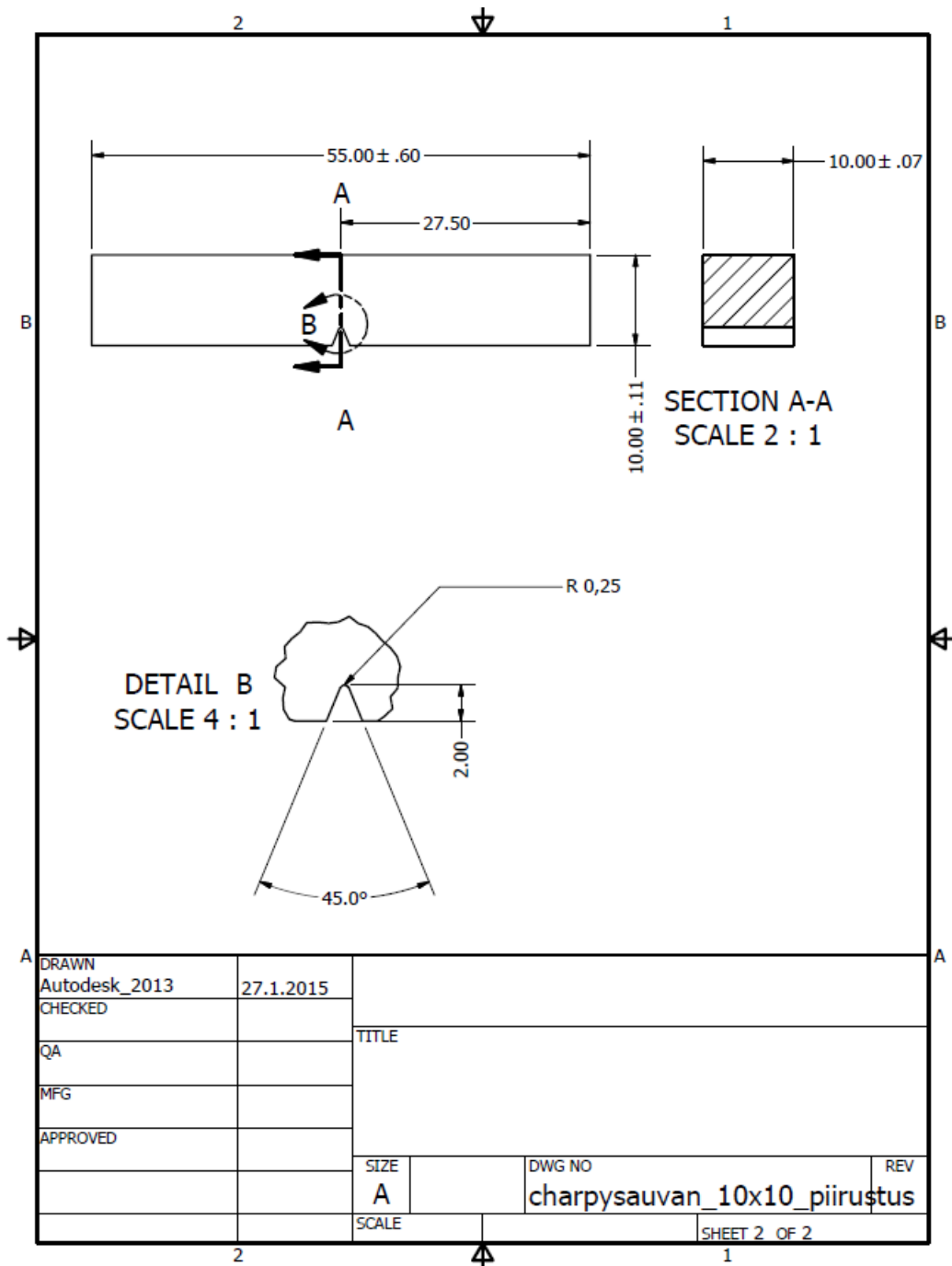
Jos koe-eriä olisi ollut useampia, tai olisi vedetty isompia sauvoja, olisi koon vaikutus voinut tulla paremmin esiin, eli koonvaikutus teorian mukaisella tavalla.

Kuitenkin kappaleen koon huomioon ottaminen on syytä pitää mielessä varsinkin valurautaisissa koneenosissa, ja myöskin siksi, koska valurautojen murtolujuuksissa näytti olevan niin suuri hajonta.

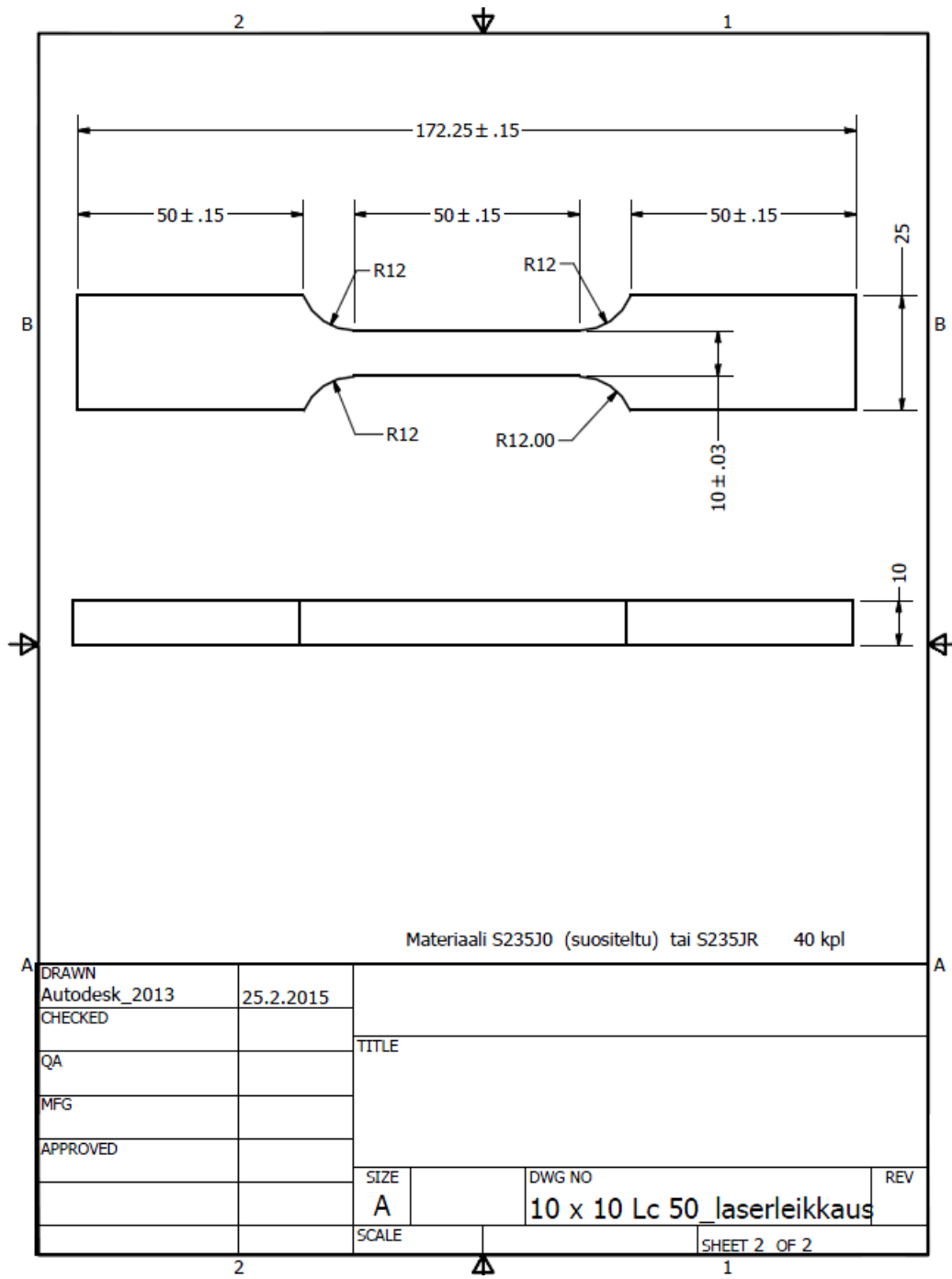
Jos tarkastelee heikoimman lenkin teorian perusteella laskettuja koonvaikutuskertoimia, niin voi havaita, että esim. Lc-50 terässauvalle koonvaikutuskertoimeksi tulee lähes sama arvo riippumatta siitä, tarkastellaanko referenssinä tilavuutta vai pinta-alaa. Valurautoilla paremman arvion koonvaikutuksesta näyttäisi antavan pinta-ala.

LÄHTEET

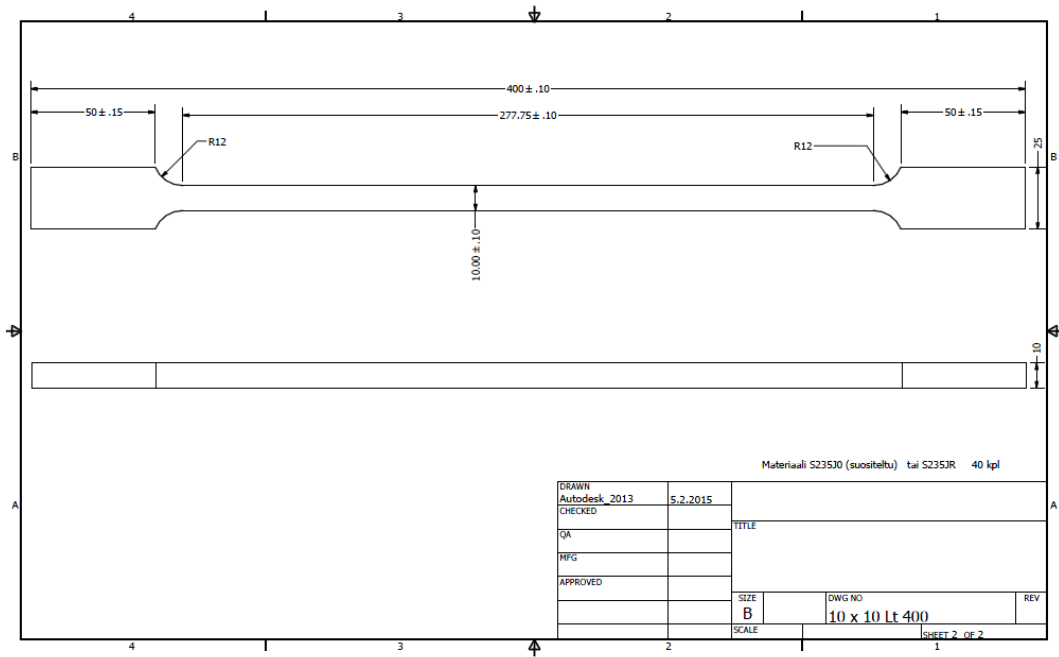
- /1/ Callister, W.D. & Rethwisch, D.G. (2011) *Materials science and engineering*. 8. painos. John Wiley & Sons, Inc.
- /2/ Huhdankoski, E. (2000) *Rautaruukin teräkset ääriolosuhteissa*. 2. painos. Keuruu: Otava.
- /3/ Meyers, M. & Chawla, K. (2009) *Mechanical behaviour of materials*. 2. painos. Cambridge: Cambridge University Press.
- /4/ Rabb, R. (2013) *Todennäköisyysteoriaan pohjautuva väsymisanalyysi*. 1. painos. Books on demand.
- /5/ Väsymislujuuden tilastollinen ennustaminen, Makkonen, M. 2014. http://rmseura.tkk.fi/rmlehti/2014/nro3/RakMek_47_3_2014_1.pdf. Viitattu 20.3.2015.
- /6/ Tampereen teknillinen yliopisto. Materiaaliopin laitos. Materiaalit kurssi. <http://www.ims.tut.fi/vmv/2005/index.php>. Viitattu 4.6.2015
- /7/ Makkonen, M. 1999. Väitöskirja. *Size Effect and Notch Size Effect in Metal Fatigue*. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu.
- /8/ Murakami, Y. 1994. Inclusion Rating by Statistics of Extreme Values and its Application to Fatigue Strength Prediction and Quality Control of Materials. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 99(4), July-August.
- /9/ Dr. Robert B. Abernethy's Library. Weibull Articles. <http://www.barringer1.com/wa.htm>. Viitattu 5.6.2015
- /10/ Suomen Standardisoimisliitto SFS Ry. SFS-EN ISO 6892-1 standardi. Metallien vetokoe. <http://www.sfs.fi/> Viitattu 5.6.2015.
- /11/ Suomen Standardisoimisliitto SFS Ry. SFS-EN ISO 148-1 standardi. Metallien Charpyn iskukoe. <http://www.sfs.fi/> Viitattu 5.6.2015.



