

F19400026

STUK-YTO-TR 63

# Pienillä taivutussauvoilla mitatun murtumissitkeyden pätevyys

**Kim Wallin, Rauno Rintamaa, Matti Valo**  
HELMIKUU 1994



**SÄTEILYTURVAKESKUS**  
Strålsäkerhetscentralen  
Finnish Centre for Radiation and  
Nuclear Safety

STUK-YTO-TR 63  
HELMIKUU 1994

# **Pienillä taivutussauvoilla mitatun murtumissitkeyden pätevyys**

**Kim Wallin, Rauno Rintamaa, Matti Valo**  
Valtion teknillinen tutkimuskeskus  
Metallilaboratio

Tutkimuksen johto Säteilyturvakeskuksessa  
**Rainer Rantala**

Tutkimus on tehty Säteilyturvakeskuksen tilauksesta.

**SÄTEILYTURVAKESKUS**  
PL 268, 00101 HELSINKI  
Puh. (90) 70821

**ISBN** 951-47-8859-1  
**ISSN** 0785-9325

**Painatuskeskus Oy**  
**Helsinki 1994**

*WALLIN Kim, RINTAMAA Rauno, VALO Matti (VTT). Pienillä taivutussauvoilla mitatun murtumissitkeyden pätevyys. STUK-YTO-TR 63. Helsinki 1994. 27 s.*

**ISBN** 951-47-8859-1

**ISSN** 0785-9325

**Avainsanat:** murtumissitkeys, pätevyys, haurasmurtuma, kokoeffekti

## TIIVISTELMÄ

Raportissa käsitellään pienellä taivutussauvalla mitatun murtumissitkeyden pätevyyttä verrattuna suurilla koesauvoilla mitattuun murtumissitkeyteen. Tutkimus perustuu todellisten kokeellisten tulosjoukkojen analysointiin ja vertailuun.

Koetulosten pohjalta voidaan todeta pienellä taivutussauvalla mitatun murtumissitkeyden pätevyys hyväksi, varsinkin jos tuloksia sovelletaan murtumissitkeystransitiolämpötilan  $T_0$  määrittämiseen. Tällöin pienten taivutussauvojen epäkonservatiivisuus on tyypillisesti alle 5 °C ja pahimmillaankin luokkaa 10 °C.

Loppupäätelmänä voidaan todeta pienten taivutussauvojen soveltuvan erinomaisesti murtumissitkeyden määrittämiseen haurasmurtuman tapauksessa edellyttäen, että tuloksille tehdään tilastollinen paksuuskorjaus.

*WALLIN Kim, RINTAMAA Rauno, VALO Matti (Technical Research Centre of Finland, VTT). Validity of fracture toughness determined with small bend specimens. STUK-YTO-TR 63. Helsinki 1994 27 pp.*

**ISBN** 951-47-8859-1

**ISSN** 0785-9325

**Keywords:** fracture toughness, validity, brittle fracture, size effect

## ABSTRACT

This report considers the validity of fracture toughness estimates obtained with small bend specimens in relation to fracture toughness estimates obtained with large specimens. The study is based upon the analysis and comparison of actual test results.

The results prove the validity of the fracture toughness determined based upon small bend specimens, especially when the results are only used to determine the fracture toughness transition temperature  $T_0$ . In this case the possible error is typically less than 5 °C and at most 10 °C.

It can be concluded that small bend specimens are very suitable for the estimation of fracture toughness in the case of brittle fracture, provided the results are corrected for statistical size effects.

## ALKUSANAT

Tämä selvitystyö on tehty VTT:n metallilaboratoriossa säteilyturvakeskuksen tilauksesta (A252-21/2). Selvitys on osa tutkimusohjelmaa "STUK:n rahoittama ydinvoimalaitosten turvallisuustutkimus 1993, rakenteellinen turvallisuus, reaktoripaineastian haurastuminen" ja se liittyy VTT:llä suoritettavaan ydinvoimalaitosten rakenteellisen turvallisuuden tutkimusohjelmaan.

Säteilyturvakeskuksen yhdyshenkilönä on toiminut ylitarkastaja Rainer Rantala.

# SISÄLLYSLUETTELO

	Sivu
TIIVISTELMÄ	
ABSTRACT	
ALKUSANAT	
1 JOHDANTO	7
2 TILASTOLLISET ANALYYSIMENETELMÄT	8
3 ELASTISPLASTISEN PARAMETRIN $K_{IC}$ PÄTEVYYS	10
4 SIVU-URIEN VAIKUTUS	12
5 KOKEELLISTEN TULOSTEN VERTAILU	14
5.1 Muiden tulokset	14
5.2 Omat tutkimukset	20
6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO	25
LÄHDELUETTELO	26

# 1 JOHDANTO

Säteilyseurantaohjelmissa käytetään murtumis-  
sitkeyden suoraan määrittämiseen yleensä  
pieniä  $10 \cdot 10 \cdot 55$  mm taivutussauvoja. Koesauva ei täytä standardien edellyttämää koko-  
vaatimusta lineaaris-elastisen  $K_{\kappa}$ -murtumissit-  
keyden määrittämiseksi. Suomessa suoritetuissa  
säteilyseurantaohjelmissa on käytetty kehiti-  
tyneempää elastis-plastiseen murtumismekaniikkaan  
perustuvaa ( $J$ -integraali pohjaista) para-  
metria  $K_{\kappa}$  yhdistettynä VTT:llä kehitettyyn  
sauvakokorjaukseen ja varmuuskertoimeen.  
Varmuuskerointa on sovellettu, koska yleinen  
uskomus on, että koesauvan liian pieni koko  
johtaa vääriin (liian suuriin) murtumissitkeysar-  
voihin. Jotta varmuuskertoimen poistaminen tai  
tarkistaminen olisi mahdollista, on ensiarvoisen  
tärkeää selvittää kvantitatiivisesti pienillä taivu-  
tussauvoilla mitatun murtumissitkeyden päte-  
vyys. Laskennallisilla analyyseillä on mahdol-  
lista verrata eri kokoisten koesauvojen jännitys-  
tilojen kuormitusriippuvuutta ja sitä kautta  
saada indikaatioita sauvakoon vaikutuksesta  
mitattuun murtumissitkeyteen /1/. Pelkkä jänni-  
tystilan tunteminen ei kuitenkaan riitä luotetta-  
vien kvantitatiivisten arvioiden saamiseksi.  
Tarvittaisiin lisäksi murtumismekanismien ja  
-tapahtuman yksityiskohtainen tuntemus. Las-  
kenta ja analyysit olisi lisäksi ulotettava käsittä-  
mään myös sitkeän särönkasvun vaikutus jänni-  
tystilaan ja murtumistapahtumaan. Tämän takia  
luotettavien kvantitatiivisten arvioiden saami-  
seksi eivät laskennalliset analyysit riitä, vaan  
tarkastelujen on pohjauduttava todellisten koe-  
tulosten analysointiin.

Koesauvan mittauskapasiteettia voidaan tar-  
kastella kahdelta eri kannalta. Voidaan tarkas-  
tella joko yksittäisen murtumissitkeysarvon  
pätevyyttä tai koko tulosaineiston pohjalta  
määritetyn transitiokäyrän pätevyyttä. Sätei-  
lyseurantaohjelmien kannalta jälkimmäinen  
tarkastelu on perusteltua, koska niissä määri-  
tetään kokonainen murtumissitkeyden transi-  
tiokäyrä ja sen säteilysiirtymä. Tämän takia  
tässä tutkimuksessa keskitytään ensisijaisesti  
pienillä koesauvoilla määritetyn murtumissit-  
keyden transitiokäyrän pätevyyden selvittä-  
miseen.

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää kvantita-  
tiivisesti säteilyseurantaohjelmissa mitattujen  
murtumissitkeysarvojen oikeellisuus todellisten  
koetulosten pohjalta, sekä kehittää tarvittaessa  
tarkennettu korjausmenetelmä, jolla murtumis-  
sitkeysarvojen oikeellisuus varmistetaan.

Tutkimus toteutetaan keräämällä olemassa  
olevat murtumissitkeystulokset, jotka käsittävät  
sekä pieniä että suuria koesauvoja. Koetulosten  
laatu tarkistetaan uusinta-analyysein ja tarkiste-  
tut tulokset analysoidaan VTT:llä kehitetyillä  
tilastollisilla menetelmillä. Tarkastellaan lisäksi  
relevanteja materiaaleja, joille on olemassa  
suurilla koesauvoilla mitatut murtumissitkeysar-  
vo ja tehdään näille Loviisan säteilyseuran-  
taohjelman mukaiset kokeet ja analyysit. Tällä  
halutaan varmistaa nimenomaan VTT:n koetu-  
lostien oikeellisuus. Kokeiden ja analyysien  
tulosten perusteella suoritetaan, mikäli tarpeel-  
lista, Loviisan murtumissitkeysarvojen uudelle-  
enarviointi koesauvan koon kannalta.



## 2 TILASTOLLISET ANALYYSIMENETELMÄT

VTT:llä on kehitetty tilastollinen haurasmurtumismalli, joka ennustaa murtumissitkeyden hajonnaksi /2/

$$P[K_{IC} \leq K_I] = 1 - \exp\left(-\left[\frac{K_I - K_{min}}{K_0 - K_{min}}\right]^4\right) \quad (1)$$

Kaavassa 1  $P[K_{IC} \leq K_I]$  on kumulatiivinen murtumistodennäköisyys,  $K_I$  on jännitysintensiiteettitekijä,  $K_{min}$  on murtumissitkeyden teoreettinen raja-arvo ja  $K_0$  on lämpötilasta ja sauvakoosta riippuvainen normalisointimurtumissitkeys, joka vastaa 63.2 % kumulatiivista murtumistodennäköisyyttä ollen arvoltaan suunnilleen  $1,1 \cdot \overline{K_{IC}}$  (murtumissitkeyden keskiarvo). Malli ennustaa tilastollisen kokoefektin, joka on muotoa /3/

$$K_{B_2} = K_{min} + [K_{B_1} - K_{min}] \cdot \left(\frac{B_1}{B_2}\right)^{1/4} \quad (2)$$

jossa  $B_1$  ja  $B_2$  vastaavat koisauvan paksuutta (särörintaman pituutta).

Mallin toimivuus on laajasti verifioitu kokeellisesti suurella määrällä materiaaleja mukaanlukien VVER 440 tyyppinen teräs ja vastaavat hitsit /4-7/. Kaavoja 1 ja 2 on sovellettu myös säteilyseurantatulosten analysoinnissa. Kaavan 2 pätevyys on osoitettu laajalla paksuusalueella (esim. VTT:llä 5...300 mm) eikä sen pätevyydelle ole havaittu paksuusrajoja. Myöskään teräksen lujuus ei näytä vaikuttavan kaavan pätevyYTEEN.

Ainoastaan murtumissitkeyden alatasanteella ( $K_{IC} \ll 50 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ) kaavat saattavat olla epätarkkoja. Malli perustuu oletukseen, että

haurasmurtuminen on ensisijaisesti "ydintymisen" kontrolloima, vaikka se sisältääkin myös ehdollisen särön "etenemis"-kriteerin, joka muun muassa on syynä murtumissitkeyden raja-arvoon  $K_{min}$ . Alatasanteella ydintymiskriteeri ei enää ole määräävä, vaan haurasmurtuminen on pelkästään etenemisen kontrolloima. Tällöin tilastollista kokoefektia (kaava 2) ei esiinny, ja murtumissitkeyden hajontakin poikkeaa jonkin verran (ei kovin merkittävästi) kaavan 1 mukaisesta käyttäytymisestä /8/. Säteilyselurantaohjelmissä määritetään murtumissitkeys kuitenkin ennen kaikkea hauras-sitkeä transiioalueella, jossa kaavojen 1 ja 2 pätevyys on osoitettu.

