

KEMI-TORNION AMMATTIKORKEAKOULU

**Tutkimus laboratoriomittausten
mittausepävarmuudesta kahdessa testausympäristössä**

Riikka Vaara

Teknologiaosaamisen johtamisen koulutusohjelman opinnäytetyö
Kunnossapito
Insinööri(YAMK)

KEMI 2011

ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö on tehty Outokummun Tornion tutkimuskeskukseen talven 2010 - 2011 aikana.

Haluan kiittää työni valvojaa Marcus Lahtista kiinnostavasta aiheesta sekä kaikesta tuesta, mitä olen työhöni saanut. Kiitokset myös tutkimuskeskuksen muulle henkilöstölle, jotka ovat jollain tavalla jossakin vaiheessa olleet apunani.

Kiitos työni ohjaajalle Timo Kaupille työni kuluessa saamistani ohjeista ja hyvistä neuvoista.

Parhaat kiitokset perheelleni; puolisololleni Martille sekä lapsillemme Lauralle, Eemelille, Oskarille ja Aleksille kannustuksesta, tukemisesta sekä kärsivällisyydestä opintojeni aikana.

TIIVISTELMÄ

Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu, Tekniikan yksikkö	
Koulutusohjelma	Teknologiaosaamisen johtaminen
Opinnäytetyön tekijä	Riikka Vaara
Opinnäytetyön nimi	Tutkimus laboratoriomittausten mittausepävarmuudesta kahdessa testausympäristössä
Työn laji	Opinnäytetyö
Päiväys	25.3.2011
Sivumäärä	76 + 7 liitesivua
Opinnäytetyön ohjaaja	TkL Timo Kauppi
Yritys	Outokumpu Tornio Works
Yrityksen yhteyshenkilö/valvoja	DI Marcus Lahtinen

Tämä opinnäytetyö tehtiin Outokummun Tornion tutkimuskeskukseen tutkimus- ja laadunvalvontalaboratorioon. Työn aihe lähti laboratorion tarpeesta määrittää mittausepävarmuus tiettyihin laadunvalvontatesteihin. Työn tavoitteena oli selvittää mittausepävarmuuteen liittyviä asioita ja kehittää toimintamalli, jossa epävarmuuksien huomioonottaminen on rutiinitoimintaa.

Teoriaosassa käsiteltiin tilastollista laadunohjausta, mittausepävarmuutta sekä laadunvalvontatestejä. Työ rajattiin tutkimuskeskuksen tutkimus- ja laadunvalvontalaboratorioon koskemaan kovuusmittauksia, vetokokeita sekä iskukokeita. Mittausepävarmuuden määrittämisen osalta käsiteltiin kovuusmittauksia ja vetokokeita.

Mittausepävarmuutta tutkittiin kahdessa eri testausympäristössä TRC:ssä ja KTAMK:ssa. Mittausepävarmuuden määrittämiseksi selvitettiin kalibrointien merkitystä ja tehtiin vertailumittauksia molemmissa laboratorioissa käyttäen samoja parametreja.

Työn tuloksena määritettiin epävarmuus kovuusmittauksiin sekä vetokokeisiin. Samalla voitiin todeta, kuinka suuri merkitys ulkoisilla seikoilla on epävarmuutta selvitettäessä.

Asiasanat: kalibrointi, tilastollinen prosessinohjaus, mittausepävarmuus.

ABSTRACT

Kemi-Tornio University of Applied Sciences, Technology	
Degree Programme	Technology Competence Management
Name	Riikka Vaara
Title	Research laboratory measurements of the measurement of the two test environment
Type of Study	Master's Thesis
Date	25 March 2011
Pages	76 + 7 appendinxes
Instructor	Timo Kauppi, MSs, Lic(Tech.)
Company	Outokumpu Tornio Works
Contact Person/Supervisor from Company	Marcus Lahtinen, MSc

The thesis was commissioned by The Research and Quality Control Laboratory of Outokumpu Tornio Research Center. The idea was to determine measurement uncertainty to some quality control tests. The goal was to define issues related to measurement uncertainty.

The theoretical part focused on statistical quality control, measurement uncertainty and quality control tests. The thesis was limited to hardness, tensile and impact tests. Measurement uncertainty was determined to hardness- and tensile tests.

In the practical part of this thesis, hardness and tensile tests were carried out in two different test environments in TRC and Kemi-Tornio University of Applied Sciences. To determine the measurement uncertainty the meaning of calibrations were examined and reference measurements were made in both laboratories by using the same parameters.

As the result of this thesis the uncertainty was determined on the hardness measurements and tensile tests. At the same time could be stated how important the external things are when determining the uncertainty.

Keywords: Calibration, statistical process control, measurement uncertainty.

SISÄLLYSLUETTELO

ALKUSANAT	I
TIIVISTELMÄ	II
ABSTRACT	III
SISÄLLYSLUETTELO	IV
KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET	V
1. JOHDANTO	1
2. TILASTOLLINEN LAADUNOHJAUS	2
3. MITTAUSEPÄVARMUUS	9
4. LAADUNVALVONTATESTIT	14
4.1. Kovuuskoe	14
4.1.1. Suora varmentaminen.....	14
4.1.2. Epäsuora varmentaminen	15
4.1.3. Mittausepävarmuuden määrittäminen Rockwellin menetelmälle	15
4.1.4. Mittausepävarmuuden määrittäminen Vickersin menetelmälle	21
4.1.5. Mittausepävarmuuden määrittäminen Brinellin menetelmälle	27
4.2. Vetokoe	32
4.2.1. Mittausepävarmuuden määrittäminen vetokokeelle	34
4.3. Iskukoe	36
5. TESTIMITTAUSTEN TULOKSET	40
5.1. Kovuusmittausten tulosten epävarmuudet	42
5.2. Vetokokeen tulokset ja mittausepävarmuus	52
6. CASE-ESIMERKKI, KTAMK	57
6.1. Mittausepävarmuus kovuusmittaukselle KTAMK:ssa	58
6.2. Vetokoneen mittausepävarmuus KTAMK:ssa	67
7. YHTEENVETO	71
8. LÄHDELUETTELO	73
9. LIITELUETTELO	76

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

TRC	Tornio Research Center, Tornion tutkimuskeskus
KTAMK	Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu
SPC	Tilastollinen prosessinohjaus
QC	Quality Control, Laadunvalvonta
u_E	Standardiepävarmuus suurimman sallitun virheen mukaisesti
\bar{H}	Mittaustulosten keskiarvo
S_H	Keskihajonta
U_{CRM}	Vertailupalan mittausepävarmuus
\bar{X}_{CRM}	Kovuus kalibroitodistuksen mukaisesti
u_{CRM}	Vertailukovuuspalan mittausepävarmuus/2
δ_{ms}	Kovuusmittarin lukemistarkkuus
u_{ms}	Kovuusmittarin lukemistarkkuudesta johtuva epävarmuus
t	Tasaantumisaika
s_x	Koekappaleen mittausten keskihajonta
u_x	Standardiepävarmuus mitattaessa koekappaletta
u_H	Kovuusmittarin standardiepävarmuus mitattaessa vertailukovuuspalaa
\bar{b}	Kovuusmittarin poikkeama kalibroidusta arvosta
$s_{\bar{b}}$	Poikkeaman b keskihajonta
u_b	Poikkeaman b määrittämisen standardiepävarmuus, voidaan määrittää vasta toisen mittaussarjan jälkeen
u_{HTM}	Yhdistetty mittausepävarmuus
U_{HTM}	Laajennettu mittausepävarmuus
U_{corr}	Korjatun laajennetun epävarmuuden määrittäminen
Rm	Murtolujuus
A	Murtovenymä

1. JOHDANTO

Opinnäytetyö tehtiin Outokumpu Tornio Worksin Tornion tutkimuskeskukseen (TRC) tutkimus- ja laadunvalvontalaboratorioon. Outokumpu on metalliteollisuuden suomalainen yritys, joka toimii 30 maassa. Outokummun pääliiketoiminta-alue on ruostumaton teräs. Tornio Works käsittää Outokummun merkittävimmät tuotantolaitokset, ferrokromisulaton ja terästehtaan. Tornion laitokset muodostavat maailman suurimman, yhtenäisen ruostumattoman teräksen tuotantoketjun. Tutkimuskeskus on suuntautunut tukemaan Tornion tehtaiden tuotantoa. Tutkimuskeskuksessa työskentelee noin 120 henkilöä, joista puolet tutkimus- ja kehitystehtävissä ja puolet tuotantoa ja myyntiä tukevissa tehtävissä. Tutkimuskeskuksen osastot ovat tutkimusosasto, laatu- ja asiakaspalveluosasto, laboratoriot ja ympäristönsuojeluosasto.

Opinnäytetyö rajattiin koskemaan tutkimus- ja laadunvalvontalaboratoriota. Aihe muodostui laboratorion tarpeesta määrittää mittausepävarmuus tiettyihin laadunvalvontatesteihin. Lähtökohtana oli tutustua ja kerätä tietoa laboratoriossa käytössä olevista laadunvalvontatesteistä. Työn tavoitteena oli määrittää mittausepävarmuus kovuusmittaukseen ja vetokokeeseen sekä määrittää vaatimukset tutkimuskeskuksen ulkopuoliselle testausorganisaatiolle. Apuna työn suorittamisessa käytettiin henkilöhaastatteluja, standardeja ja muuta alan kirjallisuutta.

2. TILASTOLLINEN LAADUNOHJAUS

Laadunohjaus käsittää koko analyysiprosessin alkaen näytteen saapumisesta laboratorioon ja päättyen analyysiraporttiin. Laadunohjauksen tavoitteena on pitää tuotanto sillä tasolla, että kaikki valmistuvat tuotteet täyttävät niille asetetut vaatimukset. Tähän päästään valvomalla tuotantoprosessia.

Tilastollinen laadunohjaus ja tilastollinen prosessinohjaus (SPC) perustuu siihen, että prosessissa esiintyvät vaihtelut voidaan jakaa systemaattiseen ja satunnaiseen vaihteluun. Systemaattinen vaihtelu eli selitettävissä olevat syyt koostuvat asioista, joihin voidaan vaikuttaa ja joita voidaan ennakoida, esimerkiksi osien kuluminen tai materiaaleista johtuvat seikat. Satunnaiseen vaihteluun eli sattumanvaraiseen syyhyn ei pystytä vaikuttamaan. Se on sitä mikä jää jäljelle, kun systemaattinen vaihtelu on eliminoitu. Jos prosessissa esiintyy vain satunnaista vaihtelua, prosessin uskotaan olevan kunnossa. /4, s. 5 - 6./ , /5, s. 1 - 6./

Kaikkia menetelmiä, joita käsitellään joukkona ja joista ei tehdä päätelmiä yksittäisen mittauksen tai havainnon perusteella, voidaan pitää tilastollisina menetelminä. Prosessin suorituskyky voidaan määrittellä tilastollisesti luotettavasti kerätyistä havainnoista. Jos prosessi on tilastollisesti hallinnassa, huomataan prosessiin hitaastikin vaikuttavat häiriöt, ennen kuin ne aiheuttavat laatuongelmia. /18/

SPC

”Laatu ja tuottavuus nousevat, kun hajonta pienenee” nämä sanat olivat W.A. Shewhartin perusajatukset. Shewhart kehitti SPC:n periaatteet vuosina 1925 - 1931. SPC mielletään usein tilastollisten menetelmien hyödyntämiseksi prosessin valvonnassa ja ohjauksessa. Usein sen käyttö rajoittuukin pelkästään valvontakorttien käyttöön. Valvontakortit otettiin ensimmäisen kerran käyttöön Bellin puhelinelaboratoriossa. Tarkoituksena oli eliminoida epänormaali vaihtelu. Mikäli kaikki tulokset olivat valvontarajojen sisällä, prosessi oli kunnossa. Valvontakorttien avulla seurataan prosessia ja siinä tapahtuvia muutoksia. Valvontakortit ovatkin SPC:n tärkein työkalu. Ainoastaan valvonta ei ole kuitenkaan

SPC:n tarkoitus, vaan sen on tuotettava myös tulosta. SPC edellyttää prosessin jatkuvaa parantamista pienentämällä sen vaihtelua. /7, s. 92 - 94./ , /9, s. 2./

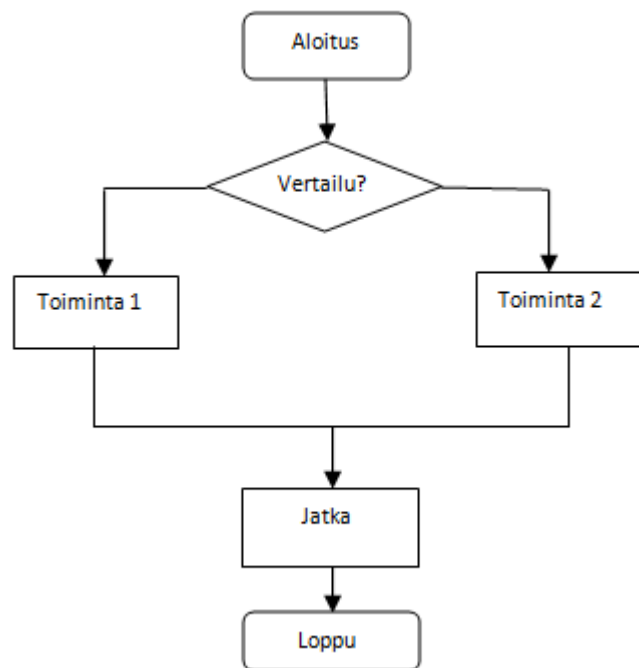
Prosessien tilastollinen valvonta voidaan lähes aina tehdä valvontakortein. Valvontakorttien käyttö on tärkein apuväline tässä työssä. Laboratorio analysoi laadunvalvontanäytteitä (QC-näytteitä) yhdessä rutiininäytteiden kanssa. Saadut QC-tulokset merkitään valvontakorttiin. Tällä seurataan, että tulokset pysyvät asetettujen tavoitteiden sisällä. Jos QC-näytteiden tulokset ovat rajojen ulkopuolella, rutiininäytteitä ei raportoida, vaan ryhdytään korjaaviin toimenpiteisiin. /13, s. 12 - 15./