Charpy-sauvan piirustus



Lc 50 vetosauvan piirustus



Lt 400 vetosauvan piirustus

Charpy-kokeiden tuloksia

Erät 1 - 3

ERÄ 1	vetokokeet tehty erästä 1	
	iskuenergia	lämpötila
	kpm	(°C)
	29,9	+20
	29,3	-60
ERÄ 2	27,8 kpm(-60° C)	3 h 920 C uuni vetokokeet tehty
ERÄ 3		uuni 950 °C, koelämpötila -60 °C)
	kpm	
	24,1	
	1,2	
	18,2	
	28,35	
	2,5	
	27	
	7,51	
keskiarvo/erä 3	15,55	vetokokeet tehty erästä 3
keskihajonta/erä 3	11,66	arvolla 7,51 meni kokonaan poikki

Vetokokeiden tuloksia

Erä 1

Lc 50

koe 1 -3
vetonopeus 1 mm/min

koe 4-6
vetonopeus 10 mm/min

Erä 1

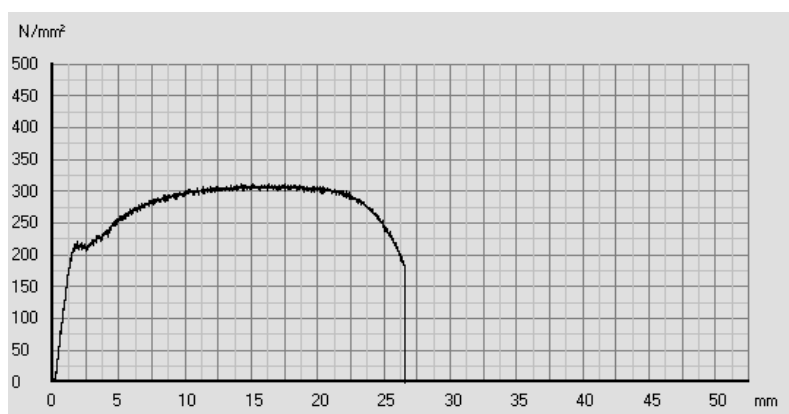
Lt 400

koe 4 -6
vetonopeus 5 mm/min

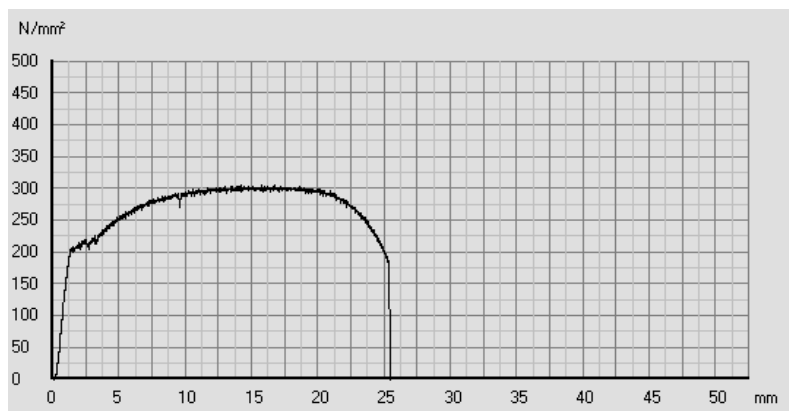
koe
10-12
vetonopeus 50 mm/min

Jännitys-venymä käyrät

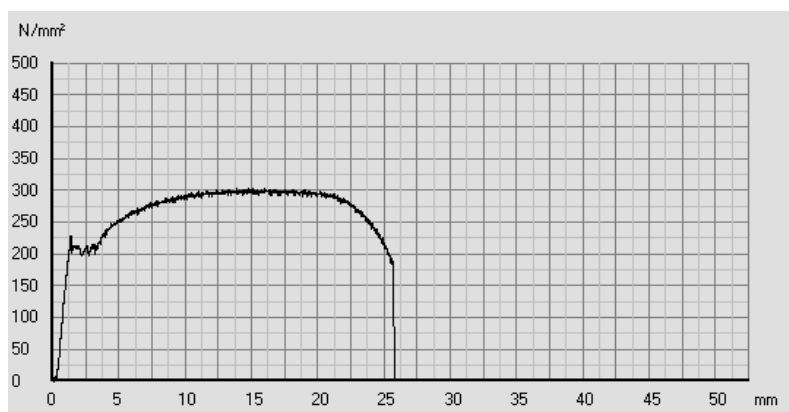
1.erä



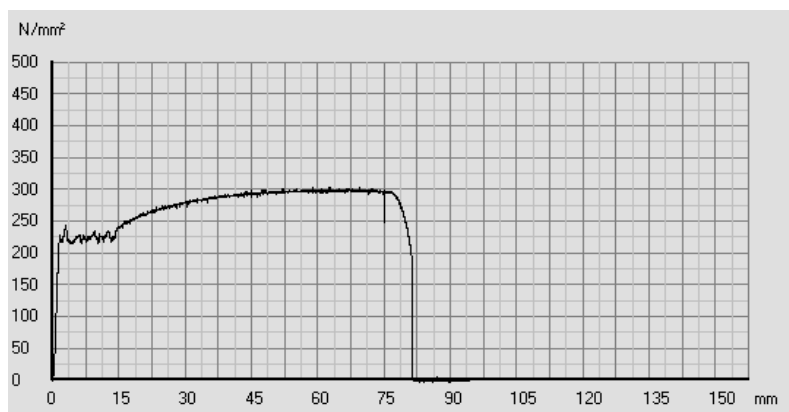
koe 1. Lc 50



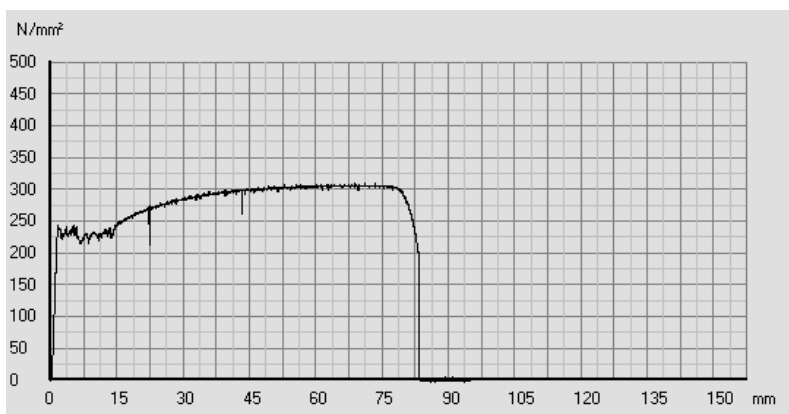
koe 2. Lc 50



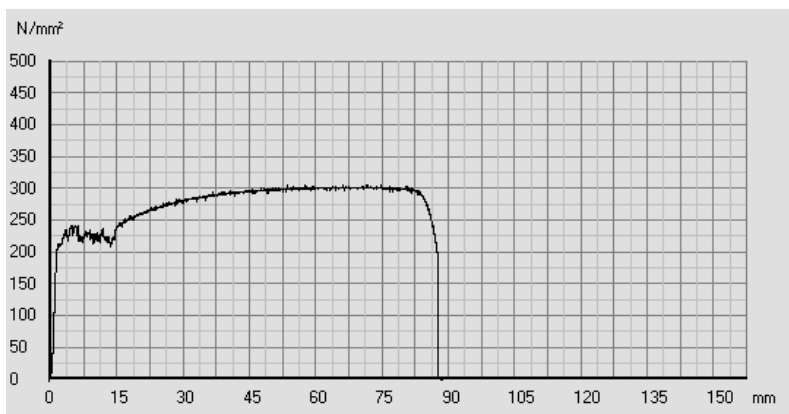
koe 3. Lc 50



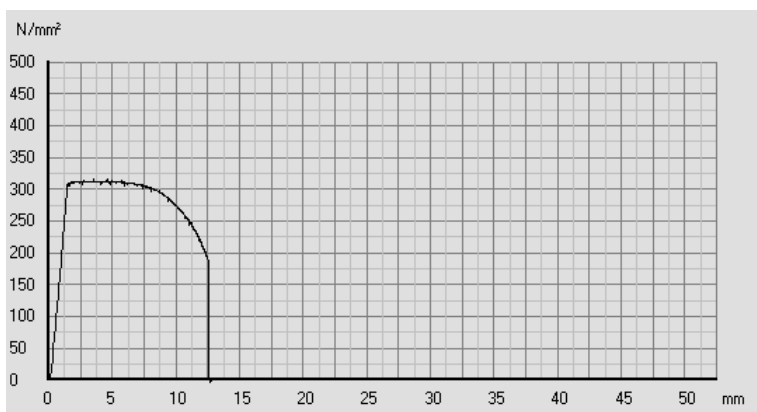
koe 4. Lt 400



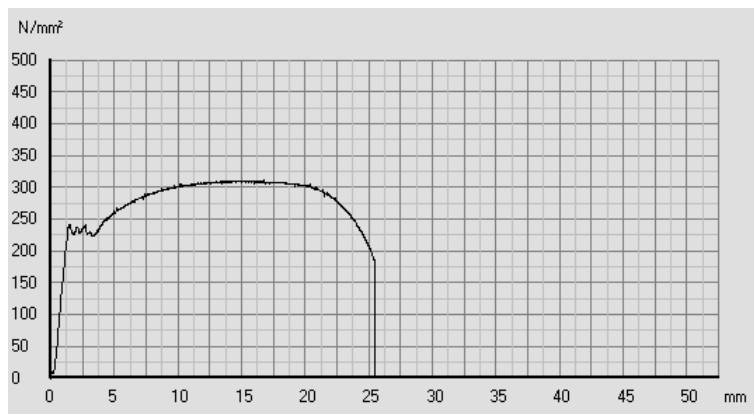
koe 5. Lt 400



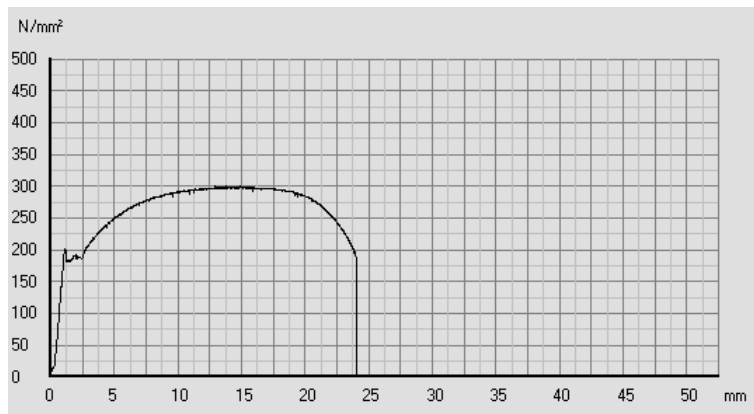
koe 6. Lt 400



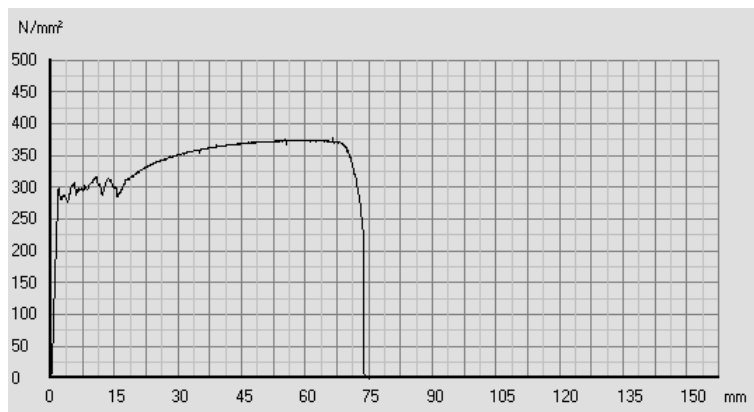
koe7. Lc 50



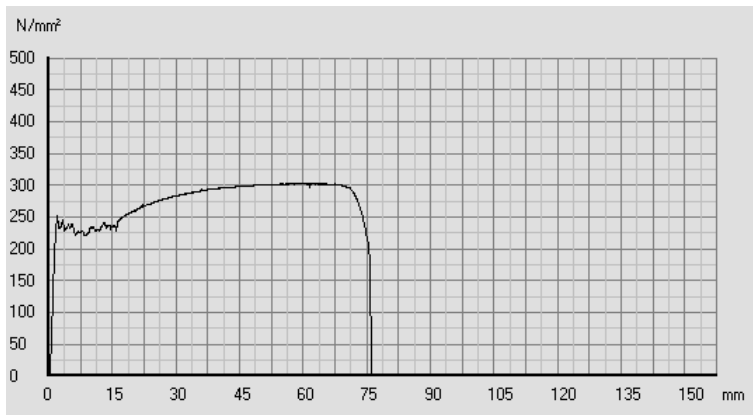
koe 8. Lc 50



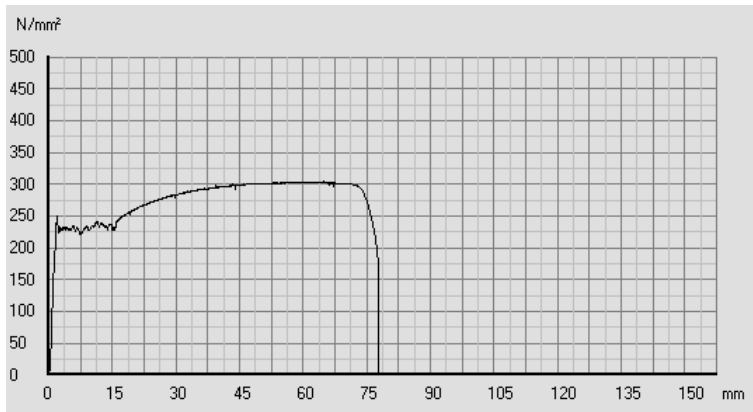
koe 9. Lc 50



koe 10. Lt 400



koe 11. Lt 400



koe 12. Lt 400