Murtumissitkeyden lämpötilariippuvuutta on säteilyseurantaohjelmissä kuvattu kaavalla /9,19/

$$K_0 = 31 + 77 \cdot \exp(0.019 \cdot [T - T_0]) \quad (3)$$

jossa  $T_0$  on transioliämpötila, jossa murtumissitkeyden keskiarvo 25 mm paksulla koisauvala on  $100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  ja  $K_0$  on  $108 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ .

Kaava 3 antaa keskimääräisen kuvauksen ferriittisten terästen murtumissitkeyden lämpötilariippuvuudelle ja se on kohtalaisen kattavasti verifioitu. Lämpötilariippuvuuden pitäminen vakiona vähentää mahdollisten epäpätevien murtumissitkeysarvojen vaikutusta määritettävään transioliämpötilaan  $T_0$ .

Yleensä yksittäiset koetulokset sovitetaan suoraan kaavojen 1...3 yhdistelmällä. Tämä on mahdollista silloin, kun yhdessäkään mukaan tulevassa lämpötilassa ei esiinny koetuloksia, joista osa ei ole murtunut hauraasti. Tulostulosten joukossa, joissa esiintyy osittain sitkeitä tuloksia,

analysointi on vaikeampaa ja edellyttää normalisointiparametrin  $K_0$  (kaava 1) määrittämisen kullekin lämpötilalle erikseen. Suurimman todennäköisyyden estimaatti "sensuroidulle" tulosjoukolle on muotoa [11]

$$K_0 = \left( \frac{\sum_{i=1}^r (K_{xc_i} - K_{min})^4 + (n-r) \cdot (K_{xc_r} - K_{min})^4}{r-1 + \ln(2)} \right)^{1/4} + K_{min} \quad (4)$$

jossa  $n$  on tulosten kokonaismäärä ja  $r$  on yhtä kun pätevien, sovitukseen osallistuvien, koetulosten lukumäärä. Suurimman todennäköisyyden menetelmä (Maximum Likelihood) on tilastollinen estimointi menetelmä joka luonteeltaan muistuttaa pienimmän neliösumman menetelmää, mutta soveltuu paremmin todennäköisyysjakaumien arviointiin.

### 3 ELASTISPLASTISEN PARAMETRIN $K_{JC}$ PÄTEVYYS

Pienillä koesauvoilla ei voida välttää sauvan jonkinasteista plastisoitumista. Tämän takia ei voida soveltaa lineaaris-elastiseen murtumismekaniikkaan pohjautuvaa  $K_{IC}$ :tä, vaan on käytettävä elastis-plastista ekvivalenttia parametria kuten J-integraaliin perustuva  $K_{JC}$ , joka saadaan kaavasta

$$K_{JC} = \sqrt{\frac{J \cdot E}{(1-\nu)^2}} \quad (5)$$

jossa J on standardikaavoilla määritetty J-integraali, E on kimmokerroin ja  $\nu$  on Poissonin vakio.

Parametrin  $K_{JC}$  pätevyyttä kuvaamaan  $K_{IC}$ :tä on usein kyseenalaistettu perustuen oletukseen, että ainoastaan  $K_{IC}$  edustaa täyttä tasomuodonmuutostilaa kappaleessa. Tasomuodonmuutostilan määritelmä  $K_{IC}$ :lle ei itse asiassa perustu varsinaiseen jännitystilaan. Materiaalit, joiden pohjalta  $K_{IC}$  -standardi kehitettiin, murtuivat kaikki sitkeällä mekanismilla. Näillä materiaaleilla suurempi sauvakoko johtaa suurempaan murtumissitkeyden arvoon, koska suuremmissa koesauvassa  $K_{IC}$  vastaa suurempaa särönkasvua. Tasomuodonmuutostila määriteltiin sen mukaan milloin mitattu murtumissitkeys tuli suunnilleen sauvakoosta riippumattomaksi. Näin määritellyt  $K_{IC}$  arvot edustavat itse asiassa materiaalin maksimi arvoa, eikä minimi arvoa kuten klassisesti oletetaan. Kun  $K_{IC}$  standardia alettiin soveltaa materiaaleille, joissa esiintyy haurasmurtuma tasomuodonmuutosmääritelmän oletettiin vastaavan klassista määritelmää maksimaalisesta jännitystilasta. Todellisuudessa

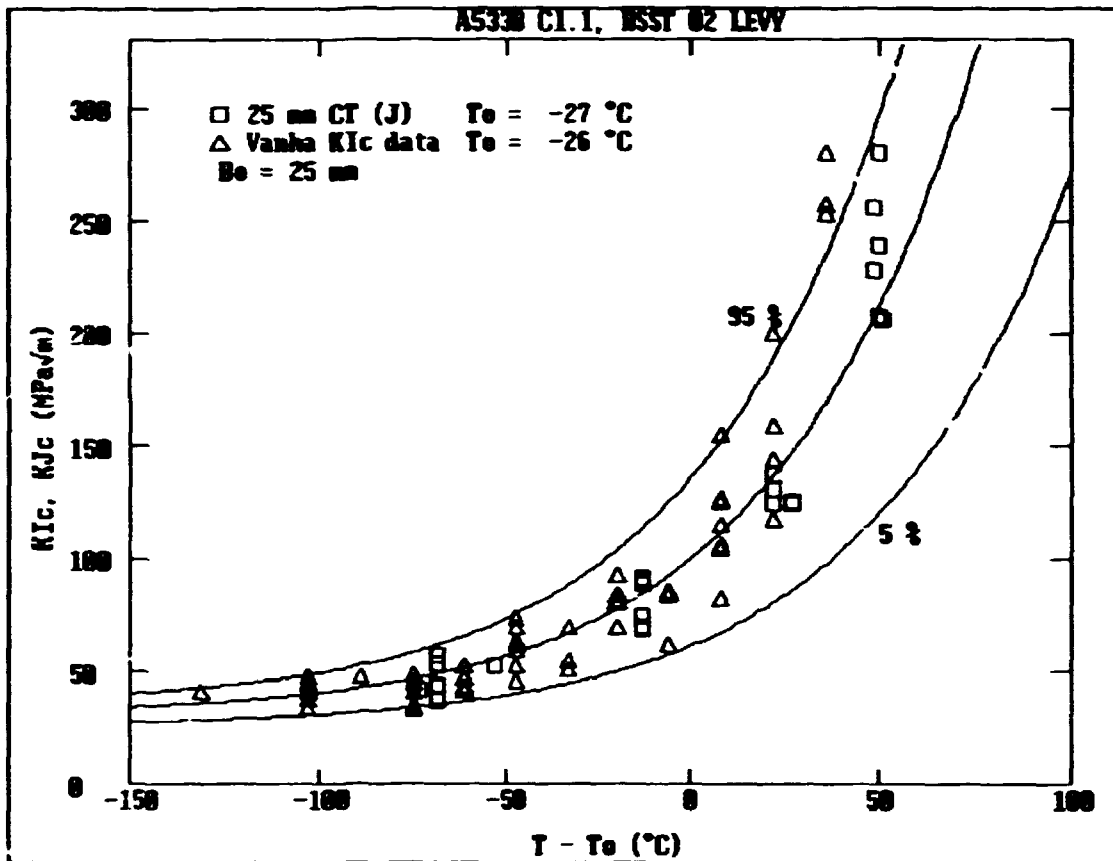
tasomuodonmuutostila voi särön kärjessä esiintyä huomattavasti pienemmillä koesauvoilla kuin mitä  $K_{IC}$  standardi indikoi.

Elastis-plastisen parametrin pätevyys on VTT:llä osoitettu muun muassa epäsuorasti Charpy-V -  $K_{IC}$  -korrelaation avulla [12]. On osoitettu että molemmat parametri: ( $K_{IC}$  ja  $K_{JC}$ ) antavat saman korrelaation Charpy-V -iskukokeen kanssa. Näin ollen on osoitettu että parametrit ovat ekvivalentteja ja siis päteviä kuvaamaan toisiaan. Korrelaatio ei sovellu hyvin kaikille materiaaleille, mutta se ei vaikuta elastis-plastis parametrin pätevyteen. Elastis-plastisen parametrin pätevyys on myös verifioitu suoraan vertaamalla  $K_{IC}$  ja  $K_{JC}$  tuloksia keskenään (kuva 1) [10].

Kuvassa 1 on HSST 02 levyille vertailtu erikoisilla sauvoilla mitattuja päteviä  $K_{IC}$  arvoja, 25 mm paksuilla sauvoilla mitattuihin  $K_{JC}$  arvoihin [10]. Koetuioksille on tehty kaavan 2 mukainen paksuuskorjaus. Nähdään, että molemmat parametrit antavat täysin ekvivalentin tuloksen.

Periaatteessa murtumismekaaninen parametri on pätevä, mikäli se kuvaa särön edessä olevaa jännitys- ja venymätilaa. Elastis-plastinen parametri on siis yhtä pätevä kuin lineaaris-elastinen parametri niin kauan, kun se kuvaa särön edessä olevaa jännitys- ja venymätilaa oikein.

Pienillä koesauvoilla on pienempi mittauskapasiteetti kuin suurilla sauvoilla, mutta itse parametri  $K_{JC}$  sinänsä on aivan yhtä pätevä kuin  $K_{IC}$ .



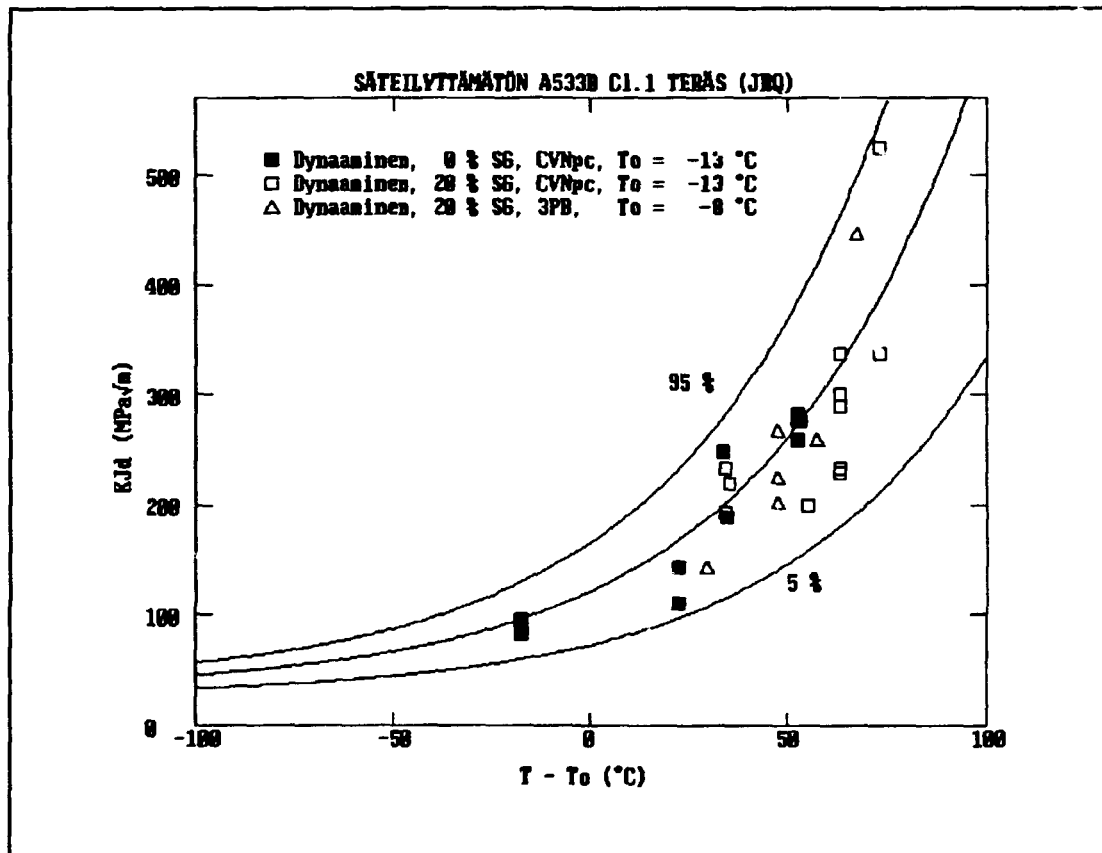
Kuva 1. Elastis-plastisten  $K_{IC}$  ja lineaaris-elastisten  $K_{IC}$  tulosten vertailu paineastiateräkselle A533B Cl.1 (HSST 02 levy) /10/.