Hyvä valvontakortti kertoo nopeasti systemaattisen vaihtelun prosessissa, se ei anna vääriä hälytyksiä, se on yksinkertainen ja helppo käyttää ja auttaa paikantamaan hetken, jolloin muutos prosessissa on tapahtunut. QC-tuloksia voidaan käyttää usealla eri tavalla; asiakas voi saada tuloksista käsityksen laboratorion laadusta ja laboratorio voi käyttää tuloksia mittausepävarmuuden määrittämiseen. /9, s. 25 - 27./

SPC:n avulla seurataan prosesseja, joissa tuotteet valmistetaan. SPC:llä ei seurata tuotteita. Pystyäkseen ottamaan SPC:n käyttöön pitää tuntea tuotantoprosessit, jotka taas jaetaan osaprosesseihin. Kun osaprosessit on tunnistettu, pitää määritellä muuttujat, jotka vaikuttavat valmistettavaan tuotteeseen. Kun mittausmenetelmää suunnitellaan, pitää pyrkiä minimoimaan kaikki ylimääräinen vaihtelu, esimerkiksi työkaluissa. Myös mittausjärjestelmän tarkkuus ja luotettavuus pitää pystyä määrittelemään. SPC:tä käytetäänkin apuna määrittäessä mittausepävarmuutta, joka on käsitelty kappaleessa 3. Tulosten analysoinnin kannalta mittauksia pitäisi suorittaa lähes 100 kappaletta, jotta tuloksia voitaisiin pitää tilastollisesti luotettavana. Valvontarajojen määrittämiseksi olisi hyvä saada mitattua noin 20 kappaleen erä. Näin saadaan minimoitua yksittäisten poikkeavien arvojen vaikutus valvontarajoihin. Jälkeenpäin valvontarajoja ei saa muuttaa. Mikäli prosessi muuttuu, valvontarajat määritellään uudelleen. SPC antaa monia hyötyjä; muutokset prosessissa havaitaan nopeasti ja korjaavat toimenpiteet voidaan aloittaa heti, kriittiset prosessiparametrit löydetään helposti, prosesseille saadaan yhdenmukaiset laatumittarit ja työntekijät saavat nopeasti palautteen työstään. /9, s. 10 - 11./

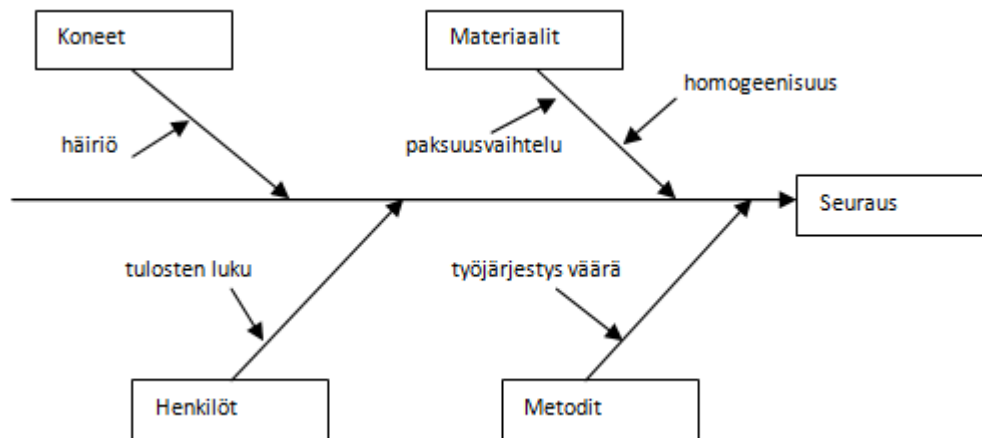
SPC:ssä on seitsemän työkalua:

- Vuokaavio (kuva 1)
 - Vuokaaviossa kuvataan symbolien avulla asioiden etenemistä ja vaiheiden riippuvuuksia toisistaan.
 - Askel askeleelta päästään ongelman ratkaisuun.



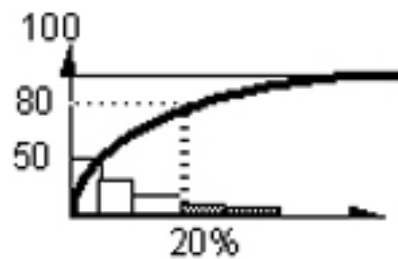
Kuva 1. Vuokaavio

- Syy- ja seurausdiagrammi (kuva 2)
 - Diagrammi osoittaa laatuominaisuuksien ja -tekijöiden välisen suhteen.
 - Diagrammia kutsutaan myös kalanruotokuvioksi.



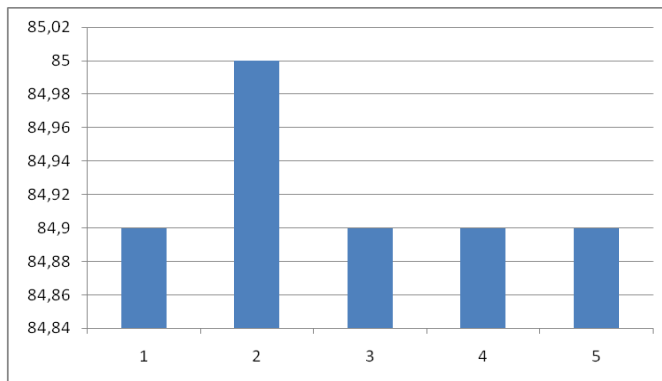
Kuva 2. Kalanruotokuvio

- Pareto-diagrammi (kuva 3)
 - Pareto-diagrammi on tilastollinen tekniikka päätöksentekoon.
 - Diagrammissa pätee 80/20 –sääntö: muutamat tekijät hallitsevat suurta määrää tekijöitä ja pieni osa ongelmatyypeistä synnyttää valtaosan ongelmista.



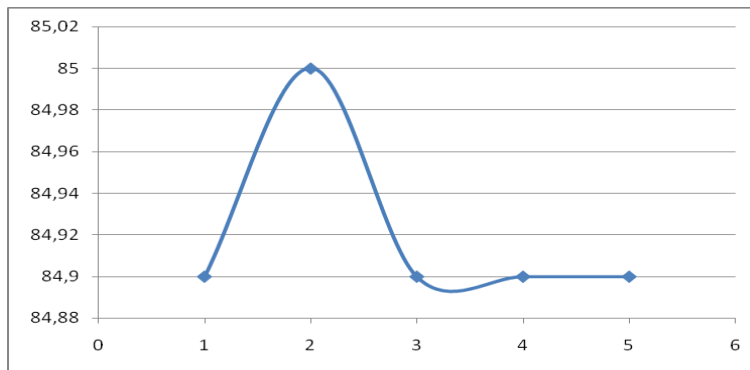
Kuva 3. Pareto-diagrammi

- Syykirjanpito
 - Syykirjanpidossa jokaista laskettua asiaa merkitään pystyviivalla.
 - Syykirjanpitoa kutsutaan myös tukkimiehen kirjanpidoksi.
- Histogrammi (kuva 4)
 - Histogrammi on graafinen esitys tilastollisesta jakaumasta.
 - Se kuvaa vaihtelua.



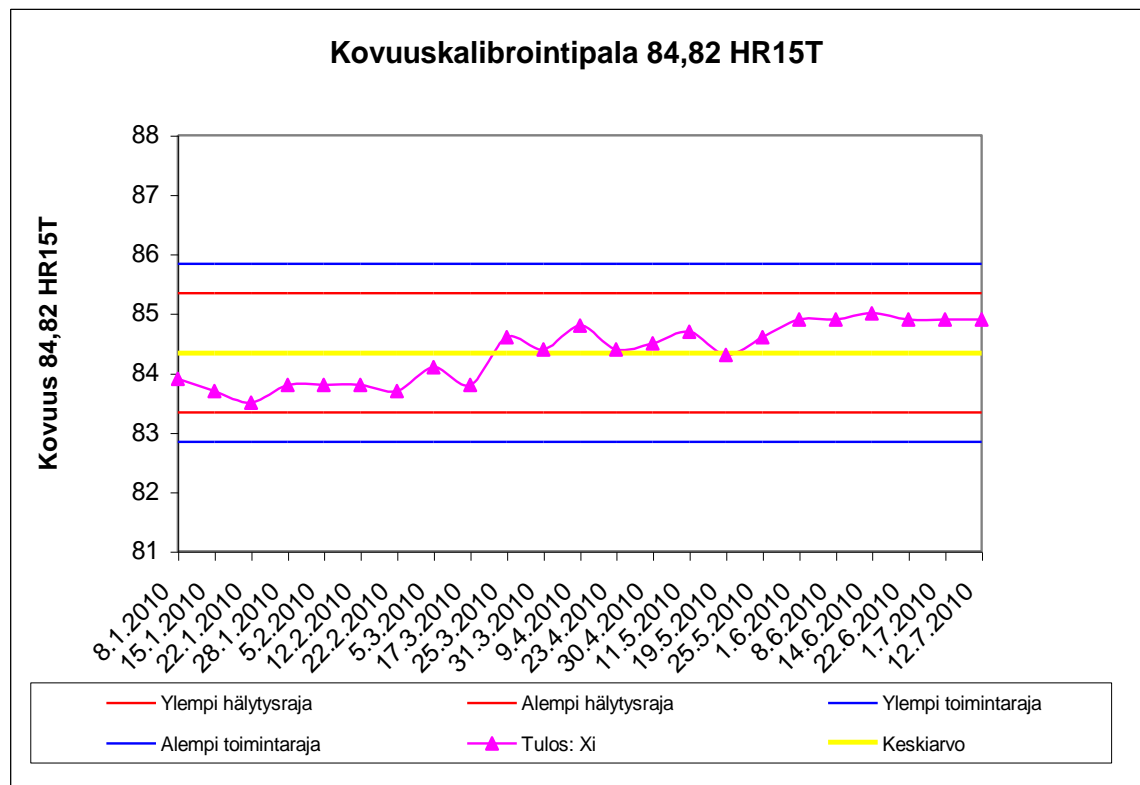
Kuva 4. Histogrammi

- X/y –diagrammi (kuva 5)



Kuva 5. x/y –diagrammi

- Valvontakortti (kuva 6)



Kuva 6. Yleisin laadunvalvontakortti, X-kortti

X-kortissa kalibrointikovuuspalaa 84,82 HR15T on mitattu 8.1. - 12.7. välisellä ajalla. Kaikki tulokset ovat olleet hälytysrajojen (punainen) sisäpuolella. Se kertoo, että tulokset ovat asetettujen rajojen sisällä. Punaisen ja sinisen viivan välinen alue kertoo, että QC-tulokset arvioidaan tarkoin määrättyjen sääntöjen mukaan. Jos tulokset ovat toimintarajojen (sininen) ulkopuolella, on jotakin vialla, eikä tuloksia raportoida.

Valvontarajojen laskukaavat:

- Hälytysrajat $\mu \pm 2\delta$ (1)
- Toimintarajat $\mu \pm 3\delta$
- missä
- μ on tulosten keskiarvo
- δ on keskihajonta

Tuloksista pitäisi olla 95,4 % hälytysrajojen sisäpuolella. Tuloksista on yleensä 99,7 % toimintarajojen sisäpuolella. /7/ , /13/ , s 13 - 15./ , /17/

Benchmarking

Benchmarking on syntynyt Yhdysvalloissa 1980-luvulla Robert C. Campin toimesta. Benchmarking sanalle ei ole suomennosta, siitä voidaan käyttää nimitystä vertailuanalyysi, esikuva-analyysi tai vertaisarviointi. Sana kuvaa vertailua, omien toimintojen vertaamista toisen suorituskäytännön organisaation toimintaan, tarkoituksena parantaa omaa toimintaa. Benchmarking tehdään yhteistyössä. Se sisältää toisen toimintaan tutustumista ja tulosten vertaamista. Benchmarking perusajatuksena on, että vertailemalla omaa kyvykkyyttä muihin tahoihin, syntyy kilpailu, joka parantaa omaa toimintaa. Viime vuosina on kuitenkin keskitytty siihen, että benchmarking virittää yhteistoimintaa ja yhdessä kehittymistä. Parhaassa tapauksessa benchmarking voi luoda yhteisiä projekteja ja työtehtäviä. Benchmarking-toimintaa käytetään laatu- ja prosessikehittämisen välineenä. /6, s. 3 - 15./

Tässä opinnäytetyössä benchmarking sivutaan kappaleessa 7 tulosten tarkastelussa, kun vertaillaan tutkimus- ja laadunvalvontalaboratorion ja Kemi-Tornion amk:n laboratorion välisiä menetelmiä sekä tuloksia.

3. MITTAUSEPÄVARMUUS

Mittausepävarmuus on testaustulokseen liittyvä arvo, joka ilmoittaa rajat, joiden välissä todellinen arvo valitulla todennäköisyydellä on. Rajojen väli vastaa mittausjärjestelmän suorituskykyä. Suuri mittausepävarmuus johtaa tarpeettomiin hylkäämisiin, kalliisiin prosessin kehitystoimenpiteisiin tai hylättävien tuotteiden hyväksymiseen. /[1](#), s. 13 - 14./

Mittausepävarmuus on mittaustulokseen liittyvä parametri, joka kuvaa mittaussuureen arvojen oletettua vaihtelua. Jäljitettävyys on mittaustuloksen tai mittanormalin yhteys ilmoitettuihin referensseihin, yleensä kansallisiin tai kansainvälisiin mittanormaaleihin, sellaisen aukottoman vertailuketjun ylityksellä, jossa on ilmoitettu kaikkien vertailujen epävarmuudet. /[20](#)/

Mittausepävarmuus on jaettu kahteen eri epävarmuustyyppiin.