Erä 2

Lämpökäsitelty 920 °C uunissa 3 h

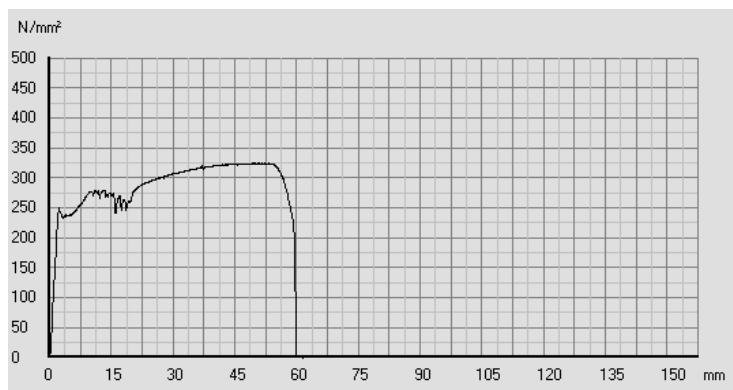
Lc 50

vetonopeus 10 mm/min

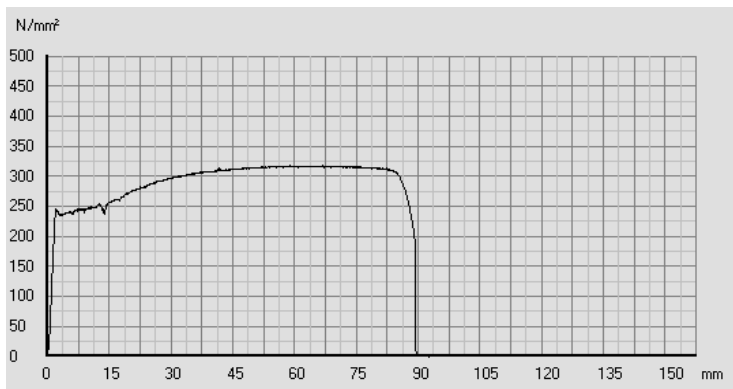
Erä 2

Lt 400

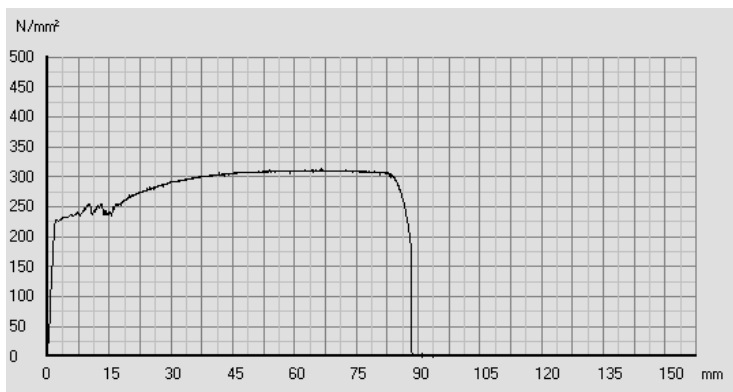
vetonopeus 50 mm/min



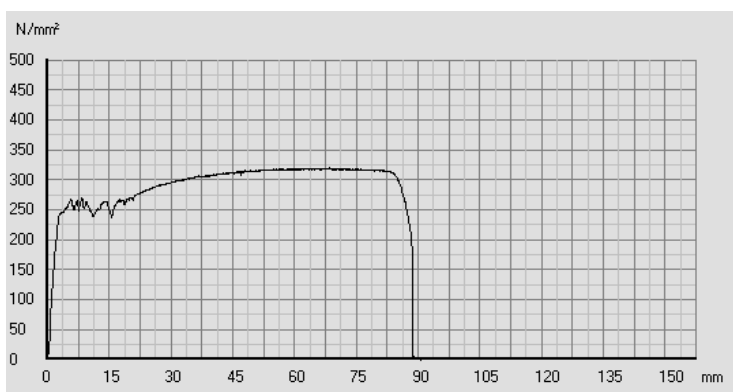
koe 13. Lt 400



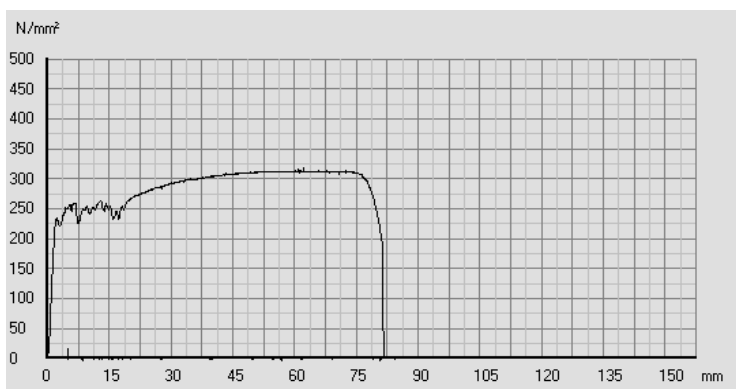
koe14. Lt 400



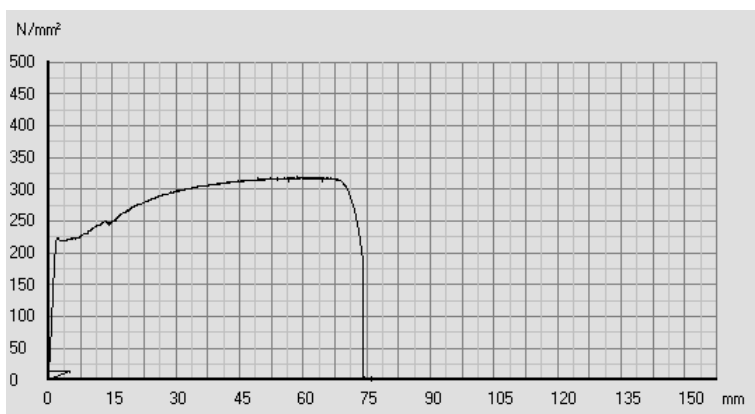
koe 15. Lt 400



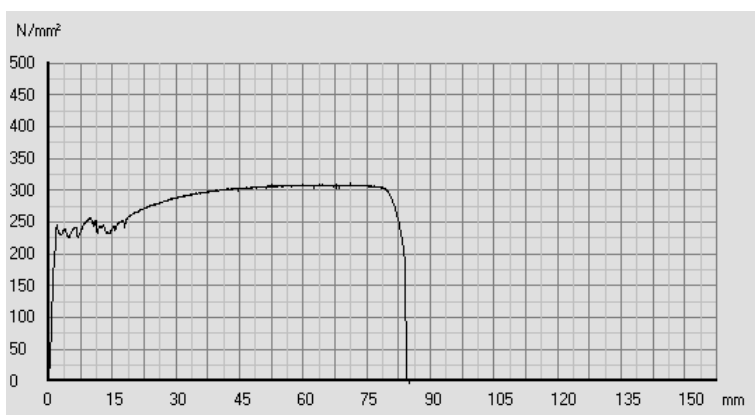
koe 16. Lt 400



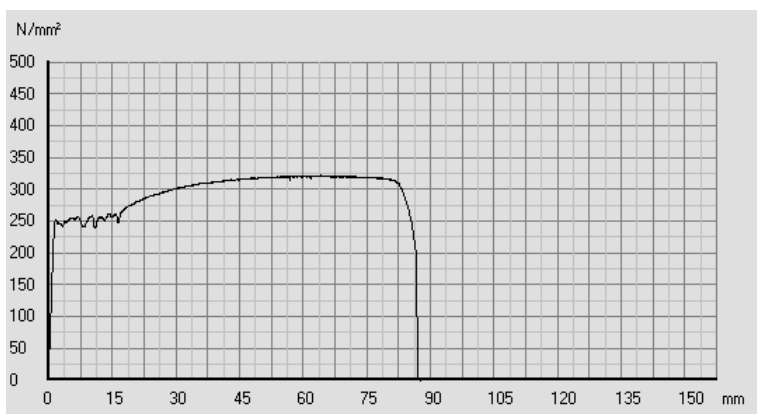
koe 17. Lt 400



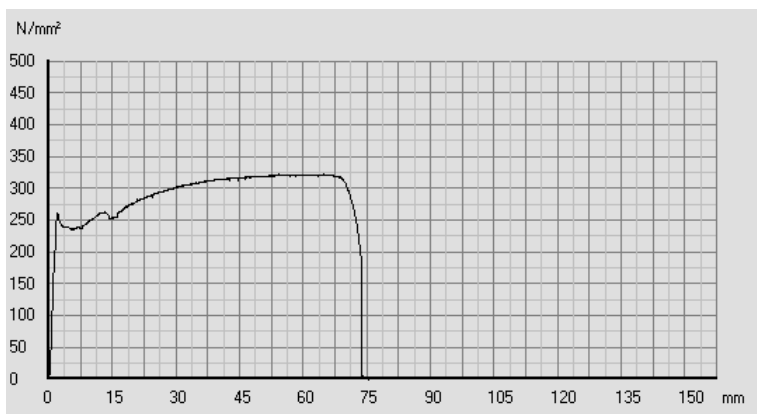
koe 18. Lt 400



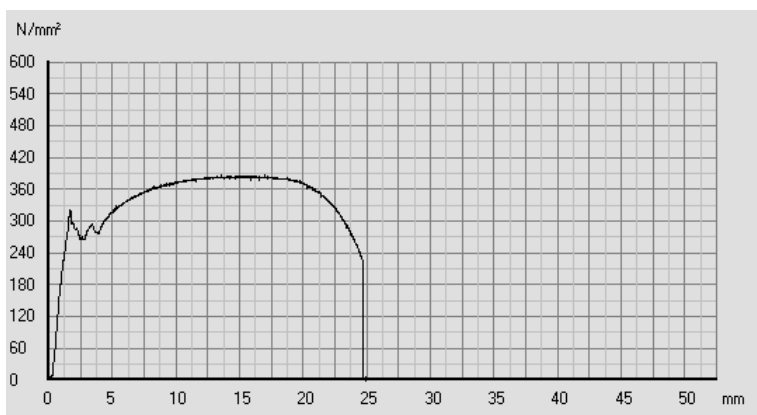
koe 19. Lt 400



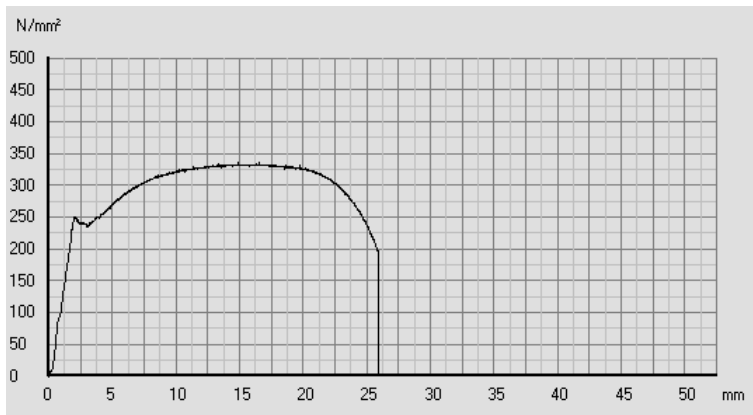
koe 20. Lt 400



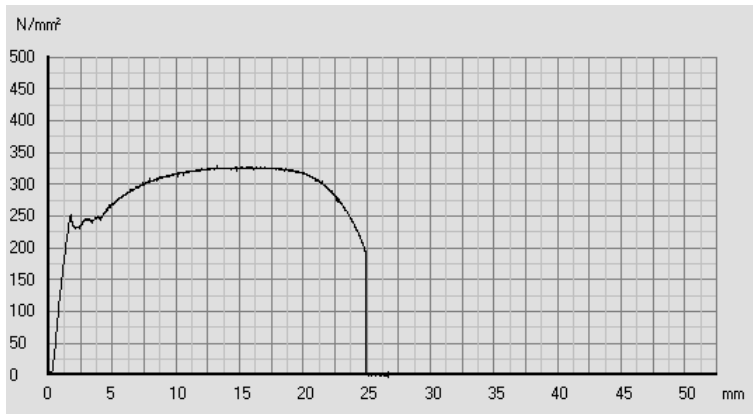
koe 21. Lt 400



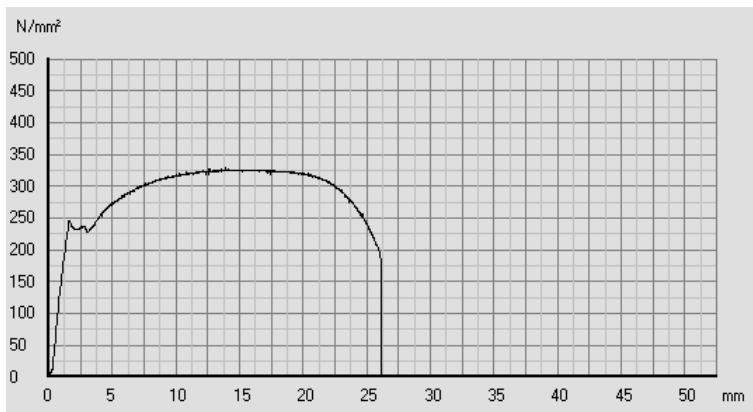
koe 22. Lc 50



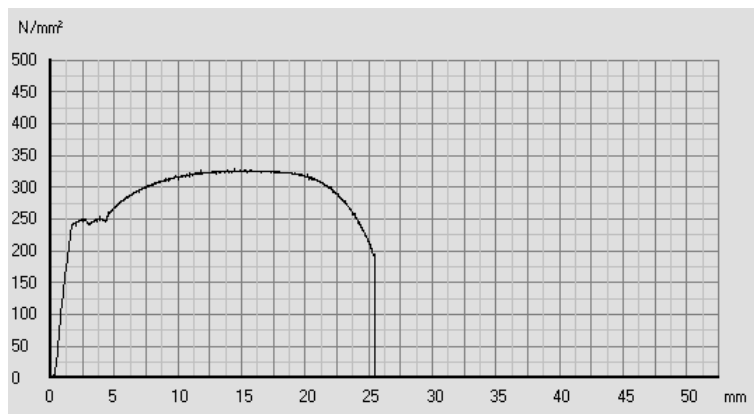
koe 23. Lc 50



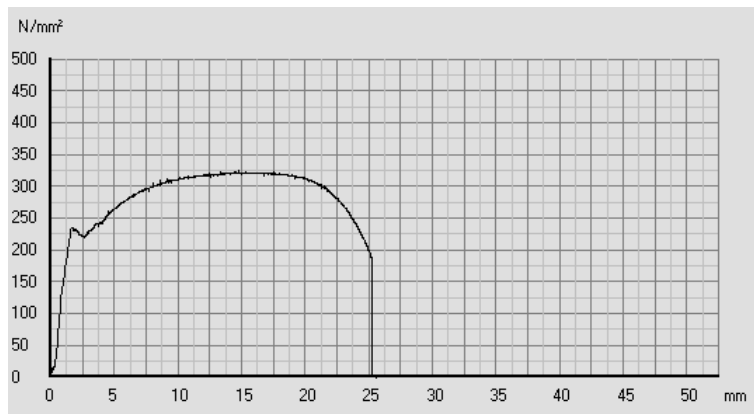
koe 24. Lc 50



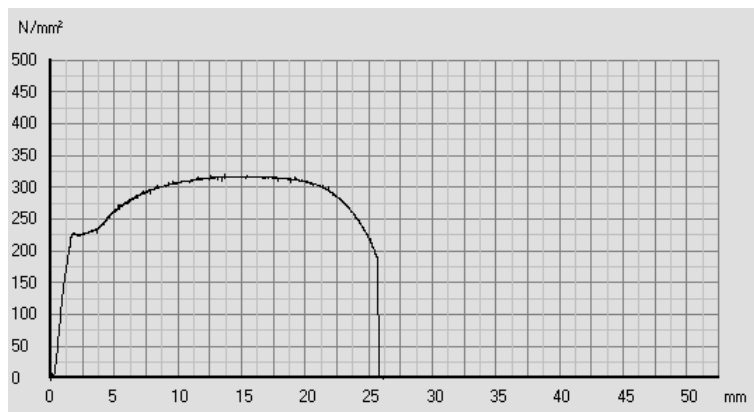
koe 25. Lc 50



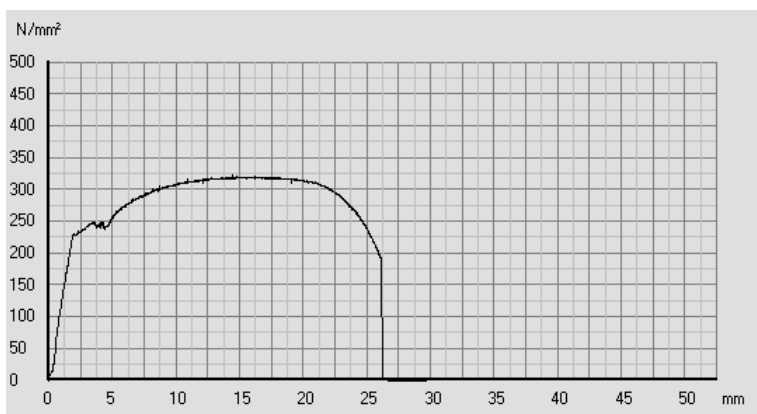
koe 26. Lc 50



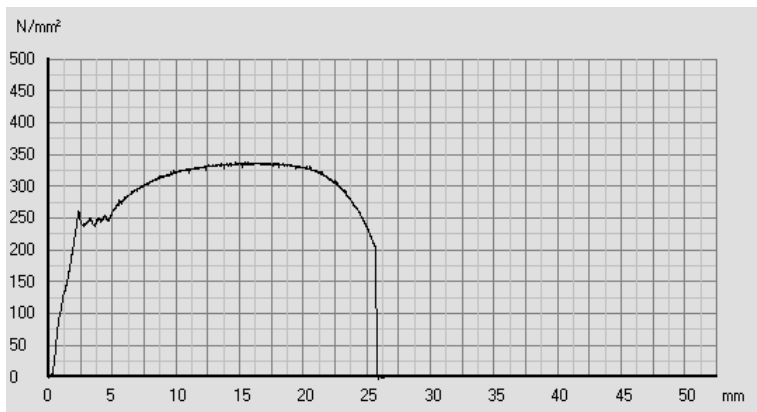
koe 27. Lc 50



koe 28. Lc 50



koe 29. Lc 50



koe 30. Lc 50

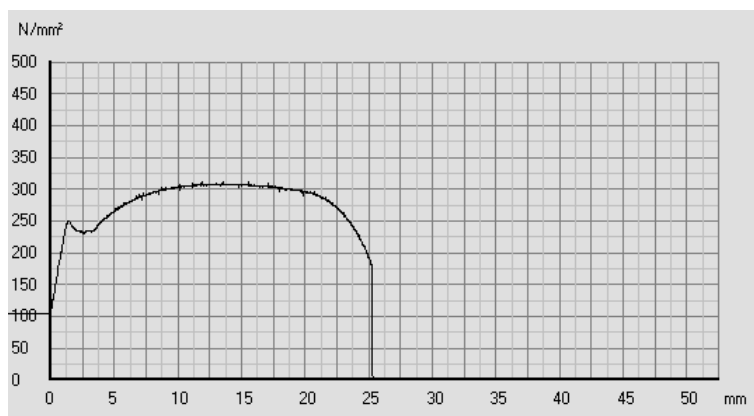
Erä 3

Lämpökäsitelty aluksi 1,5 h lämpötilassa 950 °C, 2h siinä, sitten 1,5 h 680 °C

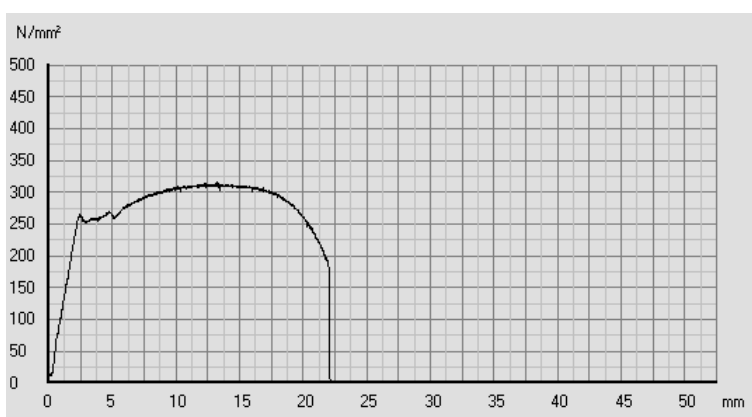
Vetolämpötila -60°C.