## 4 SIVU-URIEN VAIKUTUS

Säteilyseurantaohjelmissä käytetyissä pienissä koesauvoissa on yleensä sivu-urat ( $\approx 20\%$ ), joilla pyritään voimistamaan särötasossa vallitsevaa kolmiaksaalista jännitystilaa. Numeeristen analyysien perusteella sivu-urilla ei pitäisi olla suurtakaan vaikutusta murtumissitkeysarvoon /1/. Toisaalta sivu-urat nostavat jonkin verran jännityksiä särön edessä ja sitä kautta ne pyrkivät helpottamaan haurasmurtumista, mutta tämä kompensoituu suurelta osin koesauvan pienemmällä tehollisella paksuudella, joka tilastollisen efektin (kaava 2) takia pyrkii vaikeuttamaan haurasmurtumista /3/. Kokeellisesti sivu-urien vaikutusta murtumissitkeyteen on tutkittu kohtalaisen paljon. Kuvassa 2 on esimerkkinä esitetty VTT:llä tehty vertailu, käyttäen nimenomaan säteilyseurantaohjelmissä käytettävää koesauvatyyppiä. Nähdään, että sivu-urilla ei ole havaittavaa vaikutusta murtu-

missitkeyteen koko transiitioalueella. Havaittu tulos on yhtäpitävä muitten tutkimusten kanssa. Kuvassa 2 on myös esitetty samanpaksuisilla suuremmilla 3-pistetaivutussauvoilla saatuja koetuloksia, jotka nekin antavat  $5\text{ }^\circ\text{C}$  tarkkuudella saman tuloksen kuin pienemmät sauvat.

Kokeellisten havaintojen pohjalta voidaan todeta sivu-urien vaikutuksen haurasmurtumaan olevan minimaalinen. Sivu-urien vaikutus on selkeä ainoastaan sitkeän murtumisen tapauksessa, jossa sivu-urat edesauttavat pitämään särön suorana. Sitkeän murtumisen tapauksessa sivu-urilla on taipumus alentaa murtumisvastusta. Vaikutus kohdistuu ennenkaikkea särönkasvuun. Särönkasvun ydintymisen tapauksessa sivu-urien vaikutus on sitkeän murtumankin tapauksessa vähäistä.



*Kuva 2. Sivu-urallisten ja sivu-urattomien koesauvojen dynaamisen murtumissitkeyden vertailu paineastiateräksellä A533B Cl.1 (JRQ).*

## 5 KOKEELLISTEN TULOSTEN VERTAILU

### 5.1 Muiden tulokset

Kirjallisuudesta löytyy suhteellisen paljon murtumissitkeystuloksia, jotka on määritetty eri suuruisilla koesauvoilla. Luonteenomaista tuloksille on, että suuria koesauvoja vastaavia koetuloksia on huomattavasti vähemmän kuin pieniä koesauvoja vastaavia. Koska tutkimuksen tavoitteena on määrittää erityisesti pienten säteilyseurantaohjelmissä käytettyjen koesauvojen mittauskapasiteetti, vertailuun on otettu mukaan vain tulosjoukot, jotka sisältävät myös pieniä koesauvoja (10 mm...12.5 mm) ja joiden materiaalien myötölujuus on välillä 400...700 MPa. Yleensä tulosten  $K_0$  arvot on määritetty standardikaavoin. Mahdolliset parametrin määrittävistä johtuvat koetulosten poikkeamat ovat arviolta korkeintaan 10 % luokkaa.

Ensimmäisen suuren murtumissitkeystulosjoukon generoi Japanilainen Iwadata, joka testasi teräksiä A508 ja A470 /13/. Teräkset ovat takeita jotka edustavat niiden sen aikaista normaalisitkeyttä. Hänen koesauvapaksuutensa vaihteli välillä 12.5 mm...100 mm. Koetulokset on otettu referenssin /13/ kuvista, raakadataa ei ole ollut saatavilla, eikä sauvojen irroituspaikka ole tiedossa. Kaavalla 2 korjatut tulokset on esitetty kuvissa 3 ja 4.

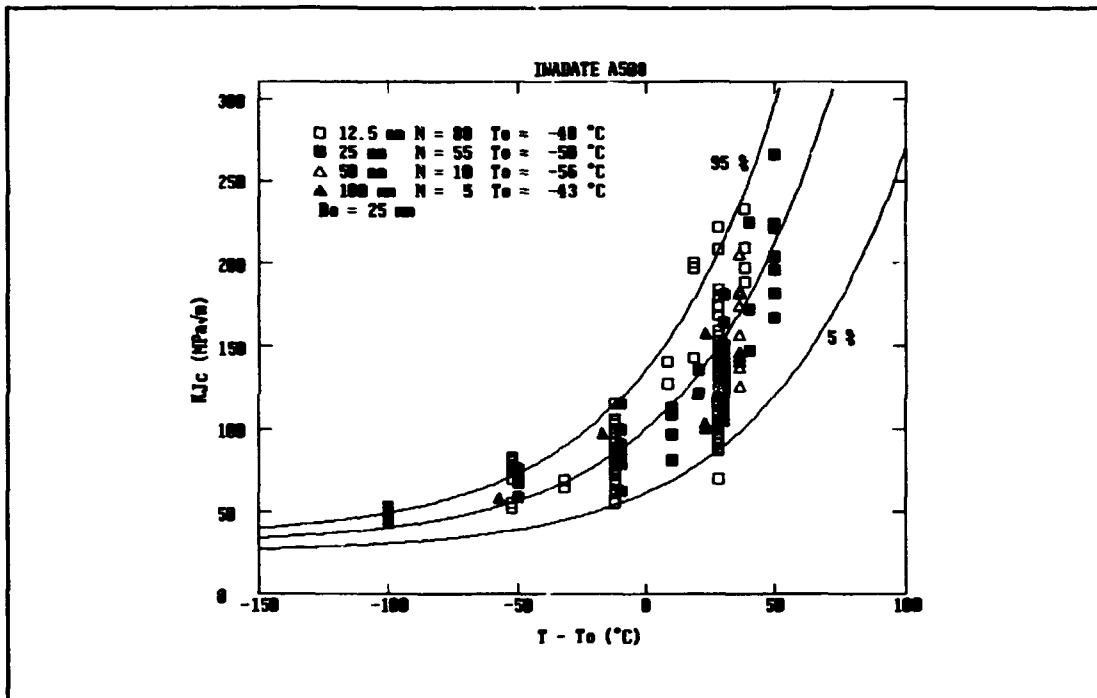
Molemmilla materiaaleilla, sauvapaksuutta 50 mm lukuunottamatta, kaavan 2 soveltaminen riittää saattamaan tuloksiin tehdyt lämpötilasovitukset 7 °C tarkkuudella samoiksi. Molemmilla materiaaleilla 50 mm paksut koesauvat antavat systemaattisesti suurempia murtumissitkeyden arvoja. Syynä tähän on todennäköisesti jokin kokeen suorituksessa tai sauvan valmistuksessa tehty virhe. Ei ole uskottavaa, että nimenomaan 50 mm paksujen sauvojen jännitystila/mittauskapasiteetti olisi alempi kuin pienempien sauvojen.

Osassa koesauvoista oli sivu-urat (25 %), mutta niiden murtumissitkeys ei havaittavasti poikennut sivu-urattomista sauvoista /13/.

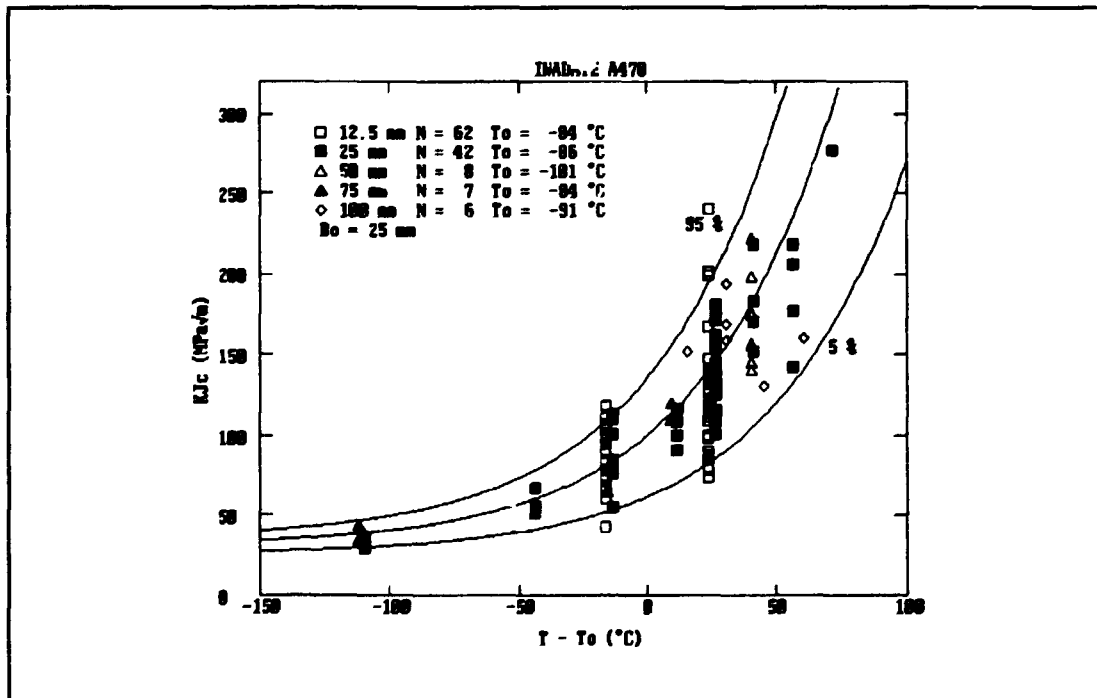
Pienten 12.5 mm paksujen CT-sauvojen mittauskapasiteetti näillä teräksillä näyttää tulosten perusteella olevan selvästi parempi kuin 150 MPa√m.

Kuvassa 5 (s. 16) on esitetty eräs suurimmista eri kokoisia sauvoja sisältävistä tulosjoukoista /14/. Materiaalina on puhdas nykyaikainen A533B Cl. 1 teräs. Sauvakoko vaihtelee välillä 10 · 10... 230 · 230 mm. Kaikki koesauvat irroitettiin siten että särön kärki oli samassa kohtaa levyn keskellä. Uusinta-analyysi perustuu raakadataan. Eri sauvakoot antavat saman transitiolämpötilan 3 °C tarkkuudella. Tämän tuloksen mukaan 10 mm sauvojen mittauskapasiteetti olisi luokkaa 200 MPa√m. Kuvassa 5 ei ole sisällytetty tapauksia (testauslämpötiloja), joissa osa kokeista on lopetettu ennen kuin on saavutettu haurasmurtuma.