Tyyppi A

Tyyppin A mittausepävarmuus lasketaan tilastollisia menetelmiä (SPC) käyttäen, esimerkiksi tulosten keskihajontaa. /[8](#), s. 14./

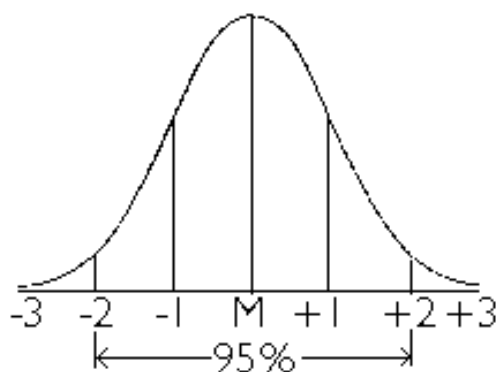
Tyyppi B

Tyyppin B mittausepävarmuusarvio tehdään muilla kuin tilastollisilla analyyseillä. Tyyppin B mittausepävarmuusarviossa otetaan huomioon aikaisemmat kokemukset, kirjallisuustiedot, valmistajan ilmoittamat arvot tai kalibrointitietoja. /[8](#), s. 14./

Mittaustuloksen mittausepävarmuuden arviointiin liittyvät seuraavat vaiheet:

1. Mittaustuloksen määrittely yksityiskohtaisen mittausten menetelmäkaavion avulla: Kirjoitetaan kaavio siitä, mitä mitataan (kaikki mittaustuloksen ja lähtöarvojen väliset riippuvuudet; mitatut suureet, vakiot, kalibrointistandardien arvot) ja tehdään prosessiin kaikki merkittävät korjaukset.
2. Kaikkien mahdollisten epävarmuuslähteiden identifiointi: Selvitetään näytteenotto (ratkaisevin vaihe), vertailumateriaalien käyttö, mittauslaitteiston kalibrointi, analyysi virhelähteistä, tulosten muokkaus, raportointi ja tulkinta.
3. Epävarmuuslähteiden kvantitatiivinen määrittäminen (teoreettiset mallit ja kirjallisuustiedot, standardeista saadut tiedot)
4. Lasketaan epävarmuuskomponentit neliöllisesti yhteen \rightarrow Yhdistetty epävarmuus $u_c \rightarrow$ Laajennettun epävarmuuden laskeminen.

Lopullinen mittaustulokseen liittyvä mittausepävarmuus ilmaistaan yleensä laajennettuna epävarmuutena U , joka saadaan kertomalla yhdistetty epävarmuus u_c kattavuuskertoimella $k = 2$. Tämä vastaa likimain 95 %:n suuruista luotettavuusväliä, eli ilmoitettujen mittausepävarmuusrajojen sisällä on noin 95 % tuloksista. Kattavuuskerrointa $k = 1$ vastaa todennäköisyys, että 68,3 % tuloksista on raja-arvojen sisällä. Kattavuuskerrointa $k = 3$ vastaa todennäköisyys, että 99,7 % tuloksista on raja-arvojen sisällä. Kuvassa 7 on esitetty Gaussin käyrä, joka kuvaa virheiden jakaantumista. /14, s. 1 - 3./



Kuva 7. Virheiden jakaantuminen Gaussin käyrällä

Mittausepävarmuuteen liittyviä termejä:

- Mittausalue; mittaussuureen arvojen joukko, jolla mittauslaitteen virheen tulisi pysyä spesifioiduissa rajoissa.
- Poikkeama; mittauslaitteen näyttämän systemaattinen virhe, joka voi johtua esimerkiksi tulosten väärästä tulkitsemisesta, väärästä kalibroinnista, epäkuntoisesta mittalaitteesta.
- Häiriökestävyys/Toimintavarmuus; tulosten herkkyys pienille muutoksille testausolosuhteissa esim. laboratoriossa, henkilökunnassa, lämpötilassa.
- Toistettavuus; saman mitattavan suureen peräkkäisten mittaustulosten paikkansapitävyys, kun mittaukset suoritetaan samoissa olosuhteissa ja saman mittaajan toimesta.
- Uusittavuus; saman mittaussuureen mittaustulosten yhtäpitävyys, kun mittaukset suoritetaan muuttuneissa olosuhteissa, esimerkiksi mittaajan vaihtuessa. /11, s. 7 - 39./

Mittausepävarmuus on prosessien tulosta ja sen vaihtelua selvitetään mittaamalla. Tarkallakin mittausmenetelmällä saadaan vain likiarvo. Mitatun tuloksen vaihtelussa on myös mittausjärjestelmän aiheuttamaa vaihtelua. Mittausjärjestelmän suorituskyky vaikuttaa siihen, kuinka luotettava kuva saadaan prosessista ja tuotteesta. Mittausepävarmuus halutaan tietää monesta eri syystä: ulkopuolisten vaatimuksesta, prosessin tehokas ohjattavuus on vaikeaa ilman tarkkoja mittoja ja ei tiedetä, mistä vaihtelu tulee, tuotteesta vai mittauksesta. /19/

Mittausepävarmuuden määrittämiseksi on kaksi mahdollista tapaa, menetelmä 1 (M1), johon ei sisälly virhettä ja menetelmä 2 (M2), johon virhe sisältyy. Ensimmäinen menetelmä perustuu kaikkien suorassa kalibroinnissa esiintyvien olennaisten tekijöiden arviointiin. Kovuusmittarin systemaattista virhettä ei huomioida. Toinen menetelmä perustuu epäsuoraan varmentamiseen käyttämällä vertailukovuuspalaa. Menetelmässä 2 on useampi kuin yksi mittaussarja. Menetelmässä 2 virheen oletetaan olevan systemaattinen. Kaikki määritetyt kovuusarvot korjataan virheellä b tai vaihtoehtoisesti epävarmuutta U_{corr} kasvatetaan virheen b verran. Kaikkia epävarmuustekijöitä ei ole aina mahdollista

määrittää. Kun mittaustulokset esitetään, pitäisi aina ilmoittaa käytetty menetelmä (M1 tai M2). Yleisimmin käytetään menetelmää 1. /28, s. 32 - 40./

Pahimmassa tapauksessa mittausepävarmuus johtaa hyvien tuotteiden hylkäämiseen, turhaan kehittämiseen tai huonojen tuotteiden hyväksymiseen. Mittausepävarmuus voi johtaa myös siihen, että ei huomata muutoksia mitattavassa kohteessa ja kuvitellaan prosessin olevan parempi kuin mitä se on. /19./

Luotettavien mittausten perusedellytys on toistuvat mittaukset. Mittaustulos on tällöin mittaustulosten keskiarvo. Mittalaitteet on kalibroitava säännöllisesti ja kalibrointien aukottomuus pitää pystyä todistamaan. Laboratorion on kyettävä osoittamaan tulostensa laatu. Asiakkaan vaatimuksista riippuen joko tulosten hajonta tai mittausepävarmuus on tärkeä laatumuuttuja. Laboratorion sisäinen uusittavuus kertoo asiakkaalle mahdollisen vaihtelun tuloksissa, jos sama näyte analysoidaan eri ajankohtina. Mittausepävarmuus kertoo asiakkaalle tuloksen suurimman mahdollisen poikkeaman vertailuarvosta tai muiden laboratorioden samasta näytteestä saamien tulosten keskiarvosta. /37, s. 1 - 24./

Kalibrointi

Mittavälineen kalibrointi suoritetaan mittausten jäljitettävyyden parantamiseksi. Kalibrointitulokset kertovat tuloksen luotettavuudesta ja epävarmuudesta. Ilman kalibrointia, tulosta ei voida pitää jäljitettävänä eikä tulosta voi verrata aikaisempiin tuloksiin. Jäljitettävyyden keskeisiä seikkoja ovat vertailumateriaalit, vertailumittaukset, menetelmien validointi ja mittausepävarmuuden määrittäminen. Mittalaite kalibroidaan vertaamalla lukemaa tarkempaan mittalaitteeseen, jonka epävarmuus tunnetaan. Myös kalibrointiin tulee liittyä epävarmuuslaskelma. Ennen kalibroinnin aloittamista määritellään mittaustarve sekä vaadittu tarkkuus. Lisäksi selvitetään, mitkä mittaukset vaikuttavat tuotteen laatuun. Jotta luotettava mittaustulokset pystytään rakentamaan, on mittaauksessa käytettävistä laitteista oltava riittävän hyvä yleiskuva. Lisäksi täytyy tietää, mitä virhetekijöitä käytetyillä mittaustyypeillä on, kuten esimerkiksi miten ympäristöolosuhteet vaikuttavat tulokseen tai mittaajien ammattitaito. Kalibroinnin avulla

saadaan varmistettua jäljitettävyys ja määritettyä mittausepävarmuus. Kalibrointituloksella taataan, että mitatut tulokset ovat oikeita. Aluksi kalibrointeja on hyvä tehdä useammin, jotta mittaustarkkuus saadaan varmennettua. Tämän lisäksi vertailumittauksia pitää tehdä riittävästi ja tulokset kirjata talteen myöhempää tarvetta varten. /[8](#), s. 1 - 6./ , /[10](#)/ , /[22](#), s. 32 - 38./

4. LAADUNVALVONTATESTIT

Teräslaaduille tehdään koko prosessin ajan erilaisia testejä. Sulasta otetaan laadutusnäytteet, näytteistä tarkistetaan alkuainepitoisuuksia. Analyysien avulla selviää, täyttääkö teräslaatu sille asetetut vaatimukset. Lisäksi otetaan tarkistusnäytteitä, joista tarkistetaan mm. asiakkaan vaatimuksia. Muita testejä, joita teräslajeille tehdään, ovat mm. raekokotesti, kappleanalyysi, kovuuskoe, vetokoe, kuumavetokoe ja iskukoe. Tässä työssä käsitellään ainoastaan rikkovia testejä kovuuskoetta, vetokoetta ja iskukoetta.

4.1. Kovuuskoe

Kovuuskoe on nopea tapa määrittää materiaalin ominaisuuksia. Kovuus on materiaalin mekaaninen ominaisuus, kyky vastustaa muodonmuutosta naarmuuntumista, kulumista ja leikkaantumista. Metalliseosten kovuuteen vaikuttavat seosaineet, kylmämuokkausaste, lämpö- ja pintakäsittely. Kovuudella on monia mittaustapoja, joista tärkeimmät ovat Rockwell, Brinell, Vickers ja Mohs. Kovuusmittaukset eivät anna kertamittauksella luotettavaa tulosta, vaan tuloksia täytyy käsitellä tilastollisesti. Rockwell-kovuutta voidaan verrata Brinell- ja Vickers-kovuuksiin muuntotaulukoita käyttämällä. /3, s. 1 - 5./ , /23, s. 12 - 26./

4.1.1. Suora varmentaminen

Kovuusmittarin toimintojen varmentamiseksi standardi esittää suoraa varmentamismenetelmää. Suoraan menetelmään kuuluu koevoiman kalibrointi, painikärjen varmentaminen, painuman syvyyden mittalaitteen kalibrointi ja mittausaikojen varmentaminen. /25, s. 12 - 13./ , /29, s. 10 - 14/ , /33, s. 10 - 16./

4.1.2. Epäsuora varmentaminen

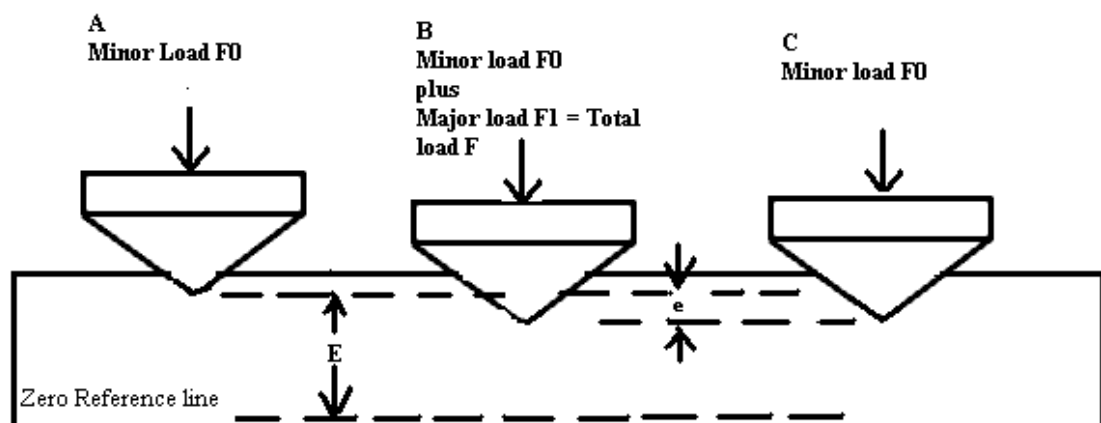
Epäsuora varmentaminen tulisi tehdä jokaisella käytettävällä asteikolla. Standardissa SFS-EN ISO 6508-2 on esitetty Rockwellin kovuusasteikkojen kovuusalueet, standardissa 6507-2 on ohjeita Vickersin menetelmälle ja standardissa 6506-2 on ohjeita Brinellin menetelmälle. Epäsuoralla varmentamisella selvitetään mittausten toistettavuus ja virhe. Edellä esitetyistä standardeista selviää kovuusmittarin sallittu toistettavuus ja virhe.

Epäsuora varmentaminen pitää tehdä vähintään 12 kuukauden välein ja aina suoran varmentamisen jälkeen. /25, s- 14 – 17./, /29, s. 14 - 18./, /33, s. 16 - 20./

4.1.3. Mittausepävarmuuden määrittäminen Rockwellin menetelmälle

Rockwellin mittaus perustuu kovuuden mittaamisen painuman syvyyden perusteella.