Lc 50

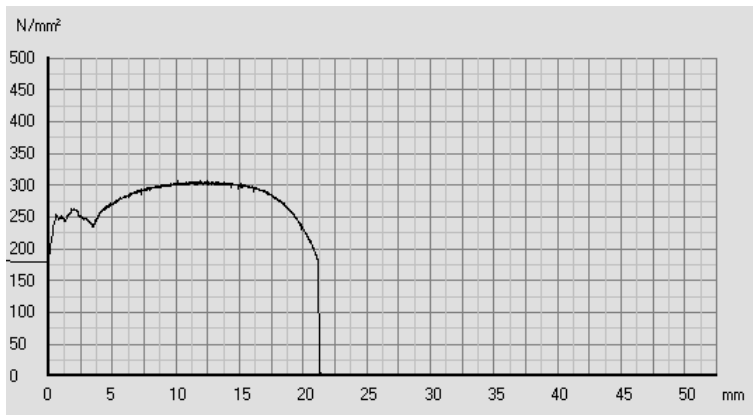
vetonopeus 10 mm/min



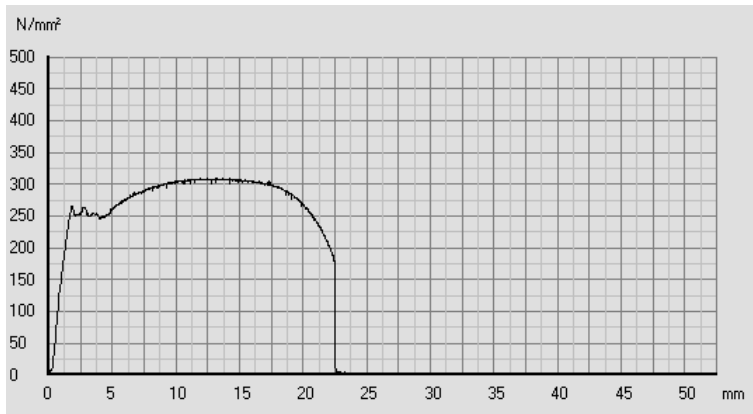
koe 31. Lc 50



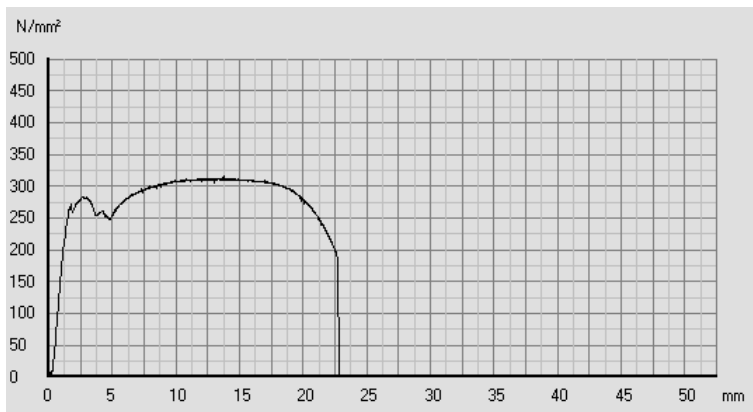
koe 32. Lc 50



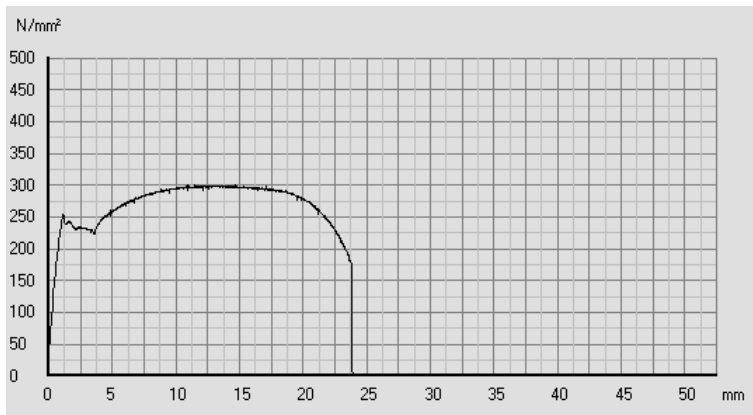
koe 33. Lc 50



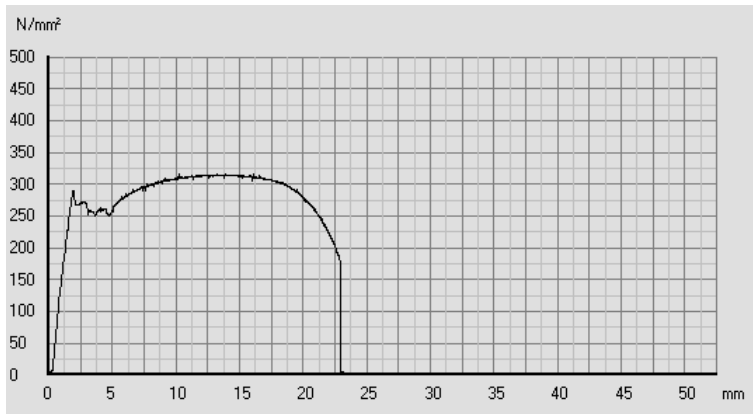
koe 34. Lc 50



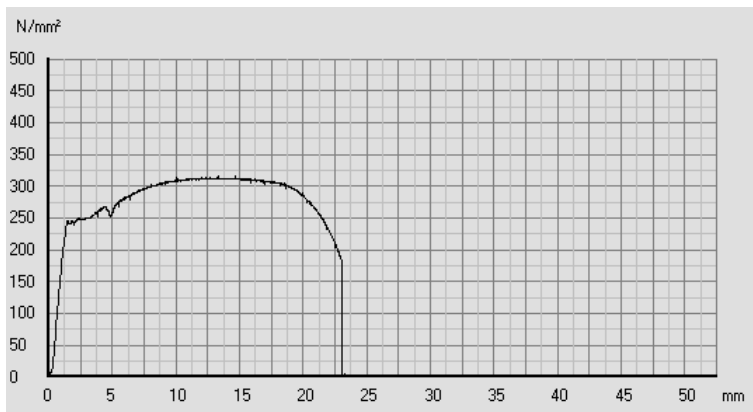
koe 35. Lc 50



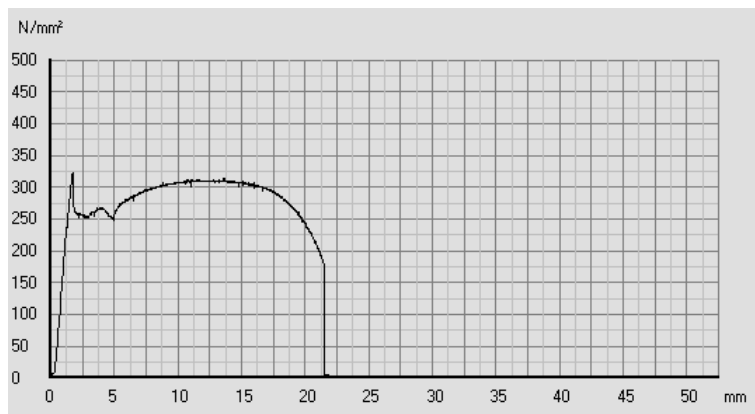
koe 36. Lc 50



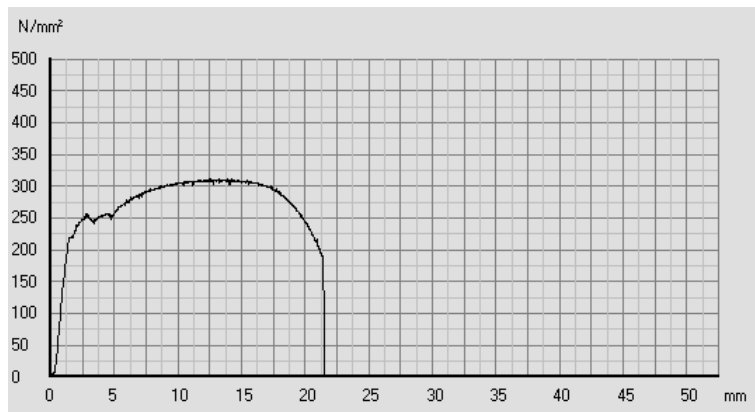
koe 37. Lc 50



koe 38. Lc 50



koe 39. Lc 50

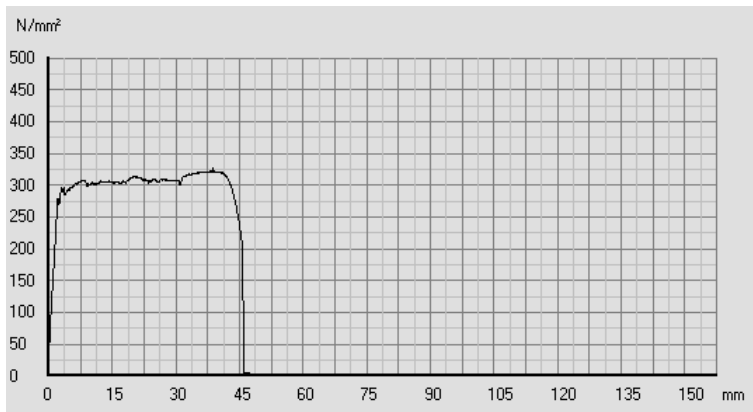


koe 40. Lc 50