Kun kaavalla 4 analysoidaan kaikki tulokset ja määritetään kaavalla 2 korjattu  $K_0$  saadaan kuvan 6 (s. 16) mukainen tulos. Analyysiin sisällytettiin kaikki tapaukset (lämpötilat), joissa  $n > 3$ . Havaitaan, että eri koesauvojen mukaiset erot kasvavat hieman. Jos 230 mm vastaavat tulokset jätetään huomiotta, ovat tulokset kuitenkin edelleen 5 °C tarkkuudella samat. Suurimmilla sauvoilla testaus on valitettavasti suoritettu lämpötiloissa, joissa sitkeän särön kasvun määrä alkaa olla huomattava. Teoriassa sitkeällä särönkasvulla on haurasmurtumaa helpottava vaikutus /15, 16/, joten tältä osin suurimpien sauvojen (230 · 230 mm) hieman korkeampi transitiolämpötila ei ole yllätys. Vertailujen luotettavuutta heikentää jonkin verran se, että suuret koesauvat useim

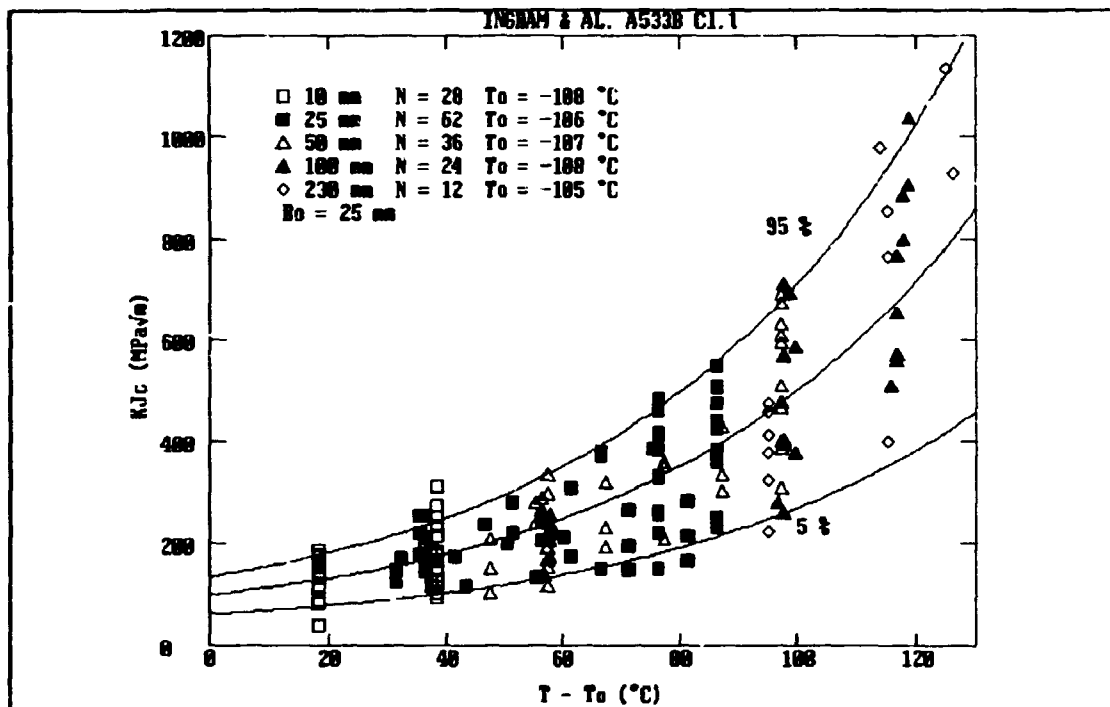


Kuva 3. Teräksen A508 murtumissitkeyden sauvakokovertailu lämpötilan funktiona /13/. Tulokset korjattu kaavalla 2.

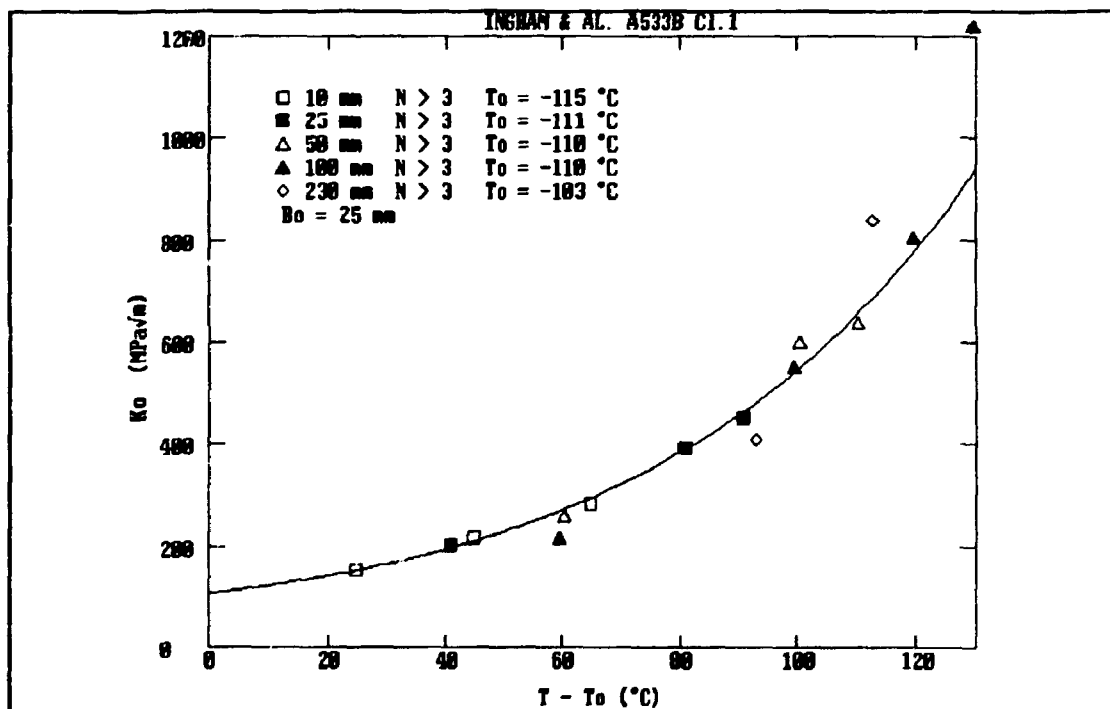


Kuva 4. Teräksen A470 murtumissitkeyden sauvakokovertailu lämpötilan funktiona /13/. Tulokset korjattu kaavalla 2.





Kuva 5. Teräksen A533B Cl. 1 murtumissikeyden sauvakokovertailu lämpötilan funktiona /14/. Tulokset korjattu kaavalla 2.



Kuva 6. Teräksen A533B Cl. 1 murtumissikeyden sauvakokovertailu lämpötilan funktiona.  $K_0$  on laskettu kaavalla 4 ja korjattu paksuuden suhteen kaavalla 2.

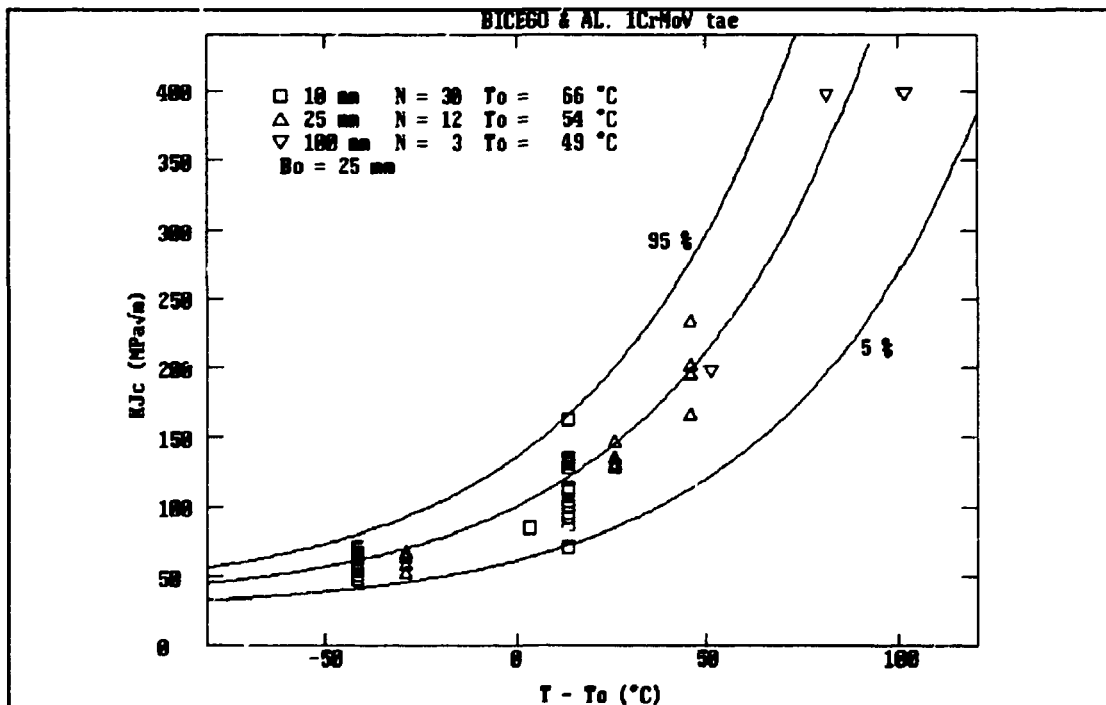
miten testataan korkeammassa lämpötilassa kuin pienet. Tällöin tulokseen vaikuttaa kaavan 3 tarkkuus lämpötilariippuvuuden kuvaamisessa.

Uusin kirjallisuudesta löydettävä tulosjoukko on Italialainen /17/. Siinä materiaalina on 1CrMoV tae ja sauvatyypit ovat 10 mm, 25 mm ja 100 mm CT-sauvoja. Ominaisuuksiltaan teräs vastaa haurastettua paineastiaterästä. Uusinta-analyysi perustui taulukoituihin raakadatoihin. Tulokset, joista on jätetty pois tapaus (lämpötila), jossa vain osa tuloksista on ilmoitettu, on esitetty kuvassa 7. Huomionarvoista tälle tulosjoukolle on, että pienimmät koesauvat antavat konservatiivisimman estimaatin transioliämpötilalle.

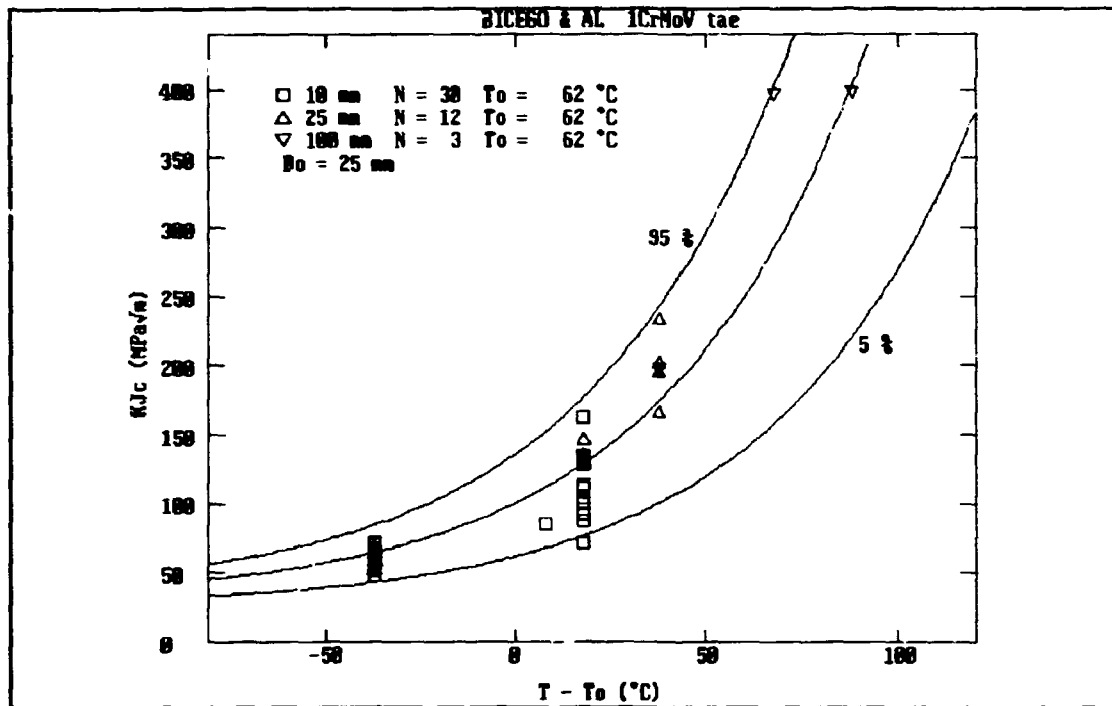
Syynä tähän saattaa kylläkin olla makroskooppinen materiaaliepähomogeenisuus. Materiaali edustaa korkeapainepuolen turbiiniroottoria, jota ei oltu otettu käyttöön siinä ilmenneiden

vikojen takia. Näin massiivisella kappaleella esiintyy pakostakin makroskooppista epähomogeenisuutta sitkeysominaisuuksissa. Valitettavasti ei sauvojen irroituspaiosta eikä -suunnasta ole tietoa. On myös huomattava, että 100 mm paksuja koesauvoja testattiin ainoastaan 3 kappaletta, minkä takia transioliämpötilaestimaatti ei ole kovinkaan tarkka (estimaatin teoreettinen keskihajonta  $\approx 14$  °C). Kuvassa 8 (s. 18) kaikille koetuloksille on määritelty sama transioliämpötila ( $T_0 = 62$  °C). Kaikki tulokset mahtuvat teoreettisten hajontarajojen sisään.