Kuvassa 8 on esitetty Rockwellin menetelmän periaate: A) kärki asetetaan mitattavalle pinnalle enintään 3 sekunniksi esivoimalla, jolloin muodostuu painuman syvyys \rightarrow B) lisätään voimaa F_1 1 - 8 sekunnin kuluessa ja saavutetaan kokonaisvoima F , jolloin muodostuu painuman syvyyden lisäys lisävoiman F_1 vaikuttaessa \rightarrow C) lisävoima F_1 poistetaan, jolloin kimmainen palautuminen tapahtuu ja esivoima F_0 jää vaikuttamaan \rightarrow luetaan lopullinen lukema, kovuusarvo.



Kuva 8. Rockwellin menetelmän periaate

Pintakovuuskokeessa käytetään timanttikärkeä tai teräskuulaa. Teräskuulaa käytetään pehmeille materiaaleille ja timanttikärkeä koville materiaaleille. Teräskuulaa käytetään menetelmillä HR15T, HR30T ja HRB. Timanttikärjellä mitattaessa käytetään menetelmiä HR15N, HR30N ja HRC.

Rockwellin kovuuden esitystapa on 84,82 HR15T, jossa 84,82 kertoo Rockwellin kovuuden, HR kovuuden tunnuksen, 15T asteikon tunnuksen.

Rockwellin menetelmä soveltuu rutiinimittauksiin. Rockwellin etuja ovat nopeus, tarkkuus ja tuloksen riippumattomuus mittaajasta. /12, s. 8 - 9./

Kovuusmittari tulisi tarkistaa vähintään kerran jokaisena käyttöpäivänä ja mikäli mittalaite ei läpäise koetta, tulisi aloittaa korjaavat toimenpiteet. Mittaustulokset pitää säilyttää ja niitä tulisi käyttää kovuusmittarin uusittavuuden ja ryöminän seurantaan. /2, s. 4 - 7./

Alla olevassa taulukossa 1 on käsitelty mittausepävarmuuden määrittämiseen käytettävät tunnuksat ja kaavat, joita tarvitaan, kun halutaan varmentaa kovuusmittarin toimintaa Rockwellin menetelmälle epäsuoralla varmentamisella.

Taulukko 1. Rockwellin menetelmän tunnuksat/32, s. 40 - 45./ , /33, s. 32 - 36./ , /34, s. 2 - 11./

u_E	Standardiepävarmuus suurimman sallitun virheen mukaisesti		$u_E = \frac{u_{E,2r}}{2,8}$, standardi ISO 6508-2:2005, taulukko 5.
\bar{H}	Mittaustulosten keskiarvo		Viiden mittauksen keskiarvo
s_H	Keskihajonta		$s_H = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2}$
U_{CRM}	Vertailupalan mittausepävarmuus		Kalibroitodistuksesta, esim +/- 0,86
\bar{X}_{CRM}	Kovuus kalibroitodistuksen mukaisesti		esim. 84,82

u_{CRM}	Vertailukovuuspalan mittausepävarmuus/2		$\frac{U_{CRM}}{2}$ ($k = 2$)
δ_{ms}	Kovuusmittarin lukemistarkkuus	0,1	μm , (ilmoitettu standardissa, SFS käsikirja 52-2, s.372)
u_{ms}	Kovuusmittarin lukemistarkkuudesta johtuva epävarmuus	0,029	$\frac{\delta_{ms}}{2\sqrt{3}}$ (SFS käsikirja 52-2, s. 372)
t	Tasaantumisaika	1,14	(SFS käsikirja 52-2, s. 372)
s_x	Koekappaleen mittausten keskihajonta		$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$
u_x	Standardiepävarmuus mitattaessa koekappaletta		$u_{\bar{x}} = \frac{t^* s_x}{\sqrt{n}}$ Lasketaan jos mitataan koesarjoja
u_H	Kovuusmittarin standardiepävarmuus mitattaessa vertailukovuuspalaa		$u_{\bar{H}} = \frac{t^* s_H}{\sqrt{n}}$
\bar{b}	Kovuusmittarin poikkeama kalibroidusta arvosta		$\bar{b} = \bar{H} - \bar{X}_{CRM}$
s_b	Poikkeaman b keskihajonta		$s_b = \sqrt{\frac{1}{n_m - 1} \sum_{i=1}^{n_m} (b_i - \bar{b})^2}$
u_b	Poikkeaman b määrittämisen standardiepävarmuus, voidaan määrittää vasta toisen mittaussarjan jälkeen		$n_m =$ mittaussarjojen lkm $u_b = \frac{t^* s_b}{\sqrt{n_m}}$
u_{HTM}	Yhdistetty mittaasepävarmuus		$\sqrt{u_E^2 + u_{CRM}^2 + u_H^2 + u_x^2 + u_{ms}^2}$
U_{HTM}	Laajennettu mittaasepävarmuus		$2 * u_{HTM}$ ($k = 2$)
U_{corr}	Korjatun laajennetun epävarmuuden määrittäminen		$U_{corr} = k * \sqrt{u_{CRM}^2 + u_H^2 + u_{\bar{x}}^2 + u_{ms}^2 + u_b^2}$

Taulukossa 2 on ohje kovuusmittarin poikkeaman laskemiseen. Alla olevan laskelman avulla selvitetään, täyttääkö mittaasepävarmuuden sisältävä kovuusmittarin poikkeama sille esitetyn enimmäisvaatimuksen vaatimuksen. Kovuusmittarin sallittu toistettavuus ja virhe on ilmoitettu SFS-EN ISO 6508-2 standardissa taulukossa 5. Taulukko on liitteessä 1 (1/2).

Taulukko 2. Kovuusmittarin poikkeaman laskenta sisältäen mittausepävarmuuden
/32, s. 40 - 45./, /33, s. 32 - 36./, /34, s. 2 - 11./

Laajennettu mittausepävarmuus	Kovuusmittarin poikkeama kalibroitaessa vertailukovuuspaloilla	Kovuusmittarin suurin poikkeama sisältäen mittausepävarmuuden
U_{HTM}	\bar{b}	$U_{HTM} + \bar{b}$

4.1.3.1. Menetelmä 1 Rockwell

Menetelmä 1 Rockwell:

- On yksinkertaistettu menetelmä.
- Kovuusmittarin systemaattista virhettä ei huomioida.
- Laajennettu mittausepävarmuus U_{HTM} lasketaan kaavalla 2.

$$U_{HTM} = k * \sqrt{u_E^2 + u_{CRM}^2 + u_H^2 + u_x^2 + u_{ms}^2} \quad (2)$$

Mittaustulos: $X = x \pm U$

missä

$k = 2$

u_E on standardiepävarmuus suurimman sallitun virheen mukaisesti

u_{CRM} on puolet vertailukovuuspalan mittausepävarmuudesta

u_H on kovuusmittarin standardiepävarmuus

u_x on standardiepävarmuus mitattaessa koekappaletta

u_{ms} on kovuusmittarin lukemistarkkuudesta johtuva epävarmuus

x on mittaustulosten keskiarvo /16, s. 64 - 71./, /32, s. 40 - 45./, /33, s. 32 - 36./, /34, s. 2 - 11/.

Esimerkki mittaasepävarmuudesta menetelmällä 1. Esimerkissä on käytetty taulukon 3 arvoja:

Taulukko 3. Ensimmäisen mittaussarjan tulokset

84,82	HR15T	+/-	0,86
-------	-------	-----	------

Mittausten lkm	Tulos: Xi	Xi - H	(Xi - H) ²
1	84,9	-0,02	0,0004
2	85,0	0,08	0,0064
3	84,9	-0,02	0,0004
4	84,9	-0,02	0,0004
5	84,9	-0,02	0,0004
Summa:	424,6	0,00	0,008
Keskiarvo H:	84,92		

$$u_E = \frac{3}{2,8} = 1,07 \text{ (B tyyppi)}$$

$$u_{CRM} = \frac{0,86}{2} = 0,43 \text{ (B tyyppi)}$$

$$u_H = \frac{1,14 * 0,045}{\sqrt{5}} = 0,0229 \text{ (A tyyppi)}$$

$$u_{ms} = \frac{0,1}{2\sqrt{3}} = 0,0289 \text{ (B tyyppi)}$$

u_x = ei huomioitu laskennassa, koska ei mitata koesarjoja (A tyyppi)

$$U_{HTM} = \pm 2,30$$

$$\text{Mittaustulos} = 84,92 \pm 2,30 \text{ HR (M1)}$$

4.1.3.2. Menetelmä 2 Rockwell

Menetelmä 2 Rockwell:

- Voidaan suorittaa vasta toisen mittaussarjan jälkeen.
- Voi johtaa pienempiin epävarmuuden arvoihin.
- Perustuu GUM:iin.
- Virheraja u_E ei sisälly epävarmuuden laskentaan.
- Korjattua epävarmuutta U_{corr} on kasvatettava virheen b verran.
- Korjattu mittaasepävarmuus U_{corr} lasketaan kaavalla 3.

$$U_{\text{corr}} = k * \sqrt{u_{\text{CRM}}^2 + u_{\text{H}}^2 + u_{\text{x}}^2 + u_{\text{ms}}^2 + u_{\text{b}}^2} \quad (3)$$

$$\text{Mittaustulos: } X_{\text{corr}} = (x + \bar{b}) \pm U_{\text{corr}}$$

missä

$$k = 2$$

u_{CRM} on puolet vertailukovuuspalan mittaasepävarmuudesta

u_{H} on kovuusmittarin standardiepävarmuus

u_{x} on standardiepävarmuus mitattaessa koekappaletta

u_{ms} on kovuusmittarin lukemistarkkuudesta johtuva epävarmuus

u_{b} on poikkeaman b määrittämisen standardiepävarmuus

x on mittaustulosten keskiarvo

Alla on laskettu mittaasepävarmuus menetelmällä 2. Esimerkissä on käytetty taulukossa 4 olevia lukuja.

Taulukko 4. Ensimmäisen mittaussarjan tulokset

Kovuuskalibrointipala	84,82	HR15T	+/-	0,86
------------------------------	--------------	--------------	------------	-------------

Mittausten lkm	Tulos X_i :	$X_i - H$	$(X_i - H)^2$
1	84,9	-0,02	0,0004
2	85,0	0,08	0,0064
3	84,9	-0,02	0,0004
4	84,9	-0,02	0,0004
5	84,9	-0,02	0,0004
Summa	424,6	0	0,008
Keskiarvo H	84,92		

Mittausten lkm	Tulos X_i :	$X_i - H$	$(X_i - H)^2$
1	84,9	0,00	0,0
2	84,9	0,00	0,0
3	84,9	0,00	0,0
4	84,9	0,00	0,0
5	84,9	0,00	0,0
Summa	424,5	0	0
Keskiarvo H	84,90		

$$u_{\text{CRM}} = 0,43$$

$$u_{\text{H}} = 0,0229$$

u_x = käytetään mitattaessa koekappaletta

$$u_{\text{ms}} = 0,0289$$

$$u_b = 0,0141$$

$$U_{\text{corr}} = 0,86$$

Mittaustulos korjatulla keskiarvolla:

$$\text{Mittaustulos: } X_{\text{corr}} = (84,92 + 0,1) \pm 0,86$$

$$X_{\text{corr}} = 85,02 \pm 0,86 \text{ HR (M2)}$$

Mittaustulos korjatulla epävarmuudella:

$$\bar{X}_{ucorr} = \bar{x} \pm (U_{corr} + |\bar{b}|)$$

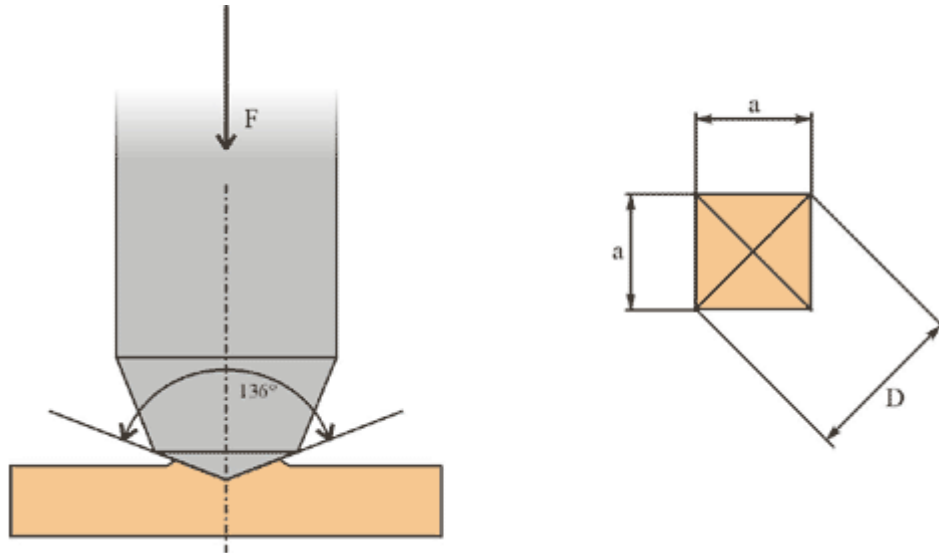
$$X_{ucorr} = 84,92 \pm 0,96 \text{ HR (M2)}$$

Mittaustuloksia esitettäessä käytetty menetelmä tulee ilmoittaa. Yleisesti käytetään menetelmää 1. Tuloksista voidaan todeta, että menetelmällä 2 mittausepävarmuus on parempi. Molemmissa menetelmissä mittaustulokset ovat hyväksyttäviä, sillä standardin SFS-EN ISO 6508-2 mukaan sallittu virhe on ± 3 HRT. Taulukko on liitteessä 1. /15, s. 1 - 6./

4.1.4. Mittausepävarmuuden määrittäminen Vickersin menetelmälle

Kovuutta mitataan laitteistolla, jossa tylpän pyramidin muotoinen timanttikärki painaa tietyllä voimalla materiaaliin painona 1 - 100 kg:n massa, kuten kuvassa 9. Paino pidetään 10 - 15 sekunnin ajan. Kuvion mitat mitataan mikroskoopilla ja useiden/kolmen mittausten perusteella lasketaan keskiarvo. Vickers-menetelmällä voidaan mitata austeniittista, ferriittistä ja martensiittista terästä. Brinell ja Vickers ovat samalla kovuusasteikolla. Vickersin kovuus lasketaan massa jaettuna kuvion pinta-alalla.