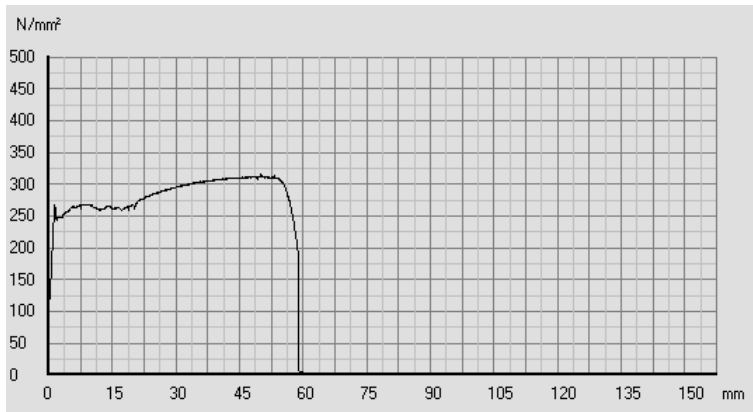
Lt 400 sauvat

Lt 400

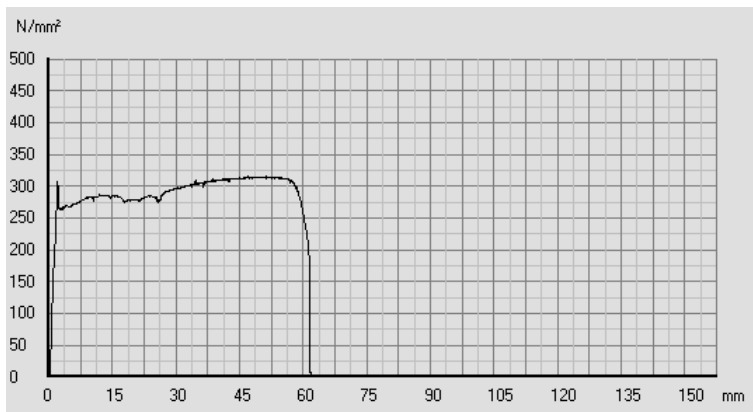
vetonopeus 50 mm/min



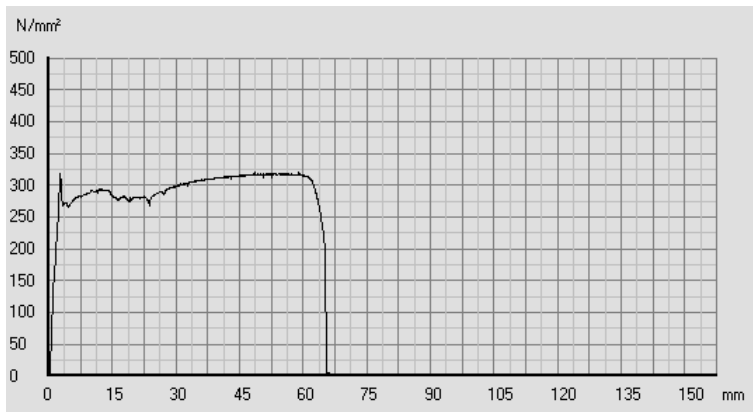
koe 41. Lt 400



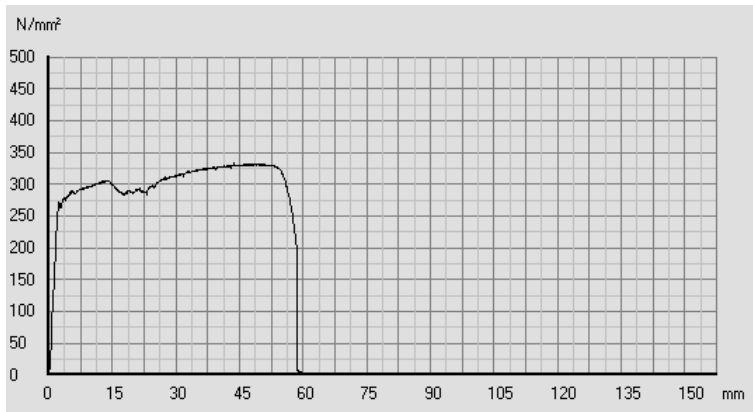
koe 42. Lt 400



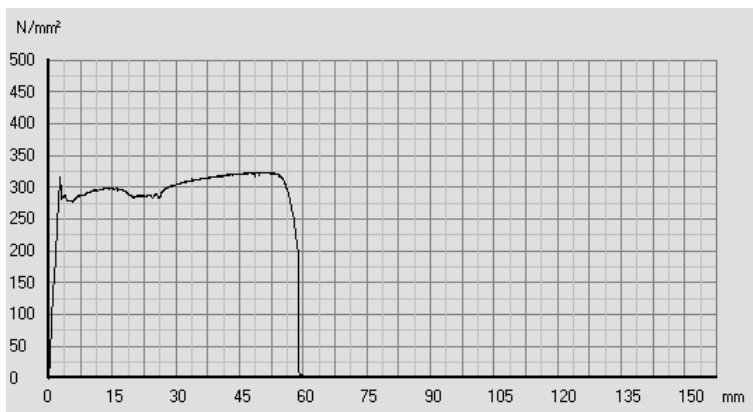
koe 43. Lt 400



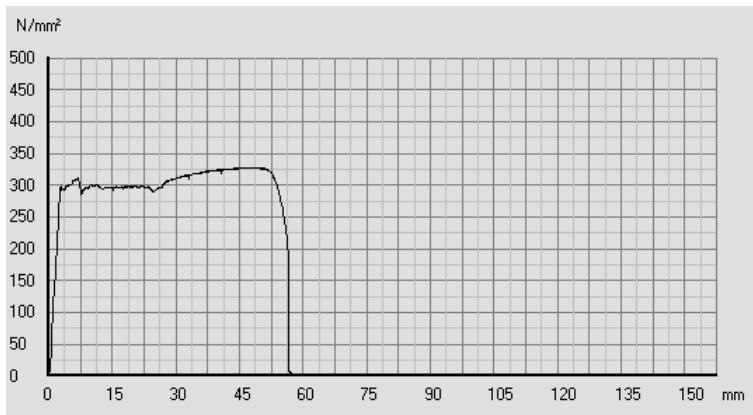
koe 44. Lt 400



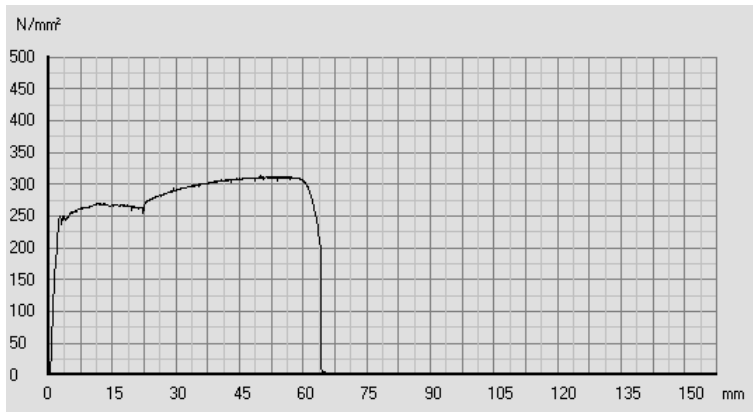
koe 45. Lt 400



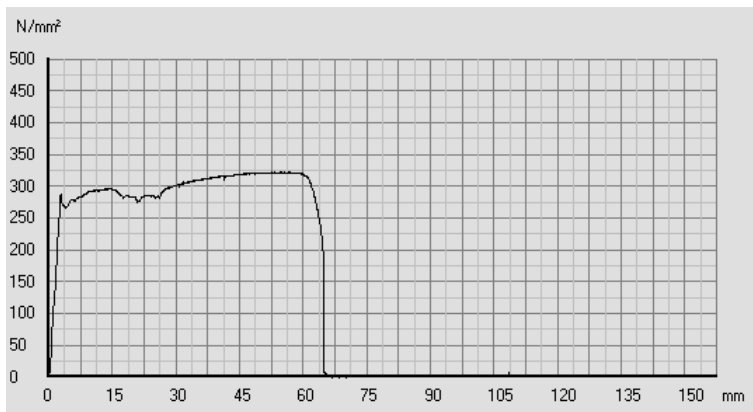
koe 46. Lt 400



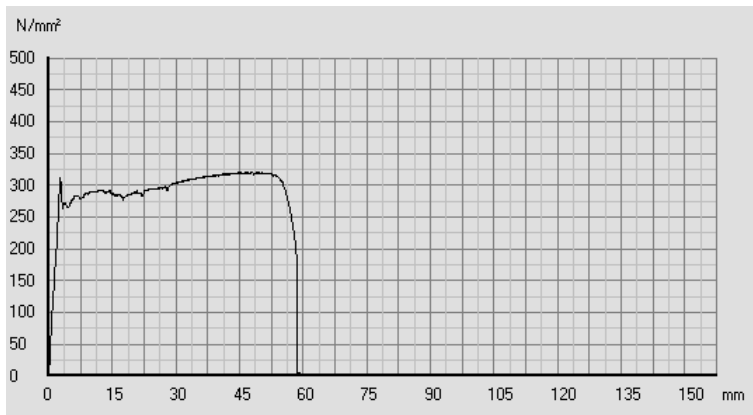
koe 47. Lt 400



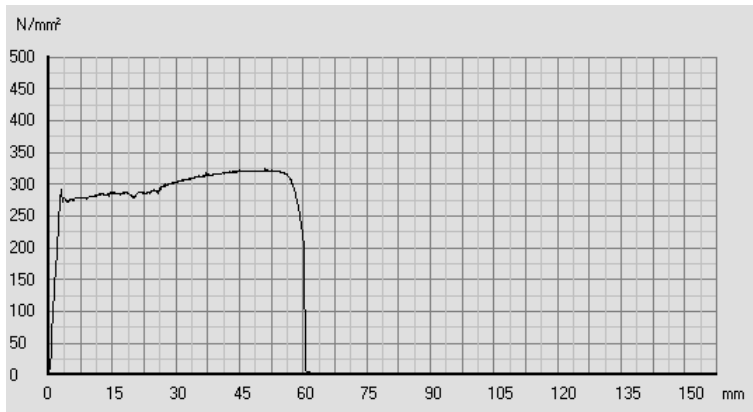
koe 48. Lt 400