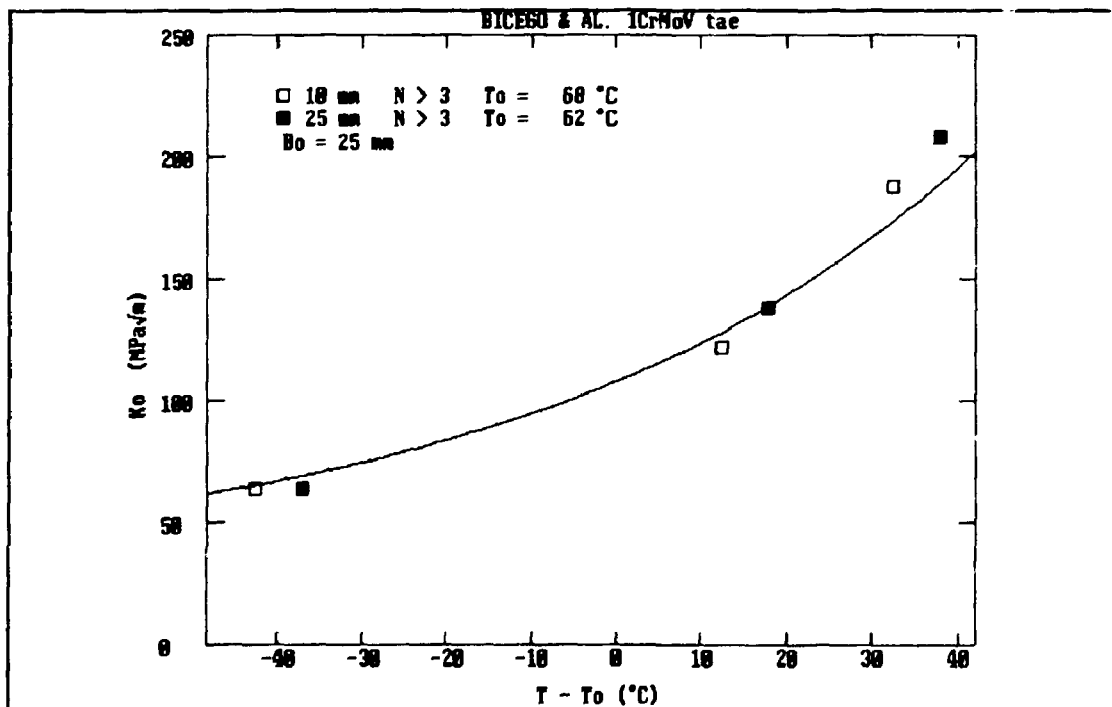
Kun kaavalla 4 analysoidaan kaikki tulokset ja määritetään kaavalla 2 korjattu  $K_{0c}$ , saadaan kuvan 9 (s. 18) mukainen tulos. Analyysiin sisällytettiin kaikki tapaukset (lämpötilat), joissa  $n > 3$ . Tällöin analyysin ulkopuolelle jäivät 100 mm paksut sauvat. Tällä tavalla analysoitunakin 10 mm paksut sauvat antavat konservatiivisemmän estimaatin kuin 25 mm paksut sauvat. Ero on kuitenkin ainoastaan 6 °C.



Kuva 7. Takeen 1CrMoV murtumissitkeyden sauvakokovertailu lämpötilan funktiona /17/. Tulokset korjattu kaavalla 2.



Kuva 8. Takeen 1CrMoV murtumissitkeyden sauvakokovertailu lämpötilan funktiona, normalisoituna samalla transitiolämpötilalla. Tulokset korjattu kaavalla 2.

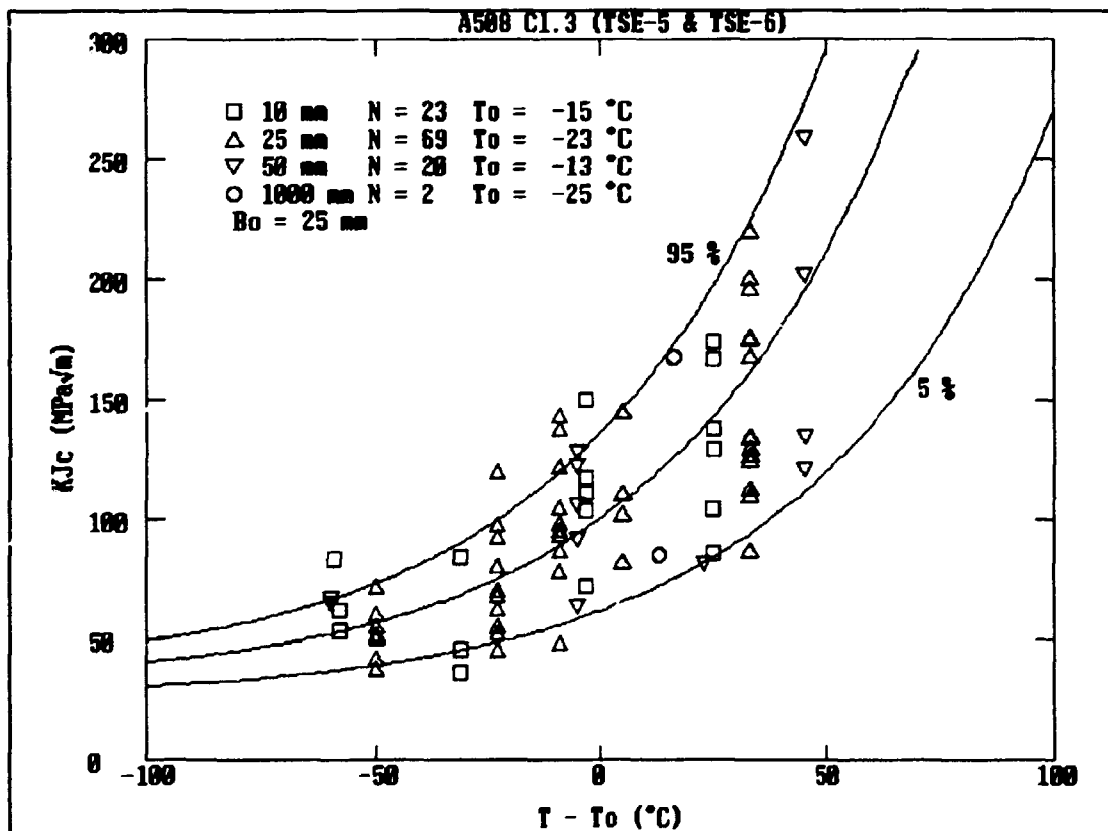


Kuva 9. Takeen 1CrMoV murtumissitkeyden sauvakokovertailu lämpötilan funktiona.  $K_0$  on laskettu kaavalla 4 ja korjattu paksuuden suhteen kaavalla 2.

Eräs suhteellisen vanha, mutta erittäin mielenkiintoinen tulosjoukko liittyy ORNL:n termoshokkikokeisiin TSE-5 ja TSE-6 [18]. Molemmissa kokeissa käytettiin periaatteessa samaa materiaalia (A533B Cl.1) ja kokeille tehtiin yhteinen materiaalikarakterisointi käyttäen esiväsytettyjä Charpy-sauvoja ja 25 mm ja 50 mm CT-sauvoja. Materiaali oli lämpökäsitelty osittain haurastettua. Yhteensä kokeita tehtiin 113 kappaletta. Uusinta-analyysi perustui osittain taulukoituun raakadataan. Valitettavasti kokeista ei kaikissa tapauksissa rekisteröity haurasmurtumaa vastaavaa murtumisitkeyttä, vaan kokeet keskeytettiin voimamaksimiin. Tilannetta vaikeuttaa se, ettei tuloksissa ole erotettu voimamaksimituloksia muista. Koetulosten lämpötilakäyttäytymisen perusteella määritettiin lämpötilat, joissa voimamaksimi-

käyttäytyminen oli luultavaa [18] ja kyseisiä lämpötiloja vastaavat koetulokset jätettiin tarkastelun ulkopuolella. Näin ollen päädyttiin kuvan 10 mukaiseen tulokseen.

Analyysiin lisättiin varsinaisten termoshokkikokeiden ensimmäiset haurasmurtumisarvot. Kokeessa TSE-5 tapahtui 3 ja kokeessa TSE-6 2 haurasmurtuman ydintymistä. Päätettiin rajoittaa analyysi kuitenkin ainoastaan ensimmäisiin haurasmurtumisarvoihin, koska seuraavissa haurasmurtumissa saattaa vaikuttaa jonkin tasoinen "Warm Pre-Stress" efekti. Vaikka termoshokkikokeissa säröintaman pituus oli 1 m (1000 mm), paksuuskorjatut transitiolämpötilat  $T_0$  ovat kaikki 12 °C tarkkuudella samat. Kokeen TSE-6 särönsyvyys oli vain 8 mm mikä saattaisi aiheuttaa "matalan särön



Kuva 10. TSE-5 ja TSE-6 termoshokkikoemateriaalin murtumissitkeyden sauvakokovertailu lämpötilan funktiona [18]. Tulokset korjattu kaavalla 2. Kuvaan lisätty varsinaiset termoshokkikoetulokset.

efektin", mutta koska ydintymis  $K_1$  on ainoastaan  $46 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ , ei tämä ole todennäköistä. Kokeen TSE-5 särönsyvyys oli 15 mm, joka absoluuttimittana on suhteellisen paljon. Tämän tutkimuksen kannalta tärkeintä on kuitenkin että 10 mm paksujen koesauvojen tulokset ovat aivan yltä päteviä kuin 50 mm paksujen koesauvojen tulokset. Lisäksi ne näyttävät olevan lievästi konservatiivisia varsinaisiin termoshokkikoetuloksiin nähden.