Vickersin kovuuden esitystapa on seuraava: 235 HV 5, jossa 235 kertoo Vickersin kovuuden arvon, HV on kovuuden tunnus ja 5 on koevoiman likimääräinen suuruus kilogrammavoimana. /12, s. 9 - 10./, /28, s. 10-14./



Kuva 9. Vickers -menetelmän periaate /12, s. 9./

Alla olevassa taulukossa 5 on käsitelty mittausepävarmuuden määrittämiseen käytettävät tunnuksat ja kaavat, joita tarvitaan, kun halutaan varmentaa kovuusmittarin toimintaa Vickersin menetelmälle epäsuoralla varmentamisella.

Taulukko 5. Vickersin menetelmän tunnuksat ja kaavat /28, s. 34 - 39./, /29, s. 12 - 20./, /30, s. 1 - 8./, /31, s. 10 - 125./

u_E	Standardiepävarmuus suurimman sallitun virheen mukaisesti		$u_E = \frac{u_{E,2r} * \bar{x}_{CRM}}{2,8}$ <p>Sallittu virhe standardin ISO 6507-2:2005 taulukon 5 mukaisesti, x_{CRM} kalibrointitodistuksesta</p>
\bar{H}	Mittaustulosten keskiarvo		Viiden mittauksen keskiarvo
s_H	Keskihajonta		$s_H = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2}$

U_{CRM}	Vertailupalan mittausepävarmuus		Kalibroitodistuksesta
\bar{X}_{CRM}	Kovuus kalibroitodistuksen mukaisesti		
u_{CRM}	Vertailukovuuspalan mittausepävarmuus/2		$\frac{U_{CRM}}{2}$ (k = 2)
δ_{ms}	Kovuusmittarin lukemistarkkuus	0,0001	mm, (ilmoitettu standardissa, SFS käsikirja 52-2)
u_{ms}	Kovuusmittarin lukemistarkkuudesta johtuva epävarmuus		$\frac{2H}{d} * \frac{\delta_{ms}}{2\sqrt{3}}$ (SFS käsikirja 52-2, s. 148)
t	Tasaantumisaika	1,14	(SFS käsikirja 52-2, s. 147)
s_x	Koekappaleen mittausten keskihajonta		$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$
u_x	Standardiepävarmuus mitattaessa koekappaletta		$u_x = \frac{t * s_x}{\sqrt{n}}$ Lasketaan jos mitataan koesarjoja
\bar{b}	Kovuusmittarin poikkeama kalibroidusta arvosta		$\bar{b} = \bar{H} - \bar{X}_{CRM}$
s_b	Poikkeaman b keskihajonta		$s_b = \sqrt{\frac{1}{n_m - 1} \sum_{i=1}^{n_m} (b_i - \bar{b})^2}$
u_b	Poikkeaman b määrittämisen standardiepävarmuus, voidaan määrittää vasta toisen mittausarjan jälkeen		$n_m =$ mittausarjojen lkm $u_b = \frac{t * s_b}{\sqrt{n_m}}$
u_H	Kovuusmittarin standardiepävarmuus mitattaessa vertailukovuuspalaa		$u_H = \frac{t * s_H}{\sqrt{n}}$
u_{HTM}	Yhdistetty mittaasepävarmuus		$u_{HTM} = \sqrt{u_E^2 + u_{CRM}^2 + u_H^2 + u_x^2 + u_{ms}^2}$
U_{HTM}	Laajennettu mittaasepävarmuus		$U_{HTM} = 2 * u_{HTM}$ (k = 2)
U_{corr}	Korjatun laajennetun epävarmuuden määrittäminen		$U_{corr} = k * \sqrt{u_{CRM}^2 + u_H^2 + u_x^2 + u_{ms}^2 + u_b^2}$

Taulukko 6. Kovuusmittarin poikkeaman laskenta sisältäen mittausepävarmuuden
/28, s. 34 - 39./, /29, s. 12 - 20./, /30, s. 1 - 8/, /31, s. 10 - 125./

Laajennettu mittausepävarmuus	Kovuusmittarin poikkeama kalibroitaessa vertailukovuuspalloilla	Kovuusmittarin suurin poikkeama sisältäen mittausepävarmuuden
U_{HTM}	\bar{b}	$U_{HTM} + \bar{b}$

Taulukossa 6 on ilmoitettu kovuusmittarin poikkeama, jota käytetään ilmoitettaessa laajennettu mittausepävarmuus U.

4.1.4.1. Menetelmä 1 Vickers

Esimerkki mittausepävarmuudesta menetelmällä 1. Esimerkissä on käytetty taulukon 7 arvoja. Tähän menetelmään ei sisälly kovuusmittarin aiheuttamaa virhettä tuloksessa.

Taulukko 7. Vickersin mittausten tulokset

Kovuuspala HV5 235 +/- 3,34			
mittausten lkm.	tulos Xi	Xi - H	(Xi - H) ²
1	235,0	0,5	0,25
2	235,0	0,5	0,25
3	232,3	-2,2	4,84
4	235,3	0,8	0,64
5	234,7	0,2	0,04
Summa:	1172,3	0,0	6,02
Keskiarvo H:	234,46		

$$U_{HTM} = 2 * \sqrt{u_E^2 + u_{CRM}^2 + u_H^2 + u_x^2 + u_{ms}^2}$$

$$u_E = \frac{0,03 * 235}{2,8} = 2,518(\text{B tyyppi})$$

$$u_{CRM} = \frac{3,34}{2} = 1,670(\text{B tyyppi})$$

$$u_H = \frac{1,14 * 1,227}{\sqrt{5}} = 0,626 \text{ (A tyyppi)}$$

$$u_{ms} = \frac{2\bar{H}}{d} * \frac{\delta_{ms}}{2\sqrt{3}} = \frac{234,46}{0,198} * \frac{0,0001}{2\sqrt{3}} = 0,034 \text{ (B-tyyppi) /31, s. 74./}$$

$$U_{HTM} = 6,17$$

Mittaustulos = $234,5 \pm 6,17 \text{ HV} \rightarrow 2,63 \% \text{ (M1)}$

4.1.4.2. Menetelmä 2 Vickers

Esimerkki mittausepävarmuudesta menetelmällä 2. Esimerkissä on käytetty taulukon 8 tuloksia. Tähän menetelmään sisältyy kovuusmittarista johtuva virhe.

Taulukko 8. Vickersin ensimmäisen ja toisen mittauskerran tulokset

Kovuuspala HV5 235 +/- 3,34			
mittausten lkm.	tulos Xi	Xi - H	(Xi - H) ²
1	235,0	0,54	0,29
2	235,0	0,54	0,29
3	232,3	-2,16	4,67
4	235,3	0,84	0,71
5	234,7	0,24	0,06
Summa:	1172,3	0,0	6,02
Keskiarvo H:	234,46		

Kovuuspala HV5 235 +/- 3,34			
mittausten lkm.	tulos Xi	Xi - H	(Xi - H) ²
1	234,0	-0,02	0,0004
2	234,3	0,32	0,1024
3	233,0	-0,98	0,9604
4	233,3	-0,68	0,4624
5	235,3	1,32	1,7424
Summa:	1169,9	-0,04	3,27
Keskiarvo H:	233,98		

$$U_{corr} = k * \sqrt{u_{CRM}^2 + u_H^2 + u_x^2 + u_{ms}^2 + u_b^2}$$

u_H laskennassa käytetään suurempaa arvoista s_{H1} ja s_{H2}

$$s_b = \sqrt{\frac{1}{n_m - 1} \sum_{i=1}^{n_{m1}} (b_i - \bar{b})^2}$$

$$s_b = 0,339$$

$$u_b = \frac{t * s_b}{\sqrt{n_m}} = \frac{1,84 * 0,339}{\sqrt{2}} = 0,441$$

$$U_{corr} = 3,67$$

Mittaustulos korjatulla keskiarvolla: $\bar{X}_{corr} = (\bar{x} + \bar{b}) \pm U_{corr}$

$$\bar{X}_{corr} = 235,0 \pm 3,67 \text{ HV} \rightarrow 1,56 \% \text{ (M2)}$$

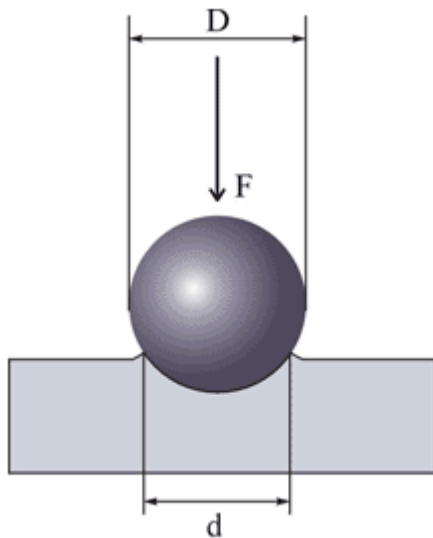
Mittaustulos korjatulla epävarmuudella: $\bar{X}_{ucorr} = \bar{x} \pm (U_{corr} + |\bar{b}|)$

$$\bar{X}_{ucorr} = 234,2 \pm 4,45 \text{ HV} \rightarrow 1,90 \% \text{ (M2)}$$

Kovuusmittari täyttää standardin SFS-EN ISO 6507-2 sille asettamat vaatimukset. Standardin mukaan virhe saa olla HV5:lla enintään 3 %. Taulukko on liitteessä 1 (2/2).

4.1.5. Mittausepävarmuuden määrittäminen Brinellin menetelmälle

Brinellin kovuuskoe on kehitetty vuonna 1900, sen kehitti tohtori J.A. Brinell. Brinellin kovuusmittausmenetelmä soveltuu epähomogeenisille materiaaleille, koska tämä menetelmä jättää iso mittausjäljen. Kovuuden mittauksissa käytetään teräspalloa kovuuksiin 450 HB saakka ja siitä eteenpäin kovametallipalloa 650 HBW saakka. Brinellin kovuuden esitystapa on seuraavanlainen 132 HBW 1/30, jossa 132 on Brinellin kovuuden arvo, HBW kovuuden tunnus, 1 on kuulan halkaisija millimetreinä ja 30 on kovuuden likimääräinen suuruus kilogrammavoimana. Brinellin kovuuskokeessa paininkärki, teräspallo, jonka halkaisija on D , painetaan koekappaleen pintaan. Painuman halkaisija d mitataan koevoiman F poistamisen jälkeen. Brinellin menetelmän periaate selviää kuvasta 10. /12, s. 8./ , /24, s. 10 - 14./



Kuva 10. Brinellin menetelmän periaate /12, s. 8./

Taulukossa 9 on käsitelty mittausepävarmuuden määrittämiseen käytettävät tunnuksat ja kaavat, joita tarvitaan, kun halutaan varmentaa kovuusmittarin toimintaa Brinellin menetelmälle epäsuoralla varmentamisella.

Taulukko 9. Brinellin menetelmän tunnuksset /24, s. 26 - 31./ , /25, s. 12 - 16./ , /26, s. 1 - 8./, /27, s. 10 - 19./

\bar{H}	Mittaustulosten keskiarvo,		Viiden mittauksen keskiarvo
s_H	Keskihajonta		$s_H = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2}$
u_E	Standardiepävarmuus suurimman sallitun virheen mukaisesti		$u_E = \frac{u_{E,2r} * \bar{x}_{CRM}}{2,8}$ Sallittu virhe standardin ISO 6507-2:2005 taulukon 5 mukaisesti, \bar{x}_{CRM} kalibrointitodistuksesta
U_{CRM}	Vertailupalan mittaasepävarmuus		Kalibrointitodistuksesta
\bar{X}_{CRM}	Kovuus kalibrointitodistuksen mukaisesti		
u_{CRM}	Vertailukovuuspalan mittaasepävarmuus/2		$\frac{U_{CRM}}{2}$ (k = 2)
δ_{ms}	Kovuusmittarin lukemistarkkuus	1,00	1 mm, (ilmoitettu standardissa, SFS käsikirja 52-2, s. 36)
u_{ms}	Standardiepävarmuuspituuden mittalaitteen resoluution mukaisesti	0,29	$\frac{\delta_{ms}}{2\sqrt{3}}$ (SFS käsikirja 52-2, s. 36), $\delta_{ms} = 1$ HBW
t	Tasaantumisaika	1,14	(SFS käsikirja 52-2, s. 147)
s_x	Koekappaleen mittausten keskihajonta		$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$
u_x	Standardiepävarmuus mitattaessa koekappaletta		$u_x = \frac{t * s_x}{\sqrt{n}}$
\bar{b}	Kovuusmittarin poikkeama kalibroidusta arvosta		$\bar{b} = \bar{H} - \bar{X}_{CRM}$
s_b	Poikkeaman b keskihajonta		$s_b = \sqrt{\frac{1}{n_m-1} \sum_{i=1}^{n_m} (b_i - \bar{b})^2}$
u_b	Poikkeaman b määrittämisen standardiepävarmuus, voidaan määrittää vasta toisen mittaussarjan jälkeen		$n_m =$ mittaussarjojen lkm $u_b = \frac{t * s_b}{\sqrt{n_m}}$

u_H	Kovuusmittarin standardiepävarmuus mitattaessa vertailukovuuspalaa		$\frac{t^* s_H}{\sqrt{n}}$
u_{HTM}	Yhdistetty mittaasepävarmuus		$\sqrt{u_E^2 + u_{CRM}^2 + u_H^2 + u_x^2 + u_{ms}^2}$
U_{HTM}	Laajennettu mittaasepävarmuus		$2 * u_{HTM} \quad (k = 2)$
U_{corr}	Korjatun laajennetun epävarmuuden määrittäminen		$U_{corr} = k * \sqrt{u_{CRM}^2 + u_H^2 + u_{\bar{x}}^2 + u_{ms}^2 + u_b^2}$

Taulukko 10. Kovuusmittarin poikkeaman laskenta sisältäen mittaasepävarmuuden
/24, s. 26 - 31./ , /25, s. 12 - 16./ , /26, s. 1 - 8./ , /27, s. 10 - 19./

Laajennettu mittaasepävarmuus	Kovuusmittarin poikkeama kalibroitaessa vertailukovuuspalloilla	Kovuusmittarin suurin poikkeama sisältäen mittaasepävarmuuden
U_{HTM}	\bar{b}	$U_{HTM} + \bar{b}$

Taulukossa 10 on ilmoitettu kovuusmittarin poikkeama, jota käytetään ilmoitettaessa laajennettu mittaasepävarmuus U (menetelmä 2).