koe 49. Lt 400



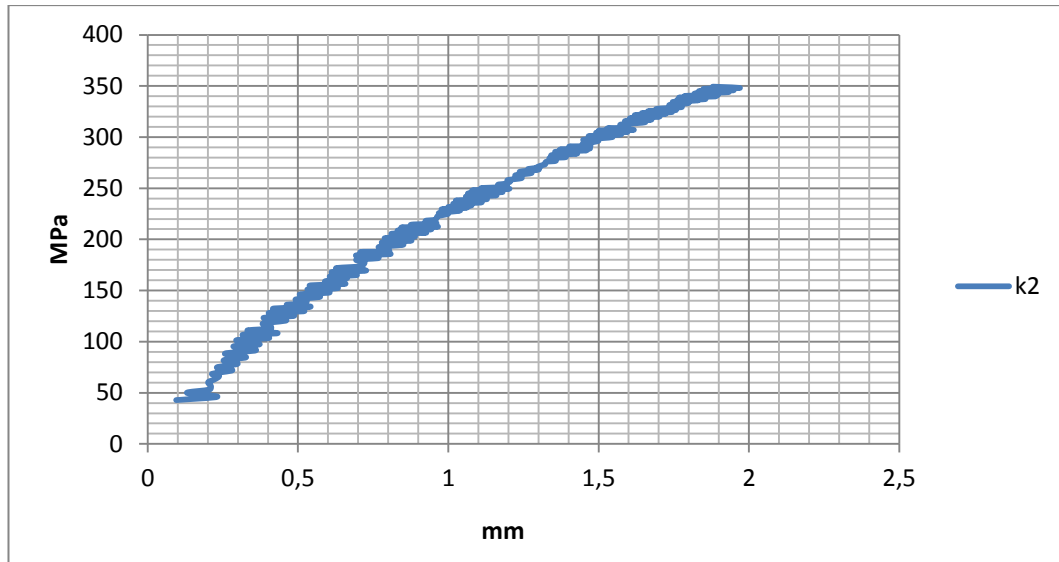
koe 50. Lt 400



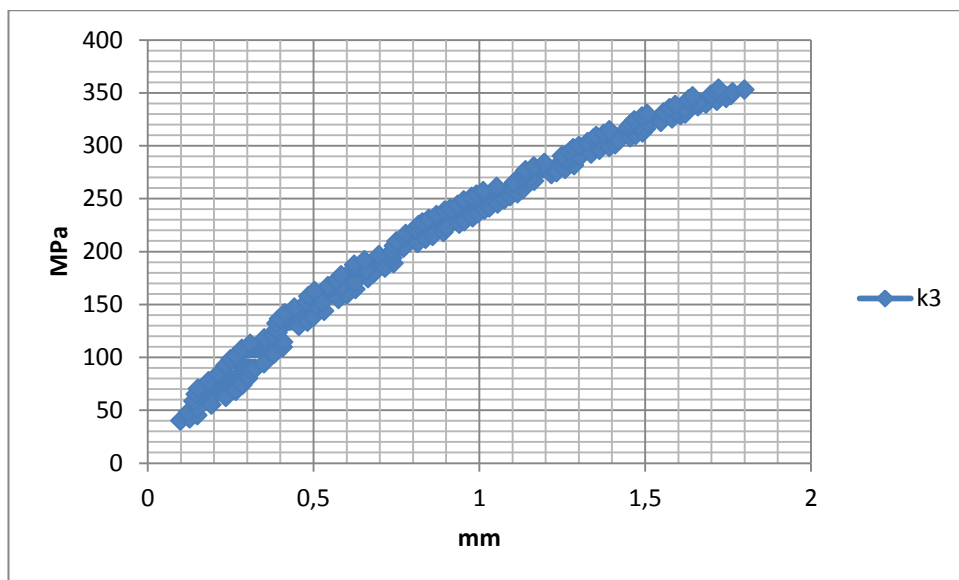
koe 51. Lt 400

VALURAUTASAU VAT

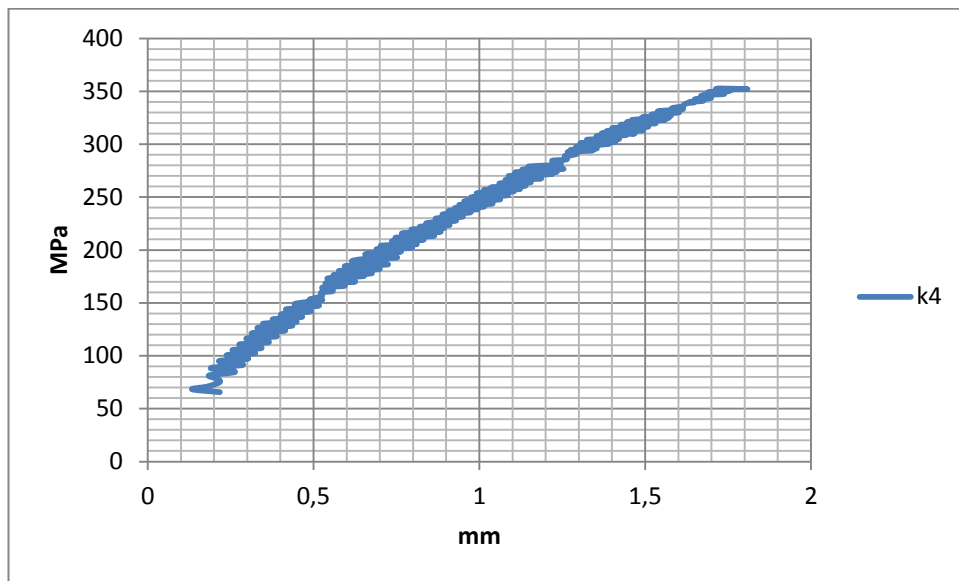
Koe-erä K



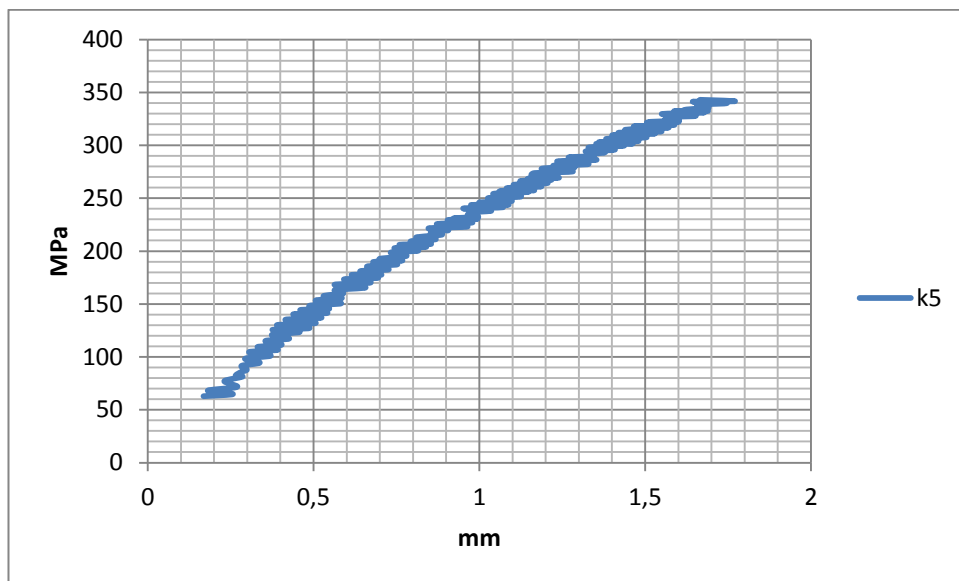
Koe K2.



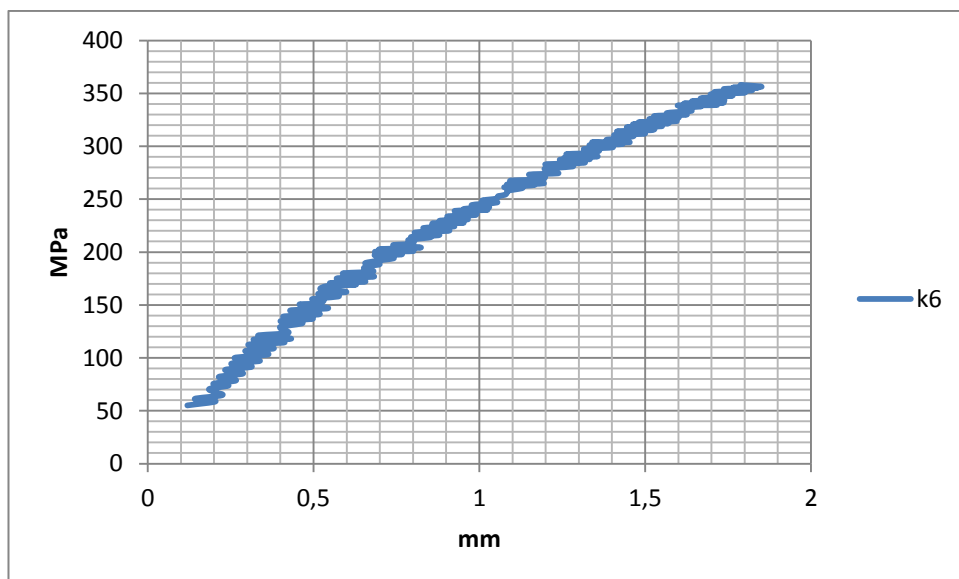
Koe K3.



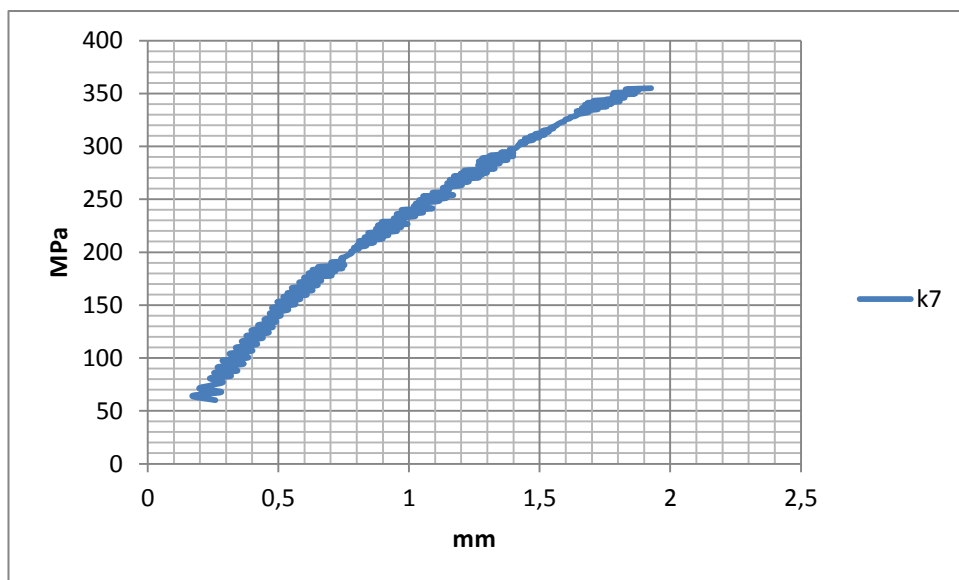
Koe K4.



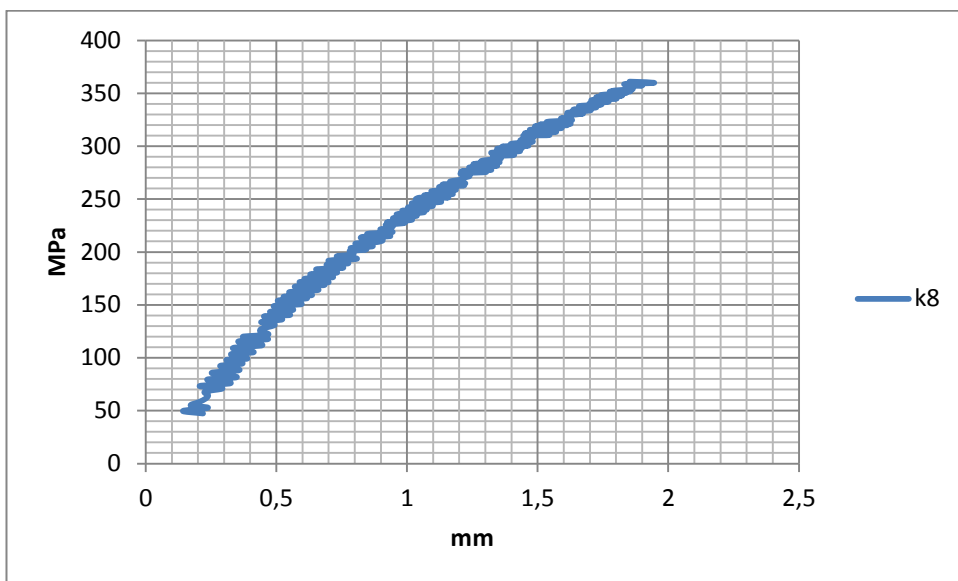
Koe K5.



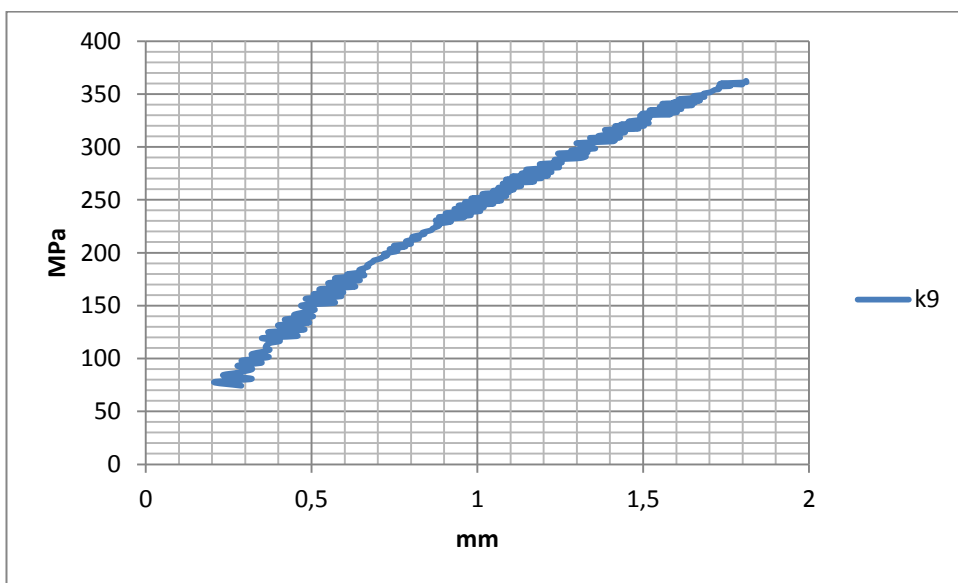
Koe K6.



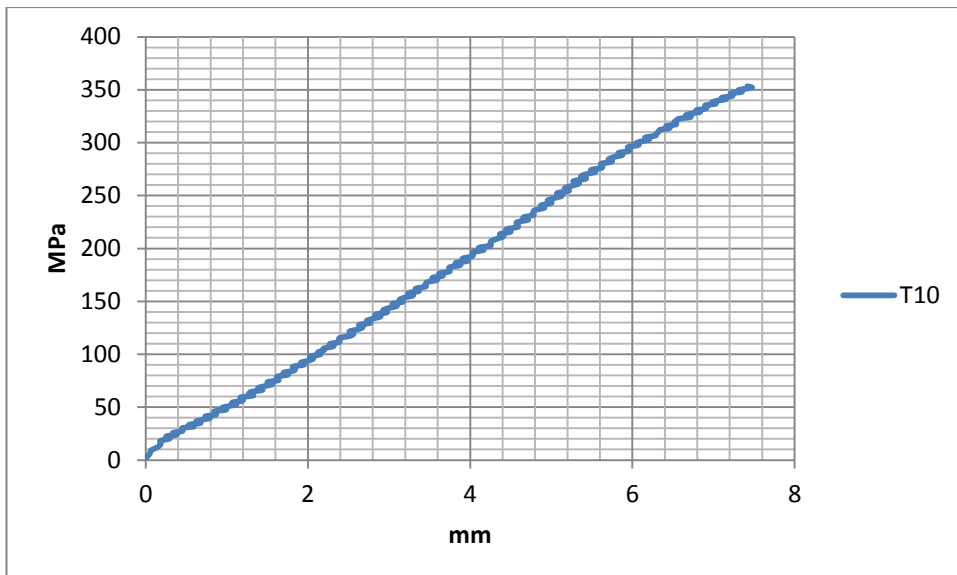
Koe K7.



Koe K8.

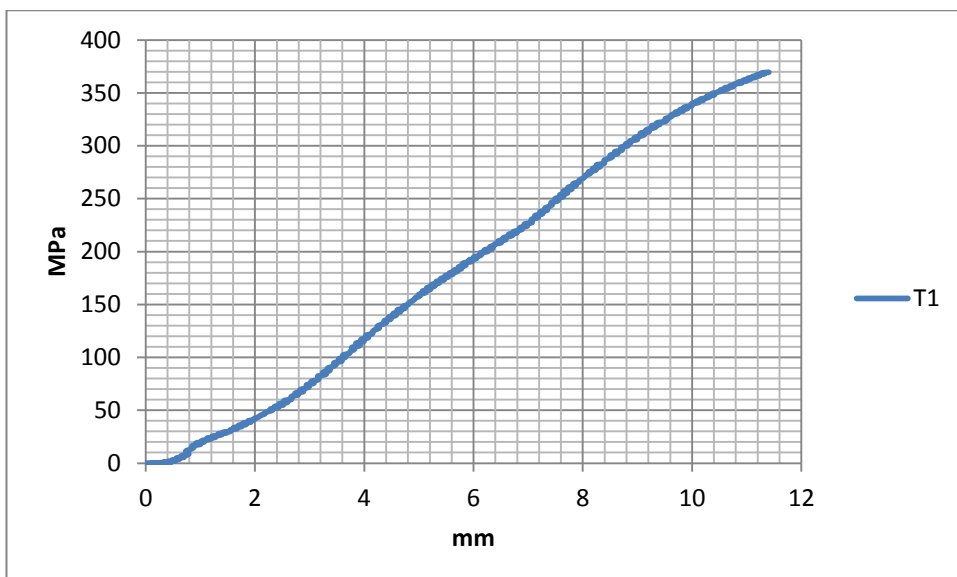


Koe K9.