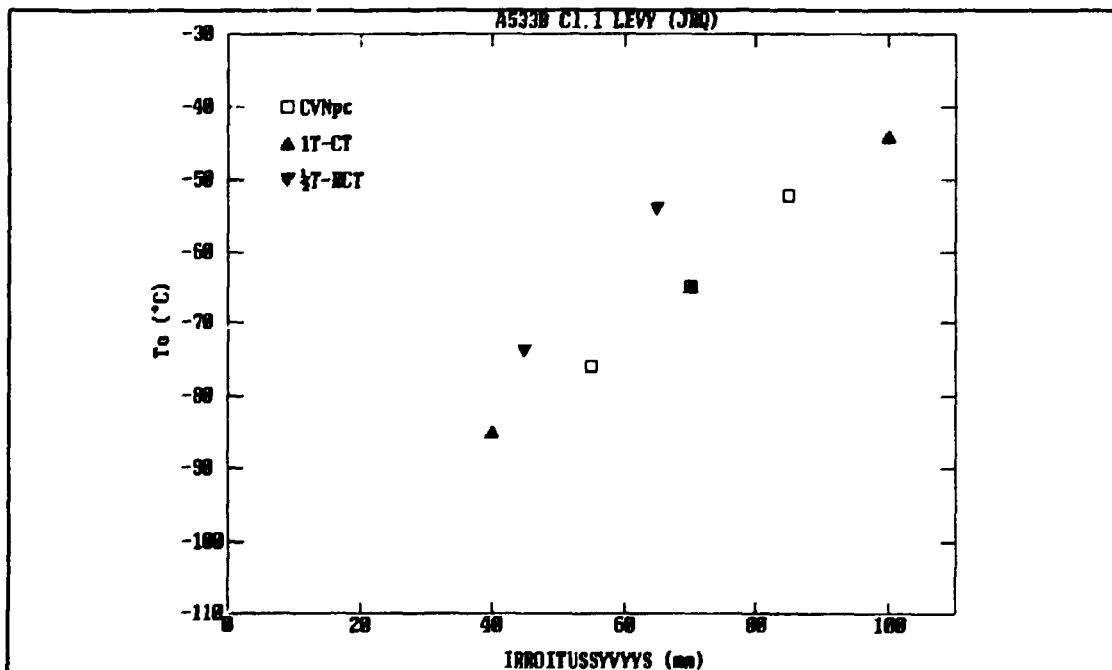
Kirjallisuudessa esiintyvien tulosjoukkojen perusteella voidaan todeta pienten taivutussauvojen mittauskapasiteetin olevan yllättävän hyvä (jopa erinomainen). Tulokset ovat luotettavia erityisen silloin, kun tuloksia käytetään vain transitiolämpötilan  $T_0$  määrittämiseen. Mahdollinen epäkonservatiivisuus, vaikka mitään rajoituksia ei sauvan mittauskapasiteetille tehtäisikään, on suuruudeltaan luokkaa  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ . On huomattava, että transitiolämpötilan  $T_0$  määrittystarkkuus muutenkin on samaa luokkaa.

## 5.2 Omat tutkimukset

VTT:llä on suoritettu omia kokeellisia tutkimuksia pienen koesauvan pätevyuden selvittämiseksi. IAEA:n organisoimassa tutkimusohjelmassa on testattu kahta paineastiamateriaalia,

A533B Cl.1 (JRQ) ja A508 Cl.3 (FFA) käyttäen neljää eri sauvakokoa (10 mm 3PB, 12.5 mm RCT, 25 mm CT ja 100 mm CT). JRQ on valssattu levy, jonka paksuus on noin 220 mm. Pienet sauvat irroitettiin eri syvyyksiltä edustan 100 mm paksun sauvan särörintaman eri alueita. Valitettavasti ilmeni, että materiaalilla esiintyi varsin selvä paksuussuuntainen sitkeysgradientti (Kuva 11). Charpy-V iskukokeiden perusteella sitkeysgradientin pitäisi ulottua ainoastaan noin 45 mm syvyyteen. Murtumisitkeys-kokeet osoittavat kuitenkin, että sitkeysgradientti ulottuu levyn keskustaan saakka. Sitkeysgradientti ei kuitenkaan vaikuttanut sitkeän murtuman helppouteen. Charpy-V iskukokeen tulokseen vaikuttaa myös sitkeä murtuma ja tämän takia Charpy-V iskukoe on epäherkempi havaitsemaan sitkeysgradientteja. Kuvan 11 perusteella levyn keskiosan transitiolämpötilan voi odottaa olevan välillä  $-40 \dots -30 \text{ }^\circ\text{C}$ . Sauvakokovertailuun päätettiin sisällyttää vain koesauvat, jotka on irroitettu syvemältä kuin 60 mm. Kokoeffektivertailu on esitetty kuvassa 12.

Muiden kuin 100 mm paksujen koesauvojen osalta tulokset ovat erittäin hyvin yhteensopivia ( $3 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Syynä 100 mm paksujen koesauvojen

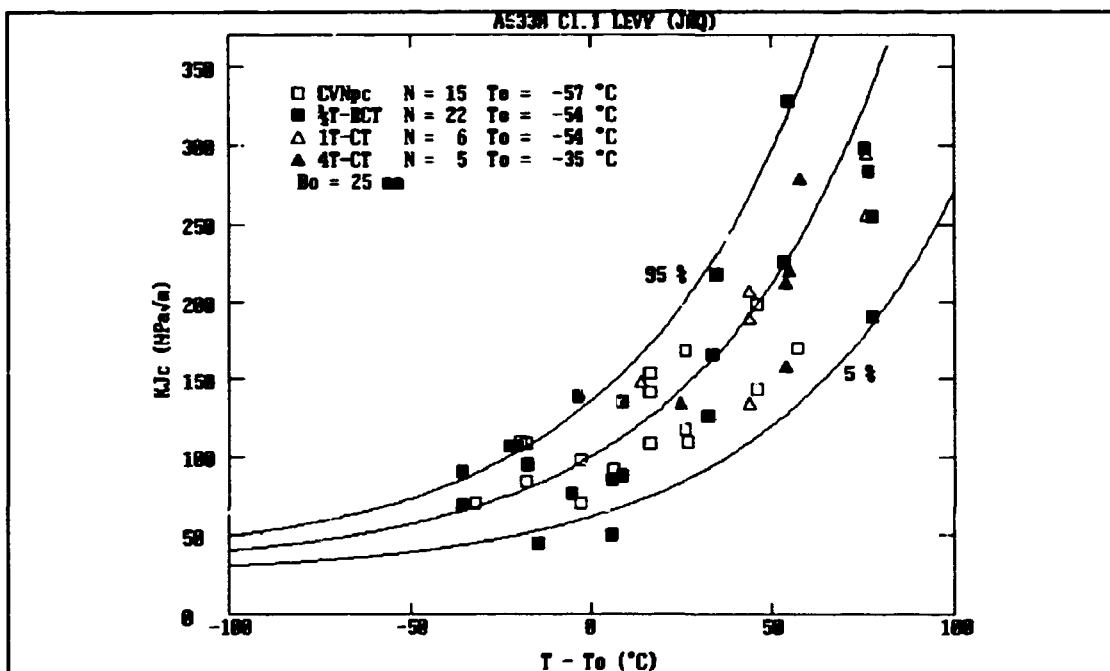


Kuva 11. Levyn A533B Cl.1 (JRQ) murtumisitkeyden riippuvuus koesauvojen irroitussyvyydestä. Eri sauvatyypit ennustavat samanlaisen sitkeysgradientin.

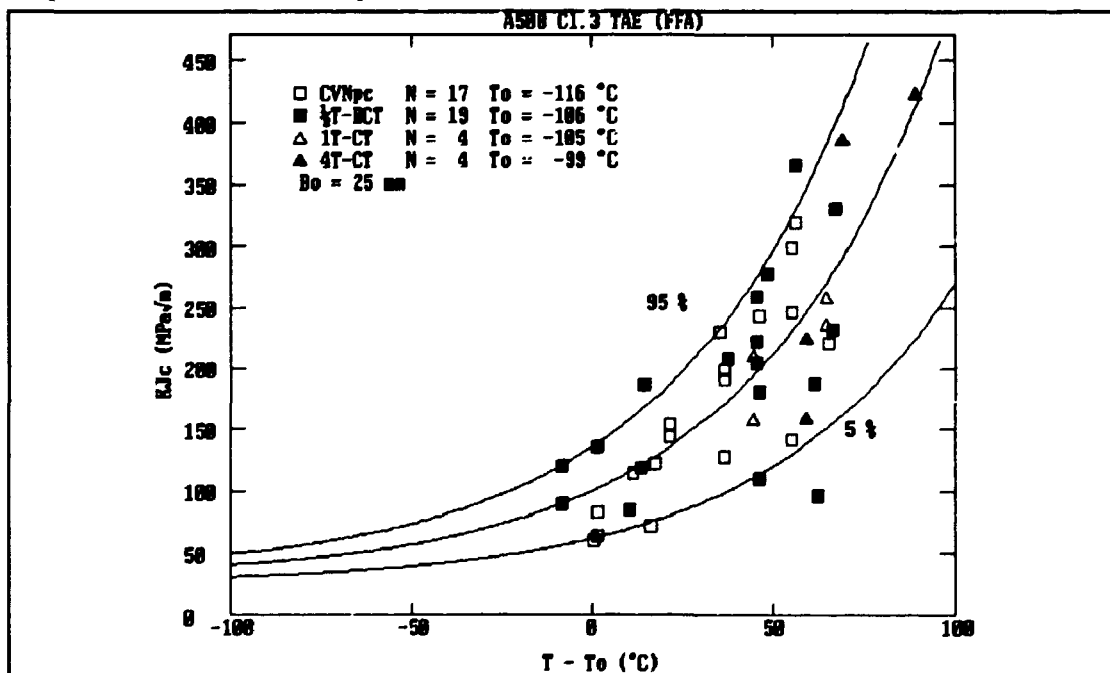
poikkeavaan käyttäytymiseen ei ilmeisesti ole koesauvojen eri mittauskapasiteetti, vaan materiaalin syvyysuuntainen sitkeysgradientti.

Takeella A508 Cl.3 (FFA) ei esiintynyt merkittävää sitkeysgradienttia. Tässä tapauksessa

kaikki koesauvat on irroitettu takeen keskiosasta, mikä osaltaan selittää sitkeysgradientin puuttumisen. Kokoefektivertailu on esitetty kuvassa 13. FFA:n tapauksessa on nähtävissä noin 10 °C ero pienillä Charpy kokoisilla mitatun murtumissitkeyden ja suuremmilla



Kuva 12. Levyn A533B Cl.1 (JRQ) murtumissitkeyden sauvakoriippuvuus. Sauvat irroitettu syvempää kuin 60 mm. 100 mm paksut sauvat edustavat levyn keskustaa.



Kuva 13. Takeen A508 Cl.3 (FFA) murtumissitkeyden sauvakoriippuvuus.

koesauvoilla mitatun murtumissitkeyden välillä. Tässä tapauksessa pieniä koeksuvoja testattiin suhteellisen korkeata sitkeystasoa vastaavassa lämpötilassa, jonka takia jännitystilan hajoaminen korostui. Materiaalin kyky vastustaa sitkeää särönkasvua oli lisäksi poikkeuksellisen hyvä. Myös tämä seikka vaikutti havaittuun käyttäytymiseen /15, 16/.

VTT:llä testattuja relevantteja VVER 440 materiaaleja edustavat hitsit 12 ja 22, jotka periaatteessa vastaavat Lo-II tyyppistä jauhekaarihitsiä, sekä Loviisan vanha perusainenäyte.