4.1.5.1. Menetelmä 1 Brinell

Esimerkki mittaasepävarmuudesta menetelmällä 1., Laskennassa on käytetty taulukon 11 tuloksia. Tähän menetelmään ei sisälly kovuusmittarista johtuvaa virhettä.

Taulukko 11. Brinellin kovuusmittauksen tulokset

Kovuus pala HB30 132 +/- 2,3			
mittausten lkm.	tulos Xi	Xi - H	(Xi - H) ²
1	131,7	-0,2	0,0256
2	132,3	0,4	0,1936
3	132,3	0,4	0,1936
4	131,7	-0,2	0,0256
5	131,3	-0,6	0,3136
Summa:	659,3	0	0,75
Keskiarvo H:	131,9		

$$U_{HTM} = 2 * \sqrt{u_E^2 + u_{CRM}^2 + u_H^2 + u_x^2 + u_{ms}^2}$$

$$u_E = \frac{0,025 * 132}{2,8} = 1,179 \text{ (B tyyppi)}$$

$$u_{CRM} = \frac{2,3}{2} = 1,150 \text{ (B tyyppi)}$$

$$u_H = \frac{1,14 * 0,433}{\sqrt{5}} = 0,221 \text{ (A tyyppi)}$$

$$u_{ms} = \frac{\delta_{ms}}{2\sqrt{3}} = \frac{1}{2\sqrt{3}} = 0,289 \text{ (B tyyppi)}$$

$$U_{HTM} = 3,37$$

Mittaustulos = 131,9 +/- 3,37 HBW → 2,55 % (M1)

4.1.5.2. Menetelmä 2 Brinell

Esimerkki mittausepävarmuudesta menetelmällä 2. Laskennassa käytetty tuloksia taulukosta 12. Tähän menetelmään sisältyy kovuusmittarista johtuva virhe.

Taulukko 12. Brinellin ensimmäisen ja toisen mittauskerran tulokset

Kovuuspala HB30 132 +/- 2,3			
mittausten lkm.	tulos Xi	Xi - H	(Xi - H) ²
1	131,7	-0,16	0,0256
2	132,3	0,44	0,1936
3	132,3	0,44	0,1936
4	131,7	-0,16	0,0256
5	131,3	-0,56	0,3136
Summa:	659,3	-0,04	0,75
Keskiarvo H:	131,86		

Kovuuspala HB30 132 +/- 2,3			
mittausten lkm.	tulos Xi	Xi - H	(Xi - H) ²
1	132,0	-0,2	0,0400
2	132,0	-0,2	0,0400
3	132,0	-0,2	0,0400
4	132,3	0,1	0,0100
5	132,7	0,5	0,2500
Summa:	661,0	0,0	0,38
Keskiarvo H:	132,20		

$$U_{\text{corr}} = k * \sqrt{u_{\text{CRM}}^2 + u_{\text{H}}^2 + u_x^2 + u_{\text{ms}}^2 + u_b^2}$$

u_{H} laskennassa käytetään suurempaa arvoista s_{H1} ja s_{H2}

$$u_b = \frac{1,84 * 0,24}{\sqrt{2}} = 0,31$$

$$U_{\text{corr}} = 2,49$$

Mittaustulos korjatulla keskiarvolla: $\bar{X}_{\text{corr}} = (\bar{x} + \bar{b}) \pm U_{\text{corr}}$

$$\bar{X}_{\text{corr}} = (132,06) \pm 2,49 \text{ HBW} \rightarrow 1,89 \% \text{ (M2)}$$

Mittaustulos korjatulla epävarmuudella: $\bar{X}_{\text{ucorr}} = \bar{x} \pm (U_{\text{corr}} + |\bar{b}|)$

$$\bar{X}_{\text{ucorr}} = 132,03 \pm 2,52 \text{ HBW} \rightarrow 1,91 \% \text{ (M2)}$$

Standardin SFS-EN ISO 6505-2 mukaan virhe saa olla enintään 2,5 %. Virhetaulukko on liitteessä 1(1/2). Menetelmällä 2 virheprosentti jää alle 2,5 %:n. Menetelmällä 1 virheprosentti on hivenen yli rajan.

4.2. Vetokoe

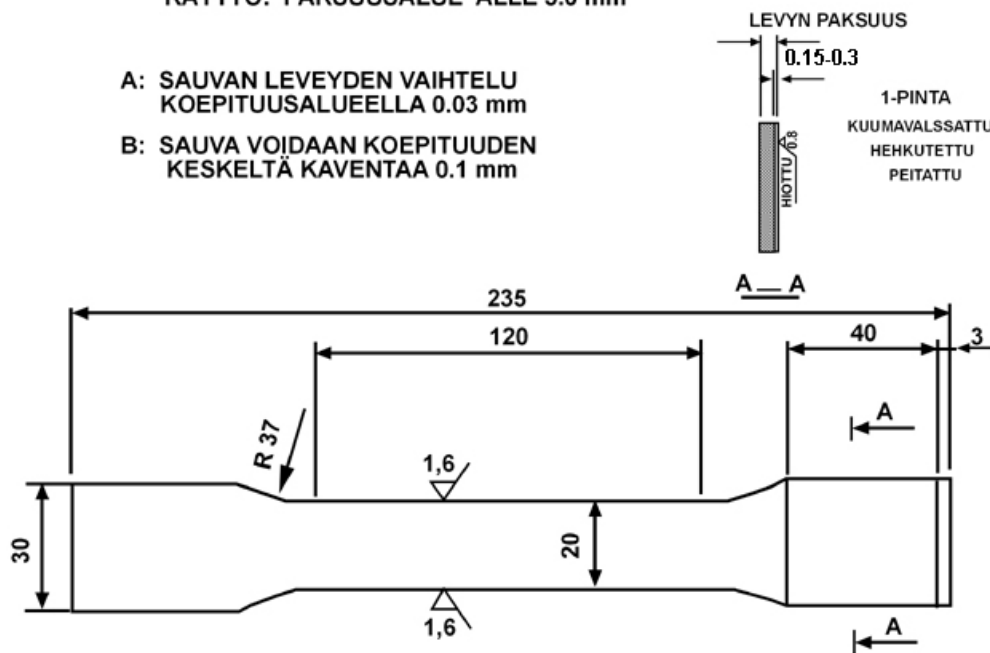
Vetokoe on lujuuden määrittämiseen käytettävä koe ja tärkein lujuuskoe valumetalleille. Vetokokeessa koesauvaa vedetään aineenkoetuskoneessa niin, että sen pituus kasvaa vakionopeudella.

DIN-STANDARDIN MUKAINEN VETOSAUVA

KÄYTTÖ: PAKSUUSALUE ALLE 3.0 mm

A: SAUVAN LEVEYDEN VAIHTELU
KOEPIITUUSALUEELLA 0.03 mm

B: SAUVA VOIDAAN KOEPIITUUDEN
KESKELTÄ KAVENTAA 0.1 mm

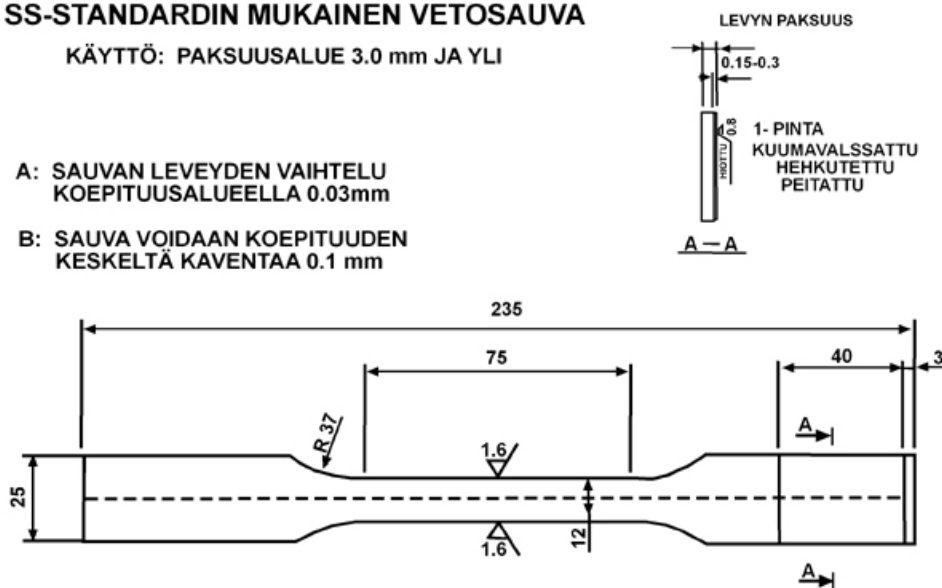


SS-STANDARDIN MUKAINEN VETOSAUVA

KÄYTTÖ: PAKSUUSALUE 3.0 mm JA YLI

A: SAUVAN LEVEYDEN VAIHTELU
KOEPIITUUSALUEELLA 0.03 mm

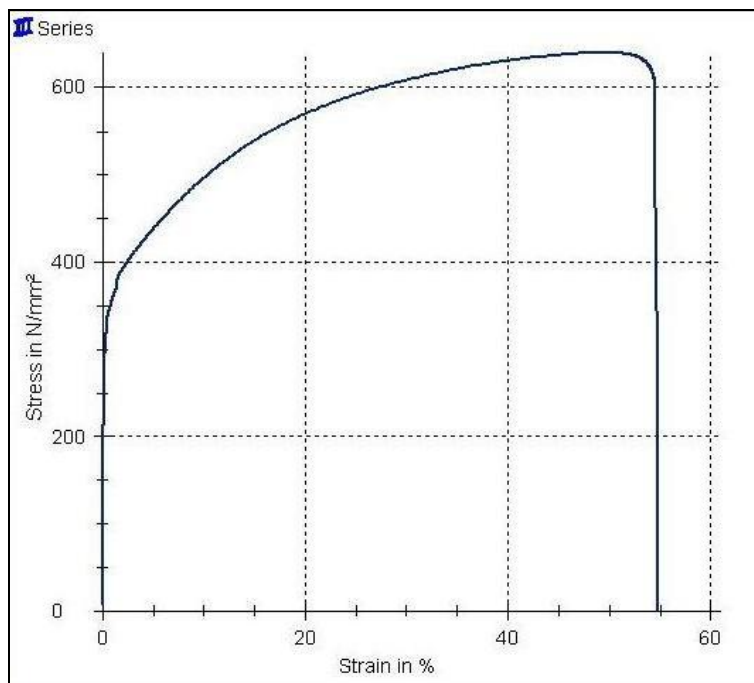
B: SAUVA VOIDAAN KOEPIITUUDEN
KESKELTÄ KAVENTAA 0.1 mm



Kuva 11. Din- ja SS-standardien mukaiset vetosauvat

Kuvassa 11 on kuvattu standardien mukaiset vetosauvat. Ylempi sauvoista on din-standardin mukainen vetosauva ja alempi ss-standardin mukainen.

Muodonmuutokseen tarvittava voima rekisteröidään koesauvan pituuden muutoksen funktiona. Vetokokeessa koesauva vedetään poikki. Tuloksina mitataan koesauvan venymää ja normaalivoimaa. Vetokoetta käytetään materiaalin tutkimuksessa ja laadunvalvonnassa. Vetokoemittausten tuloksena saadaan jännitys-venymäkuvaaja, kuvassa 12.



Kuva 12. Jännitys-venymäkuvaaja

Vetokokeella selvitetään materiaalin lujuusominaisuuksia ja tarkastellaan teräksen valmistuksen laatua. Periaatteena on, että koesauva vedetään katkeamiseen saakka siten, että yksi tai useampi mekaanisista ominaisuuksista voidaan määrittää.

Jännitys-venymä -käyrän huippukohtaa kutsutaan murtolujuudeksi. Murtolujuus R_m on metallin suurin lujuus. Murtolujuus on vetosauvassa vallitseva nimellisjännitys jännitys-venymäkäyrän korkeimmalla kohdalla.

Kun katkenneet osat asetetaan tarkasti yhteen ja mitataan vetokoesauvasta kokeen jälkeinen pituus ja muutetaan se prosenteiksi alkuperäisestä pituudesta, saadaan murtovenymä A. /[12](#), s. 10 - 13./

4.2.1. Mittausepävarmuuden määrittäminen vetokokeelle

Etukäteen on tiedettävä materiaalin lujuusominaisuuksien riippuvuus venymän tai jännityksen kasvunopeudesta, ennen kuin mittausepävarmuus voidaan laskea. Ei ole mahdollista määrittää yhtä tiettyä mittausepävarmuutta, joka pätee kaikille materiaaleille. Eri materiaalit käyttäytyvät eri tavoin kokeen muuttujien, kuten venymän ja jännityksen kasvunopeuden vaikutuksesta. Koe suoritetaan huoneenlämmössä. Mittauksessa tulee ottaa huomioon koesauvan mittaaminen, mittapituuden merkintä ja venymämittarin mittapituus. Mittausepävarmuuteen vaikuttavat materiaalista riippuvat ja riippumattomat tekijät. ISO/IEC Guide 98-3 perustuu tarkasti noudatettaviin tilastollisiin menetelmiin eri lähteistä tulevien mittausepävarmuuksien summaamiseksi. Useat järjestöt ovat tehneet siitä yksinkertaistettuja ohjeita. Näissä esitetään ohjeita epävarmuuden arvioimiseen ”epävarmuuskertymä” -menetelmien perusteella. Standardissa SFS-EN 6892-1 ei ole otettu huomioon materiaalin epähomogeenisuudesta johtuvaa hajontaa esimerkiksi sulatuksien eri kohtien välillä tai kelan alku- ja loppupään välillä. Tässä epävarmuus johtuu tulosten hajonnasta, joita on saatu homogeenisen materiaalin testauksesta eri kokeissa, käyttämällä eri vetokoneita ja laboratorioita. /[35](#), s. 40 - 43, 102 - 109./

Parametrin u standardiepävarmuus voidaan arvioida kahdella tavalla.