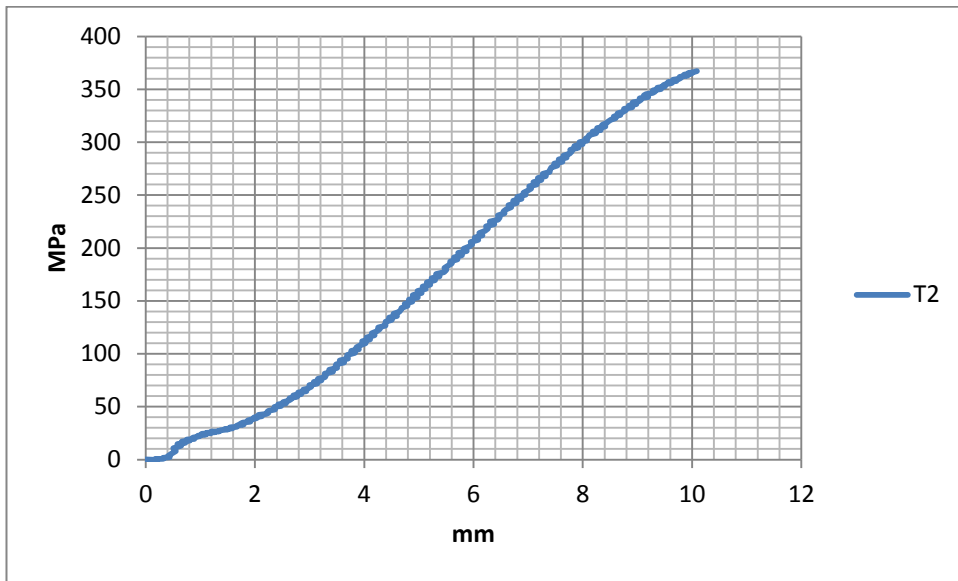


Koe K10.

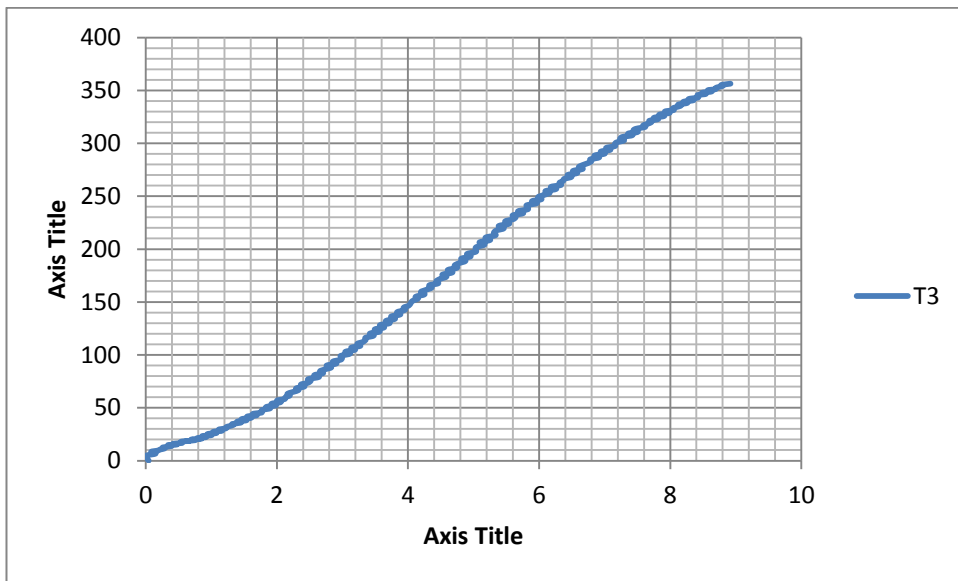
Koe-erä T



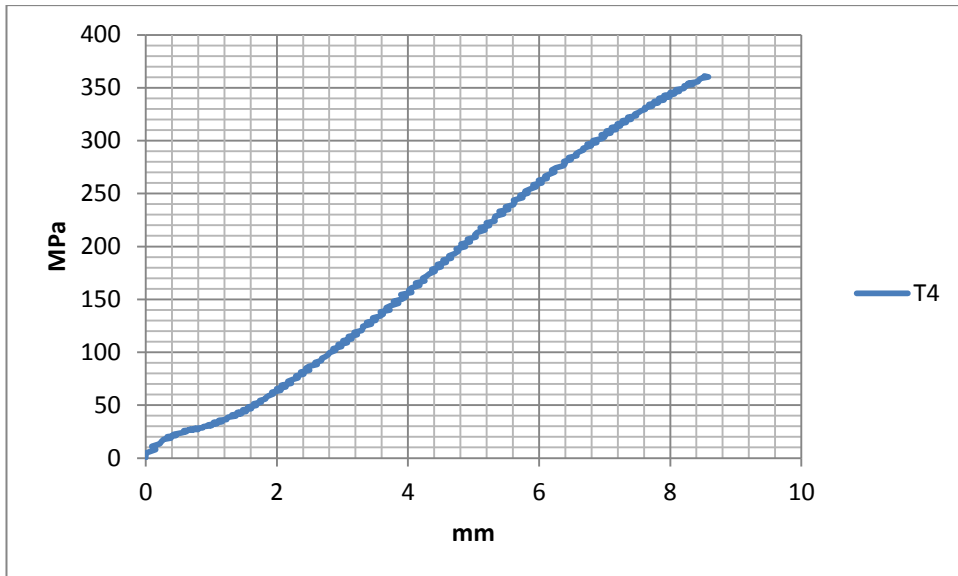
Koe T1.



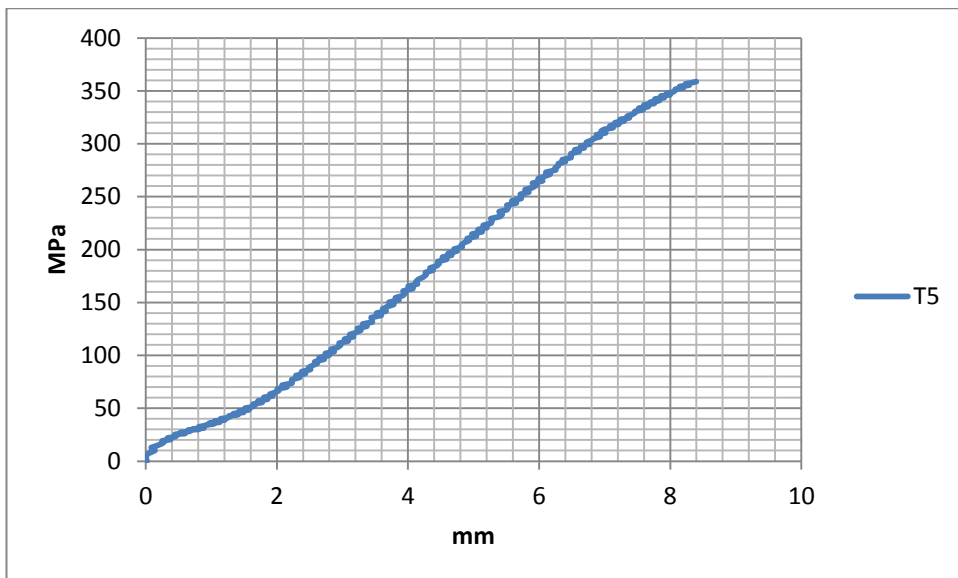
Koe T2.



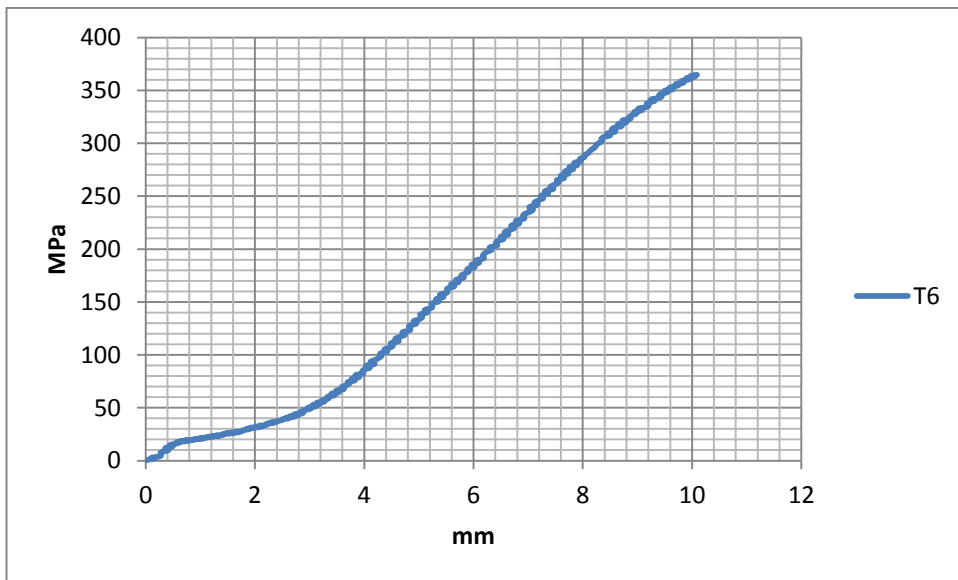
Koe T3.



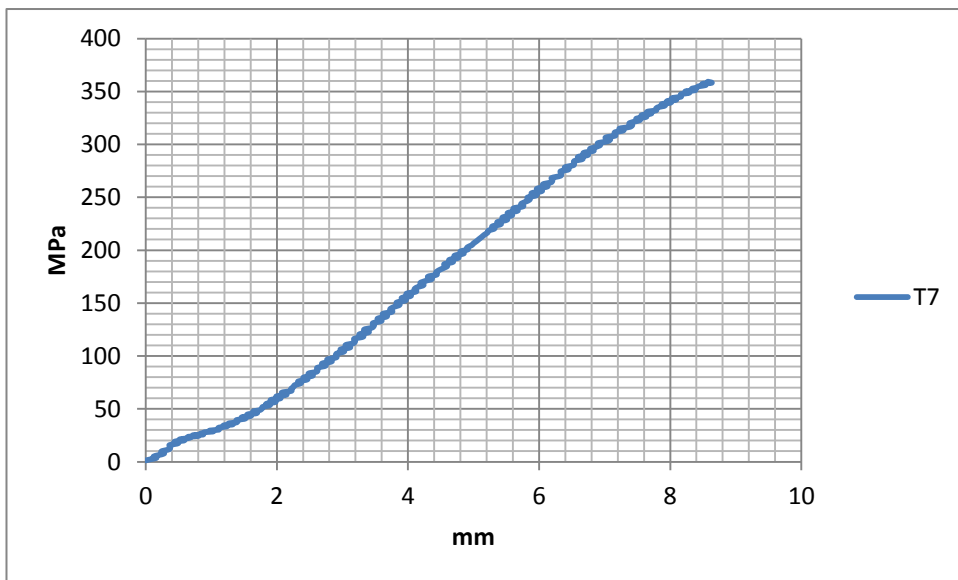
Koe T4.



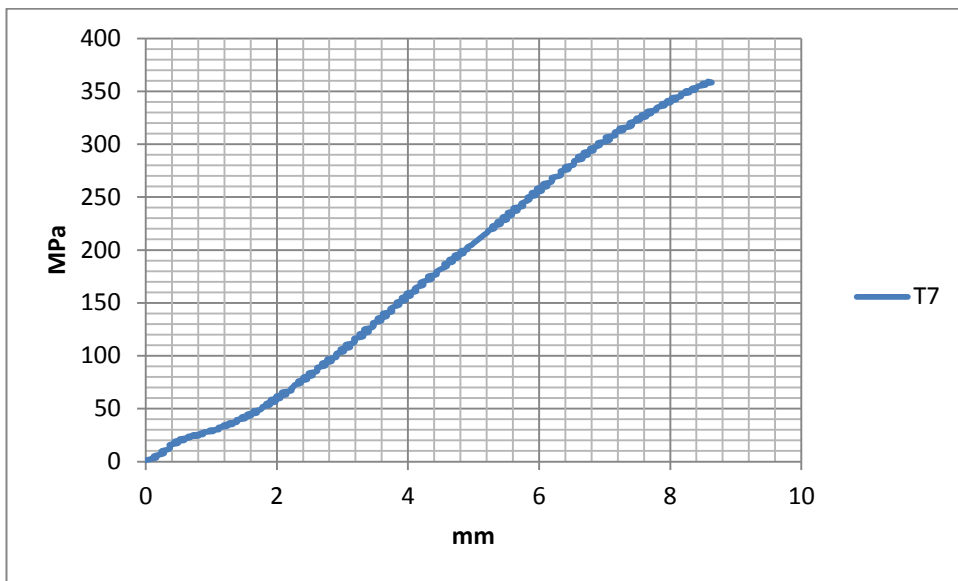
Koe T5.



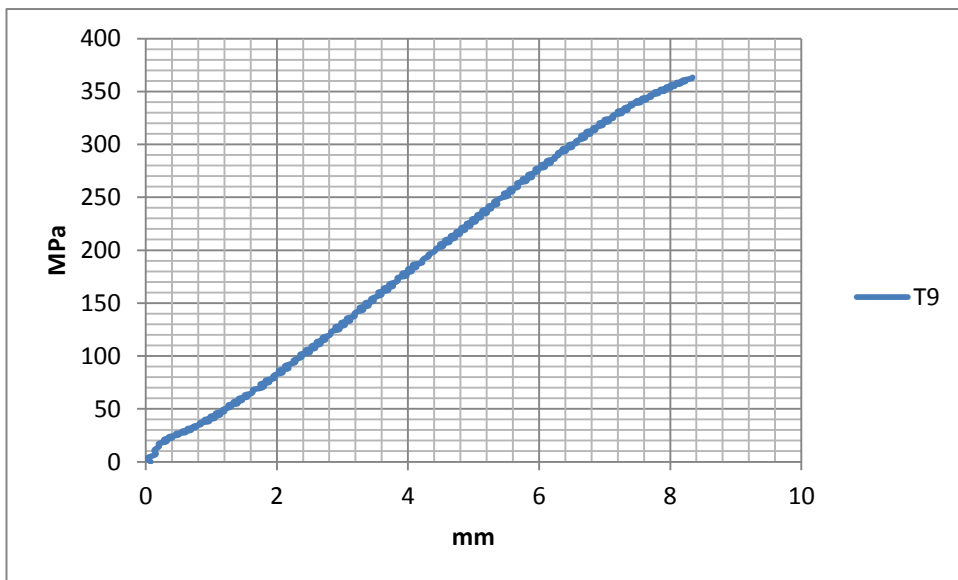
Koe T6.