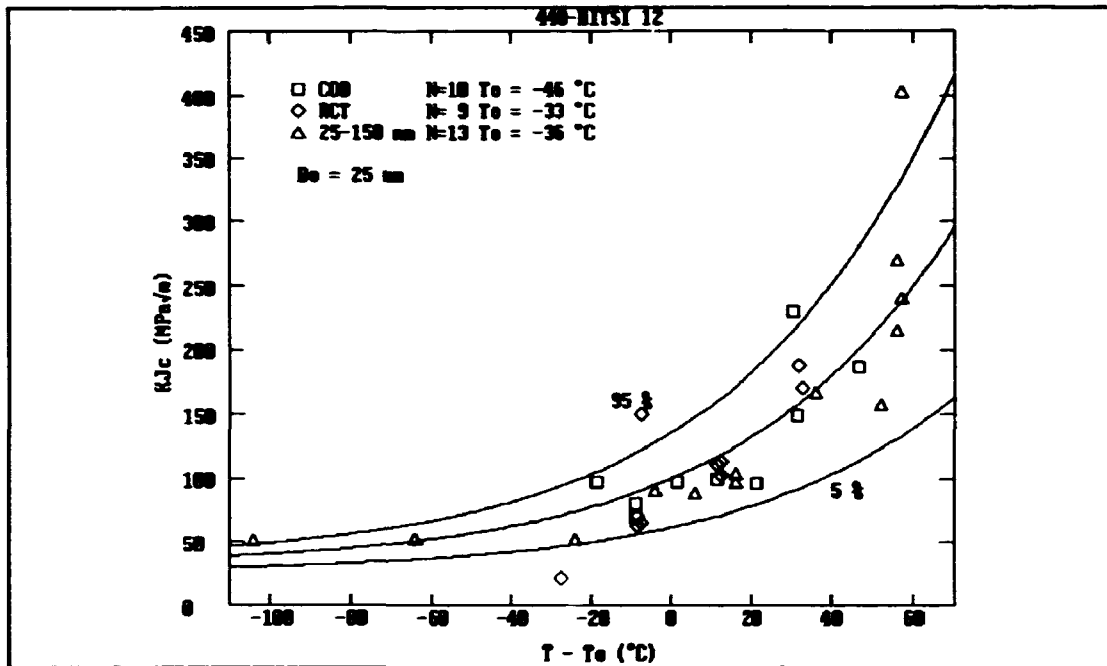
Hitsit oli leikattu osiin, joista Suomessa tutkittiin paloja 122, 123, 221 ja 224. Alkuperäiset tutkimukset tehtiin yhteistyössä venäläisten kanssa, jotka tutkivat omia osiaan kyseisistä hitseistä. Ultraäänitutkimuksissa hitseistä löytyi suhteellisen paljon indikaatioita. Alkuperäisten tutkimusten koeksuvat pyrittiin irrottamaan niin, etteivät indikaatiot vaikuttaisi koetulokseen. Tämän takia ei esimerkiksi palaa 224 käytetty lainkaan alkuperäisissä tutkimuksissa. Alkuperäiset tutkimukset sisälsivät murtumekaanista testausta suurilla koeksuvoilla 25...150 mm. Venäläiset määrittivät lineaaris-elastisia  $K_{IC}$  arvoja, joille VTT:llä suoritettiin plastisuuskorjaus ja VTT:llä määritettiin elastisplastinen  $K_{IC}$ . Uudemmissa säteilytysketjujen nro 3 ja 6 tutkimuksissa testattiin pieniä säteilyseurantaohjelmien mukaisia koeksuvoja. Valitettavasti nämä sauvat oli irroitettava jätepaloista, joita ei ollut huolittu alkuperäisiin tutkimuksiin. Alkuperäisissä tutkimuksissa havaittiin hitseissä myös äkillisiä mekaanisten ominaisuuksien muutoksia hitsin pituussuunnassa. Yllämainittujen seikkojen vuoksi ei hitsejä 12 ja 22 voida pitää kovinkaan luotettavina materiaaleina sauvakoeefektin tutkimiseen. Täydellisyyden vuoksi, kuitenkin myös näiden tapausten tulosjoukot analysoitiin. Tulokset on esitetty kuvissa 14 ja 15.

Hitsin 12 tapauksessa tulosten yhteensopivuus on aika hyvä (kuva 14). Charpy tyyppisten sauvojen (merkitty kuvassa COD) transitiolämpötila poikkeaa 12,5 mm paksujen RCT sauvojen transitiolämpötilasta 13 °C, mutta suurten koeksuvojen transitiolämpötilasta vain 10 °C. Tulosten lukumäärän ja hitsin epämääräisyyden huomioiden yhteensopivuutta on pidettävä hyvänä.

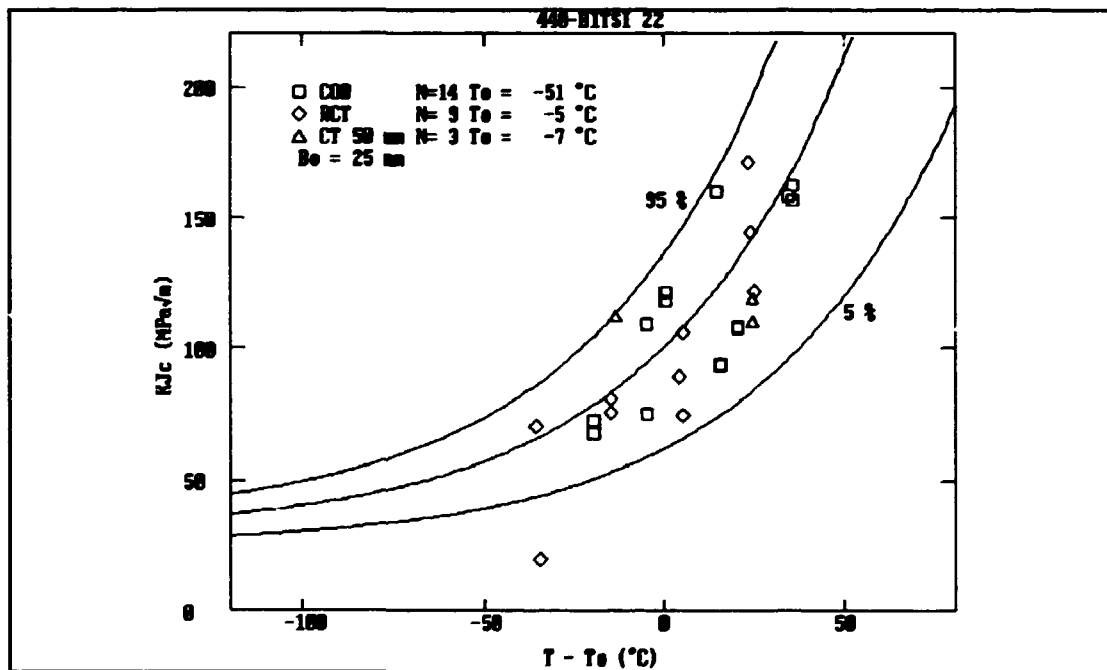
Hitsin 22 tapauksessa tulokset ovat erittäin poikkeuksellisia (kuva 15). Charpy tyyppisten sauvojen (merkitty kuvassa COD) transitiolämpötila poikkeaa 12,5 mm paksujen RCT sauvojen transitiolämpötilasta 46 °C, ja suurten koeksuvojen transitiolämpötilasta 44 °C. Näin suuret erot eivät voi johtua koeksuvojen koosta, vaan syynä täytyy olla jo aiemmin havaittu hitsin pituussuunnassa vallitseva materiaaliominaisuuksien muuttuminen. Havaittu transitiolämpötilojen poikkeama on samaa suuruusluokkaa ( $\approx 50$  °C) kuin mitä aikaisemmin on havaittu tavallisilla Charpy-V -iskukokeilla näille hitseille. Kovuusmittausten pohjalta havaittiin myös, että hitsin kovuus voi vaihtua yhdeltä tasolta toiselle noin 10 mm matkalla.

Koska COD ja RCT sauvat on irroitettu eri kohdista hitsejä, on todennäköistä, että erot tässä tapauksessa selittyvät materiaalin makroskooppisella epähomogeenisuudella.

Loviisan vanhasta perusainenäytteestä on olemassa vanhoja  $K_{IC}$  koetuloksia /19/ ja uusia pienillä koeksuvoilla määritettyjä  $K_{IC}$  koetuloksia /20/. Sauvapaksuus vaihtelee välillä 10 mm ... 100 mm. Uusinta-analyysin tulokset on esitetty kuvassa 16 (s. 24). Mikäli 50 mm paksuutta vastaava tulos, joka perustuu vain kahden kokeeseen jätetään huomiotta, antavat kaikki sauvakoot 10 °C tarkkuudella saman tuloksen.

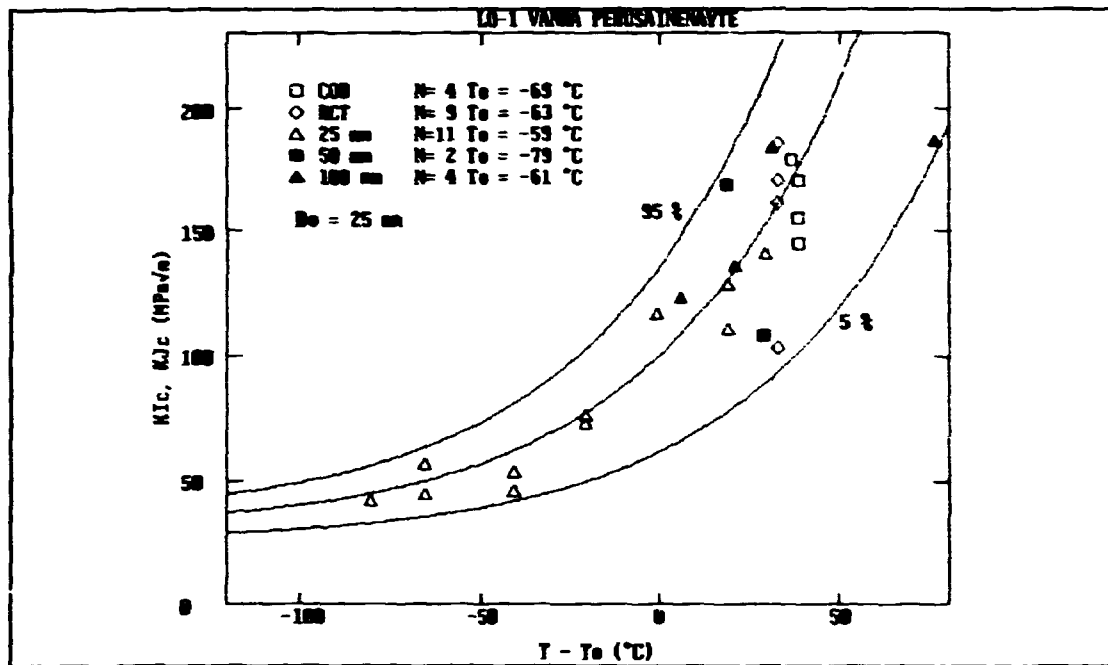


Kuva 14. Hitsin 12 murtumissitkeyden sauvakoriippuvuus.

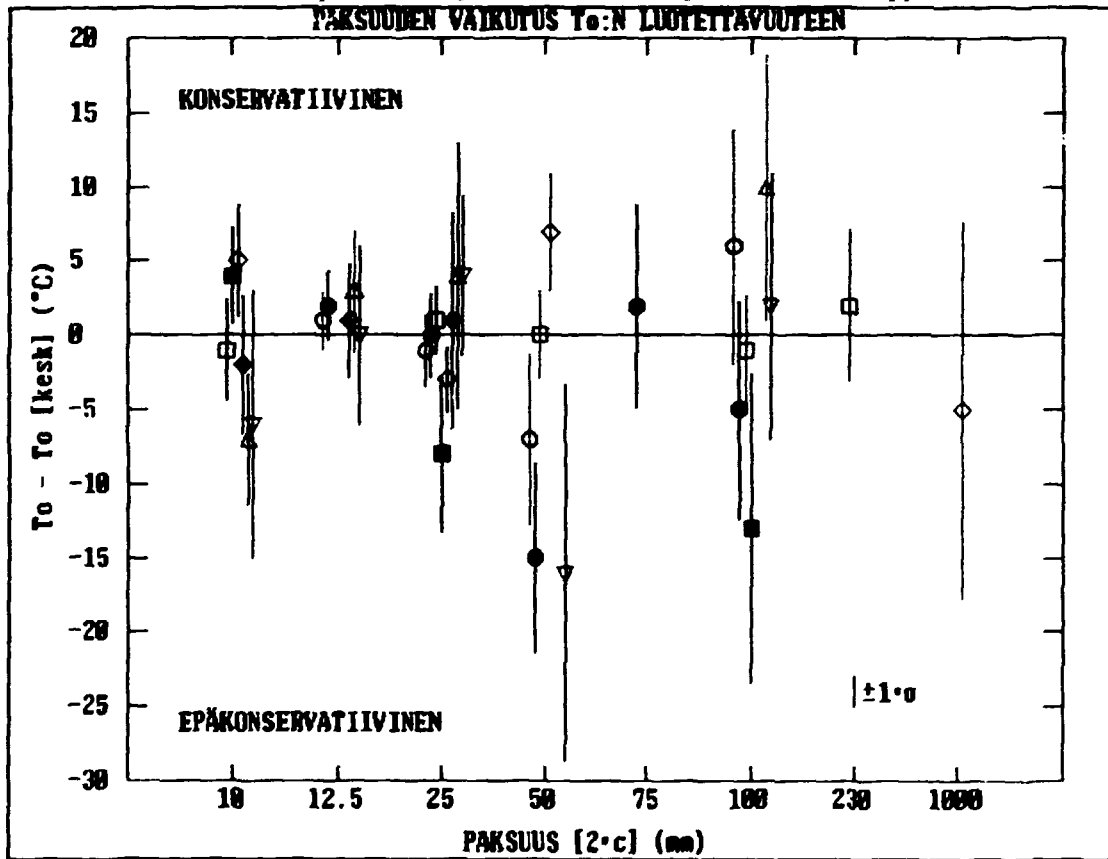


Kuva 15. Hitsin 22 murtumissitkeyden sauvakoriippuvuus.