Tyyppi A, toistettava mittaus

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

missä

s on mittausten keskihajonta

n on mittaustulosten lkm

Tyyppi B, toinen lähde, esim. kalibrointitodistus tai toleranssit

$$u = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

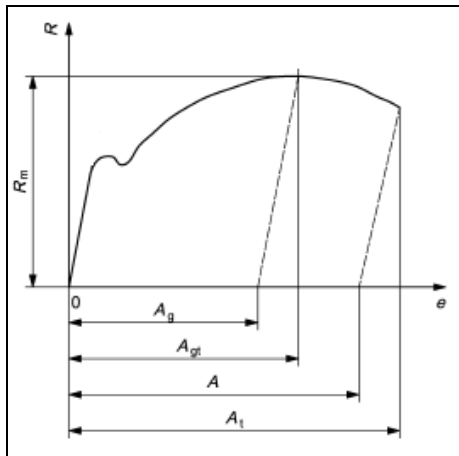
missä a on puolikas vaihteluvälistä, jolla suureen uskotaan olevan

Yhdistetty mittausepävarmuus saadaan laskemalla yhteen mittaussarjoja kaavalla:

$$u(y) = \sqrt{(u(x_1))^2 + u(x_2)^2 + \dots + u(x_n)^2} \quad (6)$$

Laitteistoparametrien vaikutus koetulosten epävarmuuteen:

- Ylemmän myötörajan ReH epävarmuuden vaikuttavat voiman F ja poikkipinta-alan S_0 mittausepävarmuus.
- Alemman myötörajan ReL epävarmuuteen vaikuttavat myös voiman F ja poikkipinta-alan S_0 mittausepävarmuus.
- Murtolujuuden R_m epävarmuuteen vaikuttaa voiman F ja alkuperäisen poikkipinta-alan S_0 mittausepävarmuus. Murtolujuus on nimellisjännitys jännitys-venymäkäyrän korkeimmalla kohdalla.
- Venymisrajan R_p epävarmuus riippuu voiman F , pitenemän, mittapituuden ja poikkipinta-alan S_0 mittausepävarmuudesta.
- Murtovenymän A epävarmuuteen vaikuttaa pitenemä ja mittapituus. Alla olevassa kuvassa 13 on kuvattu venymien määritelmät. A_g on plastinen tasavenymä suurimmalla voimalla, A_{gt} on kokonaistasavenymä suurimmalla voimalla, A kuvaa murtovenymää ja A_t kuvaa kokonaisvenymää murtohetkellä.



Kuva 13. Venymäkuvaaja

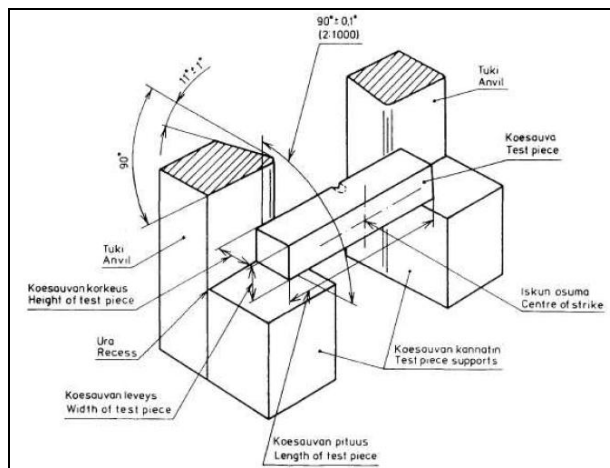
Murtokouruma Z epävarmuus riippuu koesauvan suoran osan poikkipinta-alan S_0 epävarmuudesta ennen koetta ja murtuneen koesauvan pienimmästä poikkipinta-alasta S_u .
/35, s. 40 - 43./

4.3. Iskukoe

Metalleilla, joiden kiderakenteessa atomit ovat keskittyneet kuution sisään, kuten esimerkiksi raudassa ja ferriittisissä teräksissä, on haitallinen ominaisuus, iskusitkeys alenee romahdusmaisesti, kun lämpötilaa (transitiolämpötila) lasketaan ja murtumistapa muuttuu sitkeästä hauraaksi kiderajoja pitkin kulkevaksi lohkeamiseksi. Austeniittisessa teräksessä atomit ovat keskittyneet kuution sivuihin, jolloin murtuminen ei tapahdu kiderajoja pitkin missään lämpötilassa.

Yleisin haurasmurtumisen testauskoe on iskukoe, koska se on halpa ja nopea toteuttaa. Iskukokeella testataan materiaalin käyttäytymistä nopean iskumaisen kuormituksen alaisena. Kokeessa selviää materiaalin mahdollinen haurastuminen eri lämpötiloissa. Kokeessa käytetään yleensä sauvaa, jonka pituus on 55 mm, poikkipinta on neliö, ja sivut ovat 10 mm. Sauvassa on U- tai V-lovi. V-lovi on 2 mm syvä ja loven kulma on 45° :tta. U-lovi on 5 mm syvä, jonka pohjassa pyöristyssäde on 1 mm. Testaussauva tuetaan molemmista päistä ja siihen isketään tarkkaan kalibroidulla heilurivasaralla kerran. Vasara

on kiilamainen iskuheiluri. Vasara pudotetaan, jolloin se iskee sauvaan, joka katkeaa tai taipuu. Iskun jälkeen sauva jatkaa rataansa takaisin ylös. Iskuheiluri on standardin EN 10045-2 mukainen. Kuvassa 14 on kuvattuna standardin SFS-EN 10045-1 mukainen iskusauvan tuenta. /21, s.4 - 21./, /36, s. 19 - 21./, /38/



Kuva 14. Koesauvan tuenta, Standardin SFS-EN 10045-1 mukainen Charpy-iskusauva /12, s. 21./

Iskukokeessa mitataan iskuenergiaa. Iskussa kulunut energia määritetään jouleina, jota käytetään materiaalin iskutheyden mittana. Iskukoetta käytetään eri terästuotteiden laadunvalvontaan ja se on standardoitu aineenkoetusmenetelmä. Iskukokeen tulosten perusteella voidaan ennustaa säröjä tai lovia sisältävien kappaleiden käyttäytymistä. Iskukoe suoritetaan 23 ± 5 °C:ssa, jos koe halutaan suorittaa muussa kuin huoneenlämpötilassa, testauksessa käytettävä koesauva tulee jäähdyttää haluttuun lämpötilaan nestemäisessä tai kaasumaisessa väliaineessa. /21, s. 4 - 21./

Iskuheilurin suora varmentaminen

Menetelmällä tarkastetaan:

- laitteen runko. Asennusdokumentista tulee ilmetä, että perustan massa on vähintään 40 kertaa niin painava kuin heiluri tai jos laite on valmistettu vuoden 2008 jälkeen, niin laitteen rungon tulee painaa vähintään 12 kertaa heiluria enemmän.

- Heiluri. Iskuterän leveys tulee olla 10 - 18 mm, iskurin kärjen kulman tulee olla $30^\circ \pm 1$.
- rungon / heilurin asento. Laitteen perustuksessa tulee olla vertailutaso, josta mittaukset voidaan tehdä, iskurin kärjen tulee olla $\pm 0,5$ mm etäisyydellä koesauvasta heilurin riippuessa vapaasti.
- koesauvan tuenta. Kannattimien tulee olla samassa tasossa.
- tukien ja heilurin välinen rako. Raon tulee olla sellainen, että murtuneen koesauvan osat putoavat vapaasti, koskettaen mahdollisimman vähän testauslaitetta.
- Määritetään redusoitu pituus.
- Tarkastetaan energian näyttölaite.
- Määritetään potentiaalienergia.
- Lasketaan mitatun energian virhe (A_s).
- Arvioidaan kitkahäviöt.
- Lasketaan iskunopeus. /21, s. 4 - 21./

Iskuheilurin epäsuora varmentaminen

Epäsuoran varmentamisen vaiheet:

- Ensin määritetään iskutyö tekemällä iskukokeet vertailukoesauvaerällä. Ennen kuin epäsuora varmentaminen aloitetaan, tarkistetaan tuenta, koesauvojen sijoittelu, iskuheilurin kunto sekä määritetään kitkahäviöt.
- Epäsuora varmentaminen suoritetaan vähintään kahdella energiatasolla, jotka kuuluvat laitteen käyttöalueeseen ja joihin on vertailusauvat. Tarkistettavat energiatasot tulee olla mahdollisimman lähellä tarkastettavan alueen ääripäitä. Molemmilla energiatasoilla isketään viisi koesauvaa, sauvojen lämpötilan ollessa $23 \pm 2^\circ\text{C}$.
- Isketyt koesauvat laitetaan järjestykseen pienimmästä suurimpaan $E_1 \dots E_5$

* iskuheilurin toistettavuus määritetään $E_5 - E_1$ eli $E_{\max} - E_{\min}$,

* iskuheilurin virhe lasketaan kaavalla:

$$\bar{E} = \frac{E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5}{5} \quad (6)$$

missä

\bar{E} on vertailukoesauvaerän iskutyön arvo

$E_1 - E_5$ ovat iskuheilurin tulokset

- Varmennettava iskuheiluri on kunnossa, jos toistettavuus ja virhe ovat pienemmät tai yhtä suuret kuin standardissa SFS-EN 10045-2 on määritelty.
- Jos vaatimusarvot ylitetään, syitä etsitään suoran menetelmän mukaan.
- Varmentamisselosteen tulee sisältää seuraavat asiat: viittaus standardiin SFS-EN 10045-2, iskuheilurin tunnistetiedot, laitteen sijainti, varmentamismenetelmä, vertailuarvot, havaitut virheet, tulokset, päivämäärä sekä suorittaja.

Suora menetelmä suoritetaan, kun iskuheiluri on asennettu paikoilleen, korjattu tai siirretty.

Suora menetelmä täytyy suorittaa jos epäsuora menetelmä ei anna hyväksyttävää tulosta.

Epäsuora menetelmä suoritetaan noin 12 kk:n välein. /[21](#), s. 4 - 21./

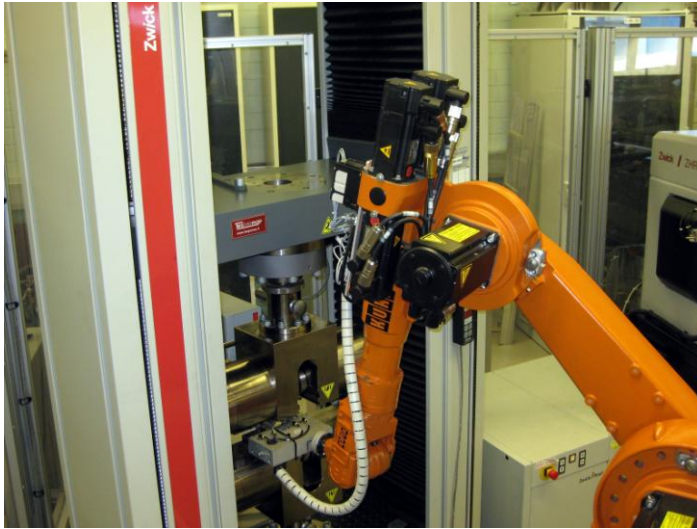
5. TESTIMITTAUSTEN TULOKSET

Kovuuskokeiden tuloksissa käytettiin rutiinimittausten tuloksia. Kovuuskokeisiin otettiin kaksi kalibrointikovuuspalaa, joiden kovuutta mitattiin Duramin-500:llä (kuva 14). Kovuuspalat olivat HV10 128 ja HBW 1/30 132.

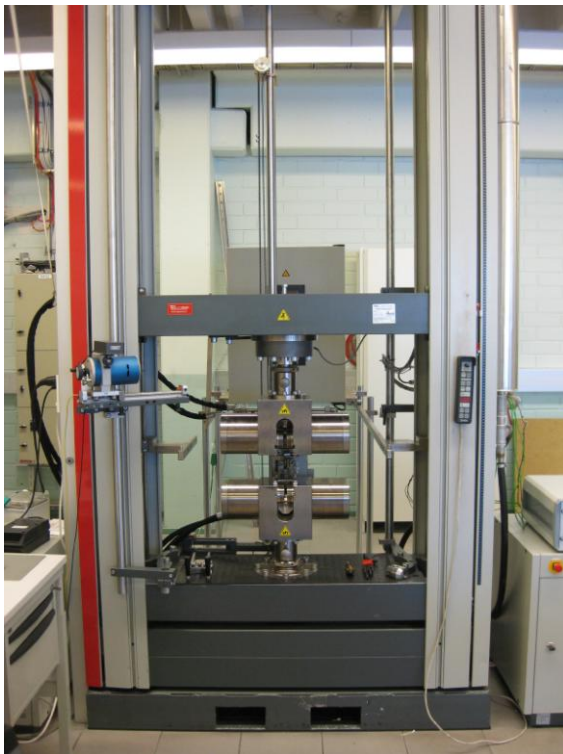


Kuva 14. Duramin-500

Vetokokeissa käytettiin din- ja ss-standarden mukaisia vetosauvoja. Sauvat vedettiin automaattisella sekä manuaalisella vetokoneella. Kuvassa 15 on automaattinen vetokone sekä robotti ja kuvassa 16 on manuaalinen vetokone.