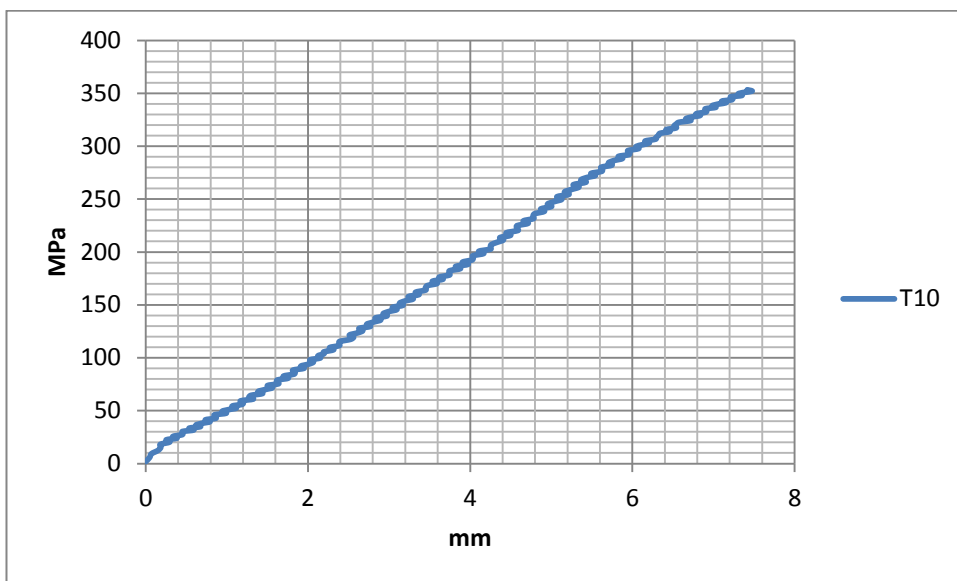
Koe T7.



Koe T8.



Koe T9.



Koe T10.

FEM analyysin tulokset taulukossa

Lt 400-sauva

Stress Analysis Report

Analyzed File:	10 x 10 Lc 50_laserleikkaus.ipt
Autodesk Inventor Version:	2013 SP2 (Build 170200200, 200)
Creation Date:	22.5.2015, 15:47
Simulation Author:	Autodesk_2013
Summary:	

☐ Force:1

Load Type	Force
Magnitude	36000,000 N
Vector X	36000,000 N
Vector Y	0,000 N
Vector Z	-0,000 N

☐ Result Summary

Name	Minimum	Maximum
Volume	33146,5 mm ³	
Mass	0,260863 kg	
Von Mises Stress	21,7272 MPa	436,789 MPa
1st Principal Stress	12,2917 MPa	445,77 MPa
3rd Principal Stress	-35,8037 MPa	56,4315 MPa
Displacement	0 mm	0,19793 mm
Safety Factor	0,538017 ul	10,8159 ul
Stress XX	0,368242 MPa	435,515 MPa
Stress XY	-13,7741 MPa	13,9464 MPa
Stress XZ	-123,368 MPa	122,7 MPa
Stress YY	-17,7558 MPa	56,5533 MPa
Stress YZ	-9,46272 MPa	8,42254 MPa
Stress ZZ	-35,8019 MPa	83,3654 MPa
X Displacement	0 mm	0,197908 mm
Y Displacement	-0,00300921 mm	0,00314853 mm
Z Displacement	-0,00395652 mm	0,00376587 mm
Equivalent Strain	0,0000941639 ul	0,00193356 ul
1st Principal Strain	0,00008958 ul	0,00220233 ul
3rd Principal Strain	-0,000658512 ul	-0,00000078403 ul
Strain XX	0,0000126737 ul	0,00214288 ul
Strain XY	-0,0000888432 ul	0,000089954 ul
Strain XZ	-0,000795721 ul	0,000791418 ul
Strain YY	-0,000618716 ul	0,0000000019922 ul
Strain YZ	-0,0000610345 ul	0,0000543254 ul
Strain ZZ	-0,000603153 ul	0,000175646 ul

☐ Material(s)

Name	Steel, Carbon	
General	Mass Density	7,87 g/cm ³
	Yield Strength	235 MPa
	Ultimate Tensile Strength	360 MPa
Stress	Young's Modulus	200 GPa
	Poisson's Ratio	0,29 ul
	Shear Modulus	77,5194 GPa
Stress Thermal	Expansion Coefficient	0,000012 ul/c
	Thermal Conductivity	52 W/(m K)
	Specific Heat	486 J/(kg c)
Part Name(s)	10 x 10 Lc 50_laserleikkaus	

☐ Physical

Material	Steel, Carbon
Density	7,87 g/cm ³
Mass	0,260863 kg
Area	10698,8 mm ²
Volume	33146,5 mm ³
Center of Gravity	x=-25 mm y=5 mm z=-5 mm

LC 50-sauva

Stress Analysis Report

Analyzed File:	10 x 10 Lc 50_laserleikkaus.ipt
Autodesk Inventor Version:	2013 SP2 (Build 170200200, 200)
Creation Date:	22.5.2015, 15:47
Simulation Author:	Autodesk_2013
Summary:	

☐ Result Summary

Name	Minimum	Maximum
Volume	33146,5 mm ³	
Mass	0,260863 kg	
Von Mises Stress	21,7272 MPa	436,789 MPa
1st Principal Stress	12,2917 MPa	445,77 MPa
3rd Principal Stress	-35,8037 MPa	56,4315 MPa
Displacement	0 mm	0,19793 mm
Safety Factor	0,538017 ul	10,8159 ul
Stress XX	0,368242 MPa	435,515 MPa
Stress XY	-13,7741 MPa	13,9464 MPa
Stress XZ	-123,368 MPa	122,7 MPa
Stress YY	-17,7558 MPa	56,5533 MPa
Stress YZ	-9,46272 MPa	8,42254 MPa
Stress ZZ	-35,8019 MPa	83,3654 MPa
X Displacement	0 mm	0,197908 mm
Y Displacement	-0,00300921 mm	0,00314853 mm
Z Displacement	-0,00395652 mm	0,00376587 mm
Equivalent Strain	0,0000941639 ul	0,00193356 ul
1st Principal Strain	0,00008958 ul	0,00220233 ul
3rd Principal Strain	-0,000658512 ul	-0,00000078403 ul
Strain XX	0,0000126737 ul	0,00214288 ul
Strain XY	-0,0000888432 ul	0,000089954 ul
Strain XZ	-0,000795721 ul	0,000791418 ul
Strain YY	-0,000618716 ul	0,0000000019922 ul
Strain YZ	-0,0000610345 ul	0,0000543254 ul
Strain ZZ	-0,000603153 ul	0,000175646 ul

Koonvaikutuskertoimet S235**ERÄ 1**

Ksize n

Lc 50

0,021

2,078

n	p	z	Aeff <mm ² >	Hajonta %
0,051	1,000	4,695	100	1,098
0,512	0,742	0,648	1000	1,013
1	0,500	0,000	1951,816	1,000
5,393	0,121	-1,172	10526,25	0,976
25,62	0,027	-1,932	50000	0,960
512,3	0,001	-3,000	1000000	0,938

. Ksize /Lc 50 pinta-alan mukaan, erä 1.

n on "lenkkien määrä"

p on vaurioitumisriski

z on vastaava norm. jakauman muuttuja

Aeff 1000 valittu vertailualaksi (koonvaikutus = 1)

Ksize n

0,034

3,434

n	p	z	Veff <mm ³ >	Hajonta %
0,021	1,000	7,689	100	1,264
0,416	0,811	0,882	1951,816	1,030
1	0,500	0,000	4693,589	1,000
5,46	0,119	-1,179	25625,471	0,960
2,131	0,278	-0,590	10000	0,980
213,1	0,003	-2,722	1000000	0,907

Ksize /Lc 50 tilavuuden mukaan, erä 1.

Lt 400

Ksize n

0,013

1,255

n	p	z	Aeff <mm ² >	Hajonta %
0,028	1,000	6,570	300	1,082
0,185	0,977	1,986	1951,816	1,025
1	0,500	0,000	10562,25	1,000
1,894	0,307	-0,506	20000	0,994
9,468	0,071	-1,471	100000	0,982
94,68	0,007	-2,442	1000000	0,969

Ksize/ Lt 400 pinta-alan mukaan, erä 1.

Ksize n

0,017

1,696

n	p	z	Veff <mm ³ >	Hajonta %
0,029	1,000	6,462	750	1,110
0,183	0,977	2,000	4693,589	1,034
1	0,500	0,000	25625,471	1,000
3,902	0,163	-0,983	100000	0,983
39,02	0,018	-2,106	1000000	0,964
390,2	0,002	-2,916	10000000	0,951

Ksize/ Lt 400 tilavuuden mukaan, erä 1.

ERÄ 2
Lc 50

Ksize n

0,020

1,963

n	p	z	Aeff <mm ² >	Hajonta %
0,05	1,000	4,782	100	1,094
0,099	0,999	3,112	200	1,061
1	0,500	0,000	2013,949	1,000
5,42	0,120	-1,175	10916,24	0,977
24,83	0,028	-1,918	50000	0,962
496,5	0,001	-2,990	1000000	0,941

Ksize /Lc 50 pinta-alan mukaan, erä 2.

Ksize n

0,021

2,074

n	p	z	Veff <mm ³ >	Hajonta %
0,02	1,000	7,906	100	1,164
0,202	0,967	1,844	1000	1,038
1	0,500	0,000	4940,061	1,000
5,488	0,119	-1,182	27110,42	0,975
10,12	0,066	-1,505	50000	0,969
202,4	0,003	-2,705	1000000	0,944

Ksize /Lc 50 tilavuuden mukaan, erä 2.

Lt 400

Ksize n

0,014

1,397

n	p	z	Aeff <mm ² >	Hajonta %
0,027	1,000	6,690	300	1,093
0,184	0,977	1,989	2013,949	1,028
1	0,500	0,000	10916,24	1,000
1,832	0,315	-0,482	20000	0,993
9,161	0,073	-1,455	100000	0,980
91,61	0,008	-2,431	1000000	0,966

Ksize/ Lt 400 pinta-alan mukaan, erä 2

Ksize n

0,017

1,696

Hajonta

n	p	z	Veff <mm ³ >	%
0,028	1,000	6,666	750	1,113
0,182	0,978	2,009	4940,061	1,034
1	0,500	0,000	27110,42	1,000
3,689	0,171	-0,949	100000	0,984
36,89	0,019	-2,083	1000000	0,965
368,9	0,002	-2,898	10000000	0,951

. Ksize/ Lt 400 tilavuuden mukaan, erä 2.

ERÄ 3

Lc 50

Ksize n

0,025

2,548

Hajonta

n	p	z	Aeff <mm ² >	Hajonta %
0,053	1,000	4,608	100	1,117
0,106	0,999	2,983	200	1,076
1	0,500	0,000	1890,943	1,000
5,472	0,119	-1,180	10347,69	0,970
26,44	0,026	-1,945	50000	0,950
528,8	0,001	-3,009	1000000	0,923

Ksize /Lc 50 pinta-alan mukaan, erä 3.

Ksize n

0,023

2,328

n	p	z	Veff <mm ³ >	Hajonta %
0,023	1,000	7,438	100	1,173
0,226	0,953	1,676	1000	1,039
1	0,500	0,000	4415,825	1,000
5,484	0,119	-1,181	24216,145	0,973
11,32	0,059	-1,560	50000	0,964
226,5	0,003	-2,742	1000000	0,936

Ksize /Lc 50 tilavuuden mukaan, erä 3.

Lt 400

Ksize n

0,013

1,327

n	p	z	Aeff <mm ² >	Hajonta %
0,029	1,000	6,495	300	1,086
0,183	0,977	2,004	1890,943	1,027
1	0,500	0,000	10347,69	1,000
1,933	0,301	-0,520	20000	0,993
9,664	0,069	-1,482	100000	0,980
96,64	0,007	-2,450	1000000	0,967

Ksize/ Lt 400 pinta-alan mukaan, erä 3.

Ksize n

0,018

1,753

Hajonta

n	p	z	Veff <mm ³ >	%
0,031	1,000	6,261	750	1,110
0,182	0,978	2,008	4415,825	1,035
1	0,500	0,000	24216,145	1,000
4,129	0,155	-1,017	100000	0,982
41,29	0,017	-2,129	1000000	0,963
412,9	0,002	-2,933	10000000	0,949

Ksize/ Lt 400 tilavuuden mukaan, erä 3

**VALURAUTASAUVAT
EN-GJL-350**

K sauvat

Ksize n					
					0,020
					1,974
n	p	z	Aeff <mm ² >	Hajonta %	
	0,071	1,000	3,865	100	1,076
	0,354	0,859	1,076	500	1,021
	1	0,500	0,000	1413,717	1,000
	8,889	0,075	-1,439	12566,37	0,972
	3537	0,000	-3,545	5000000	0,930
	70736	0,000	-4,269	100000000	0,916

Ksize/ K-sauva pinta-alan mukaan

Ksize					
					0,021
					2,062
n	p	z	Veff <mm ³ >	Hajonta %	
	0,057	1,000	4,420	200	1,091
	0,425	0,804	0,856	1500	1,018
	1	0,500	0,000	3525,658246	1,000
	17,83	0,038	-1,773	62863,30827	0,963
	141,8	0,005	-2,585	500000	0,947
	28363	0,000	-4,061	100000000	0,916

Ksize/ K-sauva tilavuuden mukaan

T sauvat

Ksize n

0,013

1,262

n	p	z	Aeff <mm ² >	Hajonta %
0,024	1,000	7,228	300	1,091
0,113	0,998	2,861	1413,717	1,036
1	0,500	0,000	12566,37	1,000
39,79	0,017	-2,114	500000	0,973
79,58	0,009	-2,379	1000000	0,970
7958	0,000	-3,754	100000000	0,953

Ksize/ T-sauva pinta-alan mukaan

Ksize n

0,013

1,262

n	p	z	Veff <mm ³ >	Hajonta %
0,024	1,000	7,230	1500	1,091
0,056	1,000	4,450	3525,658246	1,056
1	0,500	0,000	62863,30827	1,000
7,954	0,083	-1,382	500000	0,983
159,1	0,004	-2,624	10000000	0,967
15908	0,000	-3,924	1000000000	0,950

Ksize/ T-sauva tilavuuden mukaan