Kuva 16. Loviisan vanhan perusainenäytteen murtumissitkeyden sauvakokoriippuvuus.



Kuva 17. Murtumissitkeyden transitiolämpötilan T<sub>0</sub> sauvakoriippuvuus.

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO

Tutkimuksessa analysoitiin kirjallisuudesta löytyviä ja omia murtumissitkeystulosjoukkoja, jotka sisältävät pieniä ja suuria koesauvoja.

Yhteenvetona on muodostettu kuva 17, jossa määritetyt transitiolämpötilat  $T_0$  on esitetty poikkeamana kunkin datajoukon keskiarvosta eri sauvapaksuuksille. Kuvaan on piirretty estimaattien  $\pm 1 \cdot \sigma$  luotettavuusrajat, jotka riippuvat kokeiden lukumäärästä /11/. Kuvaan 17 on merkitty kaikki materiaalit hitsejä 12 ja 22 lukuunottamatta. Kuvassa ei ole havaittavissa mitään selvää merkkiä siitä, että pienet koesauvat antaisivat huonomman  $T_0$  estimaatin, kuin suuret sauvat.

Todellisten koetulosten tarkastelun pohjalta voidaan todeta pienillä taivutussauvoilla mitatun murtumissitkeyden pätevyyden olevan hyvä.

Elastis-plastinen  $K_{IC}$  on ekvivalentti lineaaris-elastisen  $K_{IC}$ :n kanssa. Kohtuullisilla koesauvan sivu-urilla ei ole havaittavaa vaikutusta hauras-murtumisen helppouteen. Analyysit osoittavat pienillä taivutussauvoilla mitatun murtumissitkeyden transitiolämpötilan virheen normaalisti olevan alle 5 °C ja pahimmassakin tapauksessa se on korkeintaan 10 °C. Koska transitiolämpötilan määrittystarkkuus on itsessään samaa suuruusluokkaa, ei pieniin taivutussauvoihin liittyvää mahdollista virhettä voida pitää merkittävänä.

Tutkimusten pohjalta voidaan todeta, että Lo-viisan säteilyseurantaohjelman murtumissitkeysarvot ovat relevantteja ja päteviä, eikä niiden uudelleenarviointi ole tarpeellista, koska niissä jo on huomioitu tilastollinen paksusefekti.

## LÄHDELUETTELO

- /1/ Ikonen K. Murtumissitkeyden laskeminen pienen taivutusalkin kokeesta. *STUK-YTO-TR 57*. Säteilyturvakeskus, Heinäkuu 1993, 61 s.
- /2/ Wallin K. The Scatter in  $K_{IC}$ -Results. *Engng Fracture Mech.*, 19, (6), 1984: 1085-1093.
- /3/ Wallin K. The Size Effect in  $K_{IC}$  Results. *Engng Fracture Mech.* 22, (1), 1985: 149-163.
- /4/ Wallin K. Statistical Modelling of Fracture in the Ductile to Brittle Transition Region. *Defect Assessment in Components - Fundamentals and Applications, ESIS/EGF9*, Blauel JG, Schwalbe K-H (eds). Mechanical Engineering Publications, London, 1991: 415-445.
- /5/ Wallin K, Törrönen K. Mechanism Based Statistical Requirements for Fracture Toughness Testing. *ECF6, Fracture control of engineering structures. Vol. 1*. H.C. van Elst and A. Bakker, Eds., Engineering Materials Advisory Services Ltd, U.K. 1986: 563-576.
- /6/ Wallin K. Statistical Aspects of Constraint with Emphasis to Testing and Analysis of Laboratory Specimens in the Transition Region. *Constraint Effects in Fracture, ASTM STP 1171*. Hackett EM, Schwalbe K-H, Dodds RH (eds). American Society for Testing and Materials, Philadelphia 1993. Painossa.
- /7/ Wallin K, Törrönen K, Ahlstrand R, Timofeev B, Rybin V, Nikolaev V, Morozov A. Theory Based Statistical Interpretation of Brittle Fracture Toughness of Reactor Pressure Vessel Steel 15X2MφA and its Welds. *Nuclear Engineering and Design*. 135, 1992: 239-246.
- /8/ Wallin K. Macroscopic Nature of Brittle Fracture. *3rd European Conference on Advanced Materials and Processes EUROMAT 93*. Pariisi, Kesäkuu 8-10, 1993: 15 s.
- /9/ Wallin K. Fracture Toughness Transition Curve Shape for Ferritic Structural Steels. *Fracture of Engineering Materials & Structures.*, Teoh ST, Lee KH (eds). Elsevier Applied Science. 1991: 83-88.
- /10/ Wallin K. Irradiation Damage Effects on the Fracture Toughness Transition Curve Shape for Reactor Pressure Vessel Steels. *Int. J. Pres. Ves. & Piping*. 55, (1), 1993: 61-79.
- /11/ Wallin K. Recommendations for the Application of Fracture Toughness Data for Structural Integrity Assessments. *IAEA/CSNI Specialists' Meeting: Fracture Mechanics Verification by Large-Scale Testing*, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Lokakuu 26-29, 1992: III.3, 30 s.

- /12/ Wallin K. A Simple Theoretical Charpy-V -  $K_{IC}$  Correlation for Irradiation embrittlement. *Innovative Approaches to Irradiation Damage and Fracture Analysis*. PVP-Vol.170, Marriott DL, Mager TR, Bamford WH (eds). The American Society of Mechanical Engineers, 1989: 93-100.
- /13/ Iwadata T, Tanaka Y, Ono S, Watanabe J. An Analysis of Elastic-Plastic Fracture Toughness Behavior of  $J_{IC}$  Measurement in the Transition Region. *Elastic-Plastic Fracture: Second Symposium, Volume II-Fracture Resistance Curves and Engineering Applications*, ASTM STP 803. Shih CF, Gudas JP (eds). American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1983: II-531 - II-561.
- /14/ Ingham T, Knee N, Milne I, Morland E. Fracture Toughness in the Transition regime for A533B Steel: Prediction of Large Specimen Results from Small Specimen Tests. *Fracture Mechanics: Perspectives and Directions: Twentieth Symposium*, ASTM STP 1020. Wei RP, Gangloff RP (eds). American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1989: 369-389.
- /15/ Wallin K. The Effect of Ductile Tearing on Cleavage Fracture Probability in Fracture Toughness Testing. *Engng. Fracture Mech.* 32, (4), 1989: 523-531.
- /16/ Wallin K. The Effect of Ligament Size on Cleavage Fracture Toughness. *Engng. Fracture Mech.* 32, (3), 1989: 449-457.
- /17/ Bicego V, Elli A, Rinaldi C. A Predictive Approach to Cleavage Fracture Events in the Transition Region. *Engng Fracture Mech.* 45, (5), 1993: 587-598.
- /18/ Merkle JG. An Examination of the Size Effects and Data Scatter Observed in Small-Specimen Cleavage Fracture Toughness Testing. *NUREG/CR-3672, ORNL/TM-9088*, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, 1984: 67 s.
- /19/ Kotilainen H, Forstén J. Determination of the fracture toughness  $K_{IC}$  and NDT-temperature of a Cr-Mo-V-steel (12X2MφA), AEN-MR-30. 1973: 9 s. + liitt.
- /20/ Wallin K, Saario T. Julkaisematon tutkimus 1983.

## STUK-YTO-TR-sarjan julkaisut

**STUK-YTO-TR 62** Sandberg J, Virolainen R. Comparison of the core damage probability by the SPSA computer program and by analytical methods - a simplified loss of offsite power. Validation of the SPSA program.

**STUK-YTO-TR 61** Holmberg J, Pulkkinen U. Regulatory decision making by decision analysis.

**STUK-YTO-TR 60** Sinkko K. Säteily suojeletoimenpiteiden suunnittelu onnettomuustilanteiden varalta.

**STUK-YTO-TR 59** Okkonen T. A Synthesis of Hydrogen Behaviour in Severe Reactor Accidents.

**STUK-YTO-TR 58** Simola K, Hänninen S (VTT). Olkiluodon ydinvoimalaitoksen suojausautomaation laiteketjun vanheneminen.

**STUK-YTO-TR 57** Ikonen K (VTT). Murtumisitkeyden laskeminen pienen taivutusalkion kokeesta.

**STUK-YTO-TR 56** Lévai F, Dési S (University of Budapest), Tarvainen M (STUK), Arlt R (IAEA). Use of high energy gamma emission tomography for partial defect verification of spent fuel assemblies. Final report on the Task FIN A98 on the Finnish Support Programme to IAEA Safeguards.

**STUK-YTO-TR 55** Tiitta A (VTT), Kaita K, Tarvainen M. SFAT geometry verification measurements at the TVO KPA-STORE. Interim report on Task FIN A563 of the Finnish Support Programme to IAEA Safeguards.

**STUK-YTO-TR 54** Järvinen J, Mikkonen M (Ekono Oy). Kokemuksia ohjelmoitavan automaation luotettavuudesta.

**STUK-YTO-TR 53** Pulkkinen U (VTT). Ohjelmoituun automaatioon perustuvien turvallisuustoimintojen luotettavuusanalyysi.

**STUK-YTO-TR 52** Haapanen P, Maskuniitty M (VTT). Ohjelmoitavan automaation diversiteetti- ja testausvaatimukset.

**STUK-YTO-TR 51** Nissilä M, Reunanen M, Vuori M (VTT). Ydinlaitosten varoventtiilien määräaikaistestaus. Perusteita, käytäntöjä ja vaatimuksia.

**STUK-YTO-TR 50** Barck H (VTT). Röntgenkuvien arkistointi.

**STUK-YTO-TR 49** Sarkimo M (VTT). Akustinen emissio ydinvoimalaitoksen suojauskuoren testauksessa.

**STUK-YTO-TR 48** Paloniemi E, Salparanta L (VTT). Jänneterästen kunnon tarkastus.

**STUK-YTO-TR 47** Sillanpää J, Särkiniemi P (VTT). Ultraäänitestauksen menetelmäkokeet ja henkilöstön pätevyystesti ydinvoimalaitosten määräaikaistarkastuksissa.

**STUK-YTO-TR 46** Niiranen T. Vaativien rakennusteknisten kohteiden suunnittelun ja rakentamisen valvonta.

**STUK-YTO-TR 45** Hänninen S, Laakso K (VTT). Experience based reliability centered maintenance - An application on motor operated valve drives.

**STUK-YTO-TR 44** Eurasto T, Sandberg J, Marttila J. The Leningrad Nuclear Power Plant - A general description.

**STUK-YTO-TR 43** Hellmuth K-H, Lindberg A, Tullborg E-L. Water-rock interaction in a high-FeO olivine rock in nature.

Täydellisen listan STUK-YTO-TR-sarjan julkaisuista saa Säteilyturvakeskuksen kirjastosta, PL 268, 00101 HELSINKI

Julkaisujen myynti: Säteilyturvakeskus, ydinturvallisuusosasto, puh. 7082 384

**ISBN** 951-47-8859-1  
**ISSN** 0785-9325

Painatuskeskus Oy, Pika-paino  
Annankatu 44, Helsinki 1994