Kuva 15. Zwick / Roell Z250 (automaattinen vetokone ja robotti)



Kuva 16. Zwick Z250 (manuaalinen vetokone)

5.1. Kovuusmittausten tulosten epävarmuudet

Kalibrointikovuuspalasta HV10 kovuus 128 tehtiin 33 mittausta. Tuloksien keskiarvoja on 11 kappaletta, tulokset ovat alla olevassa taulukossa 13. Mittaukset on tehty kerran kuukaudessa.

Vickers

Taulukko 13. Vickersin mittaustulokset

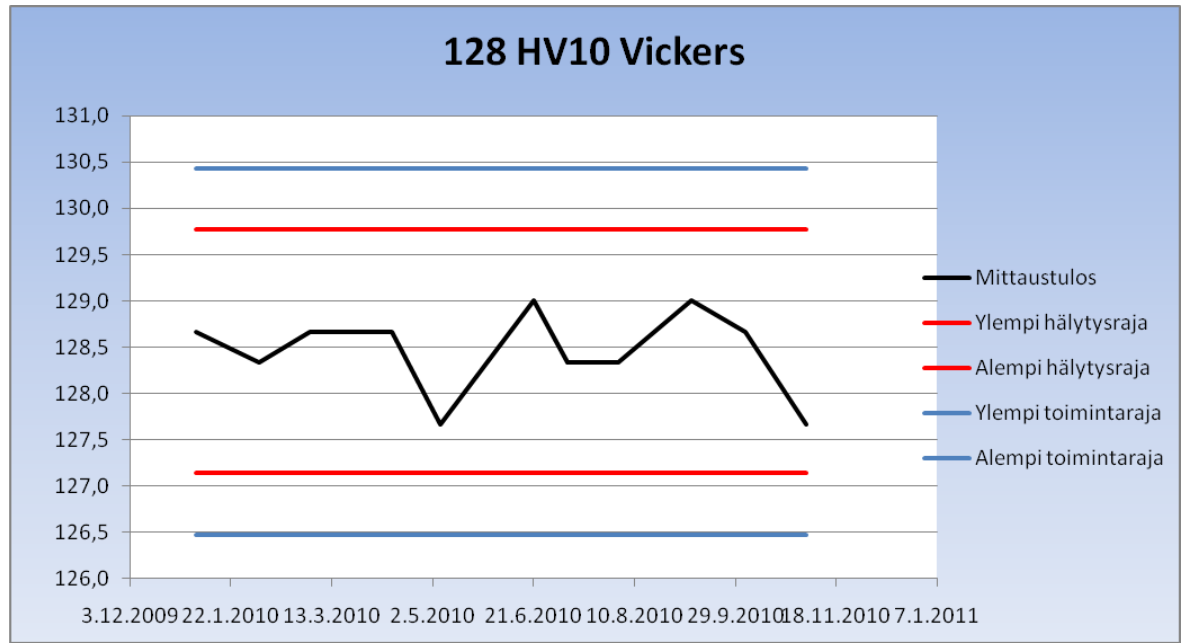
Näyte 128 HV10 ± 1,5					
MITTAUSTULOKSET					
1	2	3	ka.	$X_i - H$	$(X_i - H)^2$
129	129	128	128,7	0,7	0,44
127	129	129	128,3	0,3	0,11
129	129	128	128,7	0,7	0,44
129	129	128	128,7	0,7	0,44
129	126	128	127,7	-0,3	0,11
129	129	129	129,0	1,0	1,00
129	128	128	128,3	0,3	0,11
129	128	128	128,3	0,3	0,11
129	129	129	129,0	1,0	1,00
129	129	128	128,7	0,7	0,44
128	127	128	127,7	-0,3	0,11

Taulukon 11 mukaan mittauksia on tehty 33 kappaletta/kovuus pala ja laskettu tulosten keskiarvo. $X_i - H$ kertoo tulosten virheen verrattaessa keskiarvoa kovuuskalibrointipalan ilmoitettuun arvoon. $(X_i - H)^2$ on määritetty keskihajonnan laskemista varten.

Taulukko 14. Hälytysrajat

Ylempi hälytysraja	Alempi hälytysraja	Ylempi toimintaraja	Alempi toimintaraja
$H+2s_H$	$H-2s_H$	$H+3s_H$	$H-3s_H$
129,8	127,1	130,4	126,5

Edellä olevassa taulukossa 14 on SPC:n mukaiset hälytys- sekä toimintarajat kyseiselle kovuuspalalle. Näiden tulosten mukaan voidaan seurata, pysyvätkö tulokset määrättyjen rajojen sisäpuolella ja tulosten perusteella voidaan tehdä SPC:n mukainen valvontakortti.



Kuva 17. HV10 128 mittaustulokset kuvaajana

Kuvasta 17 voidaan todeta, että kovuuspalan HV10 128 tulokset ovat hälytysrajojen sisäpuolella ja mittausmenetelmä on kunnossa. Tuloksista ja kuvaajasta selviää, jos mahdollista ryömintää alkaa esiintymään. Kuvasta on voidaan selvittää päivämäärän avulla mittaustulokseen vaikuttavat seikat, esimerkiksi mittaajan vaihtuminen, työvälineen kuluminen tai uuden osan vaihtaminen.

Määritetään mittausepävarmuus menetelmällä 1. Laskennassa on käytetty taulukon 15 tuloksia.

Taulukko 15. Vickersin mittausten tulokset

mittauskerta	tulos Xi	Xi - H	(Xi - H) ²
1	128,7	0,3	0,09
2	128,3	-0,1	0,01
3	128,7	0,3	0,09
4	128,7	0,3	0,09
5	127,7	-0,7	0,49
Summa:	642,1	0,1	0,77
Keskiarvo H:	128,4		

$$U_{HTM} = 2 * \sqrt{u_E^2 + u_{CRM}^2 + u_H^2 + u_x^2 + u_{ms}^2}$$

$$u_E = \frac{u_{E,2r} * \bar{x}_{CRM}}{2,8} = \frac{0,03 * 128}{2,8} = 1,37 / 29, \text{ s. 18.}/$$

$$u_{CRM} = \frac{U_{CRM}}{2} = \frac{1,5}{2} = 0,75$$

$$u_H = \frac{t * s_H}{\sqrt{n}} = \frac{1,14 * 0,438}{\sqrt{5}} = 0,22$$

$$u_{ms} = \frac{2\bar{H}}{d} * \frac{\delta_{ms}}{2\sqrt{3}} = \frac{128,4}{0,381} * \frac{0,0001}{2\sqrt{3}} = 0,0097 \quad /31, \text{ s. 76.}/$$

$$U_{HTM} = 3,15$$

Mittaustulos = 128,4 +/- 3,15 HV → 2,45 % (M1)

Taulukko 16. Mittausepävarmuuden määrittämiseen liittyvät tunnuksat

H	Mittaustulosten ka.	128,45 (1)	128,70 (2)
S _H	Keskihajonta	0,44 (1)	0,35 (2)
u _H	Standardimittausepäv.	0,22	
b	kovuusmittarin poikkeama	0,4 (1)	0,7 (2) → b = 0,55
U _{CRM}	vertailupalan mittausepävarmuus	± 1,50	
u _{CRM}	k = 2	± 0,75	
H _{CRM}	vertailupalan kovuus	128	
δ _{ms}	kovuusmittarin lukemistarkkuus	0,1	µm
u _{ms}	kovuusmittarin lukemistarkkuudesta johtuva epävarmuus	0,029	δ _{ms} /(2√3)
t	tasaantumisaika	1,14	
n	tulosten lkm	5	10
u _{HTM}	yhdistetty mittausepävarmuus	± 1,575	
U _{HTM}	laajennettu mittausepävarmuus	± 3,15	
U _{corr}	korjattu mittausepävarmuus	± 1,66	

Taulukossa 16 on tunnuksia ja vertailukovuuspalan arvoja epävarmuuslaskentaan.

Esimerkki mittaasepävarmuudesta menetelmällä 2. Laskennassa on käytetty taulukon 17 tuloksia.

Taulukko 17. Vickersin ensimmäisen ja toisen mittauskerran tulokset

Kovuuskalibrointipala HV10 128 +/- 1,5			
mittausten lkm.	tulos Xi	Xi - H	(Xi - H) ²
1	128,7	0,3	0,09
2	128,3	-0,1	0,01
3	128,7	0,3	0,09
4	128,7	0,3	0,09
5	127,7	-0,7	0,49
Summa:	642,1	0,1	0,77
Keskiarvo H:	128,4		

Kovuuskalibrointipala HV10 128 +/- 1,5			
mittausten lkm.	tulos Xi	Xi - H	(Xi - H) ²
1	129,0	0,3	0,09
2	128,3	-0,4	0,16
3	128,3	-0,4	0,16
4	129,0	-0,3	0,09
5	128,7	0,0	0,0
Summa:	643,3	-0,8	0,50
Keskiarvo H:	128,7		

$$U_{corr} = k * \sqrt{u_{CRM}^2 + u_H^2 + u_x^2 + u_{ms}^2 + u_b^2}$$

u_H laskennassa käytetään suurempaa arvoista s_{H1} ja s_{H2}

$$s_b = \sqrt{\frac{1}{n_m - 1} \sum_{i=1}^{n_m} (b_i - \bar{b})^2}$$

$$s_b = 0,212$$

$$u_b = \frac{t^* s_b}{\sqrt{n_m}} = \frac{1,84 * 0,212}{\sqrt{2}} = 0,2758$$

$$U_{corr} = 1,66$$

Mittaustulos korjatulla keskiarvolla: $\bar{X}_{corr} = (\bar{x} + \bar{b}) \pm U_{corr}$

$$\bar{X}_{corr} = 129,1 \pm 1,66 \text{ HV} \rightarrow 1,28 \% \text{ (M2)}$$

Mittaustulos korjatulla epävarmuudella: $\bar{X}_{ucorr} = \bar{x} \pm (U_{corr} + |\bar{b}|)$

$$\bar{X}_{ucorr} = 128,55 \pm 2,21 \text{ HV} \rightarrow 1,72 \% \text{ (M2)}$$

Standardin mukaan virhe saa olla HV10:lla enintään 3 %.

Brinell

Kalibrointikovuuspalan HBW 1/30 kovuus 132 tulokset otettiin myös vuoden ajalta. Taulukkoon 18 on merkitty mittaustulokset, keskiarvot sekä hajonta.

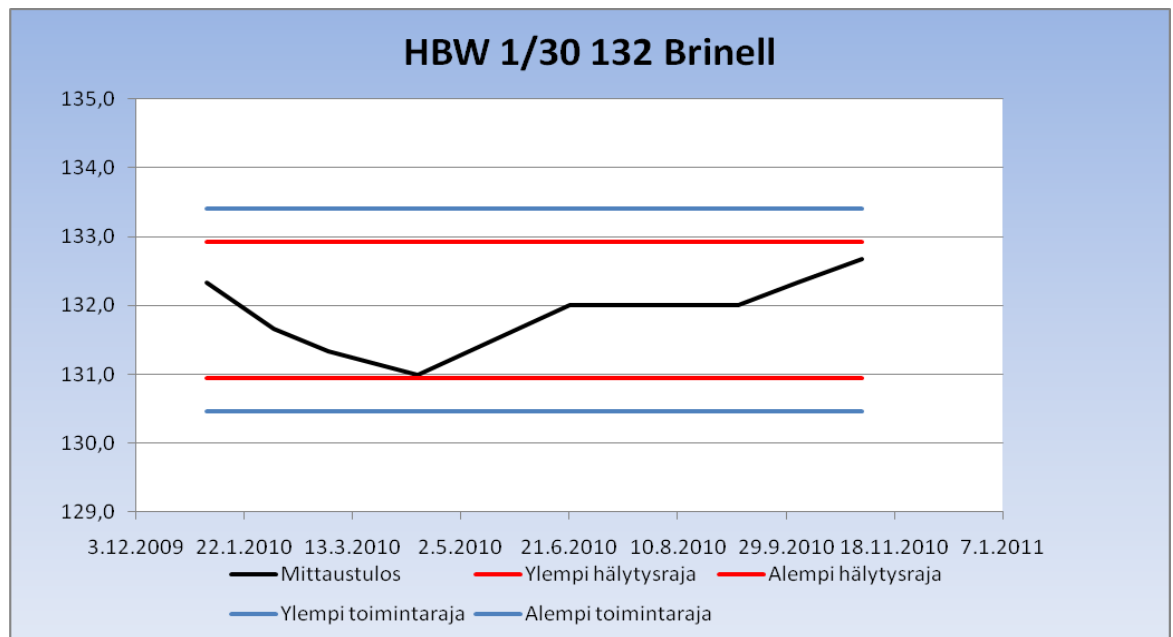
Taulukko 18. Brinellin mittausten tulokset

Näyte		132	HBW 1/30	±	2,3
MITTAUSTULOKSET					
1	2	3	ka.	$X_i - H$	$(X_i - H)^2$
132,0	133,0	132,0	132,3	0,4	0,16
131,0	132,0	132,0	131,7	-0,3	0,07
131,0	132,0	131,0	131,3	-0,6	0,36
131,0	130,0	132,0	131,0	-0,9	0,87
132,0	132,0	132,0	132,0	0,1	0,00
132,0	132,0	132,0	132,0	0,1	0,00
132,0	132,0	132,0	132,0	0,1	0,00
132,0	132,0	132,0	132,0	0,1	0,00
132,0	132,0	133,0	132,3	0,4	0,16
133,0	133,0	132,0	132,7	0,7	0,54

Taulukko 19. Hälytysrajat

Ylempi hälytysraja	Alempi hälytysraja	Ylempi toimintaraja	Alempi toimintaraja
$H+2s_H$	$H-2s_H$	$H+3s_H$	$H-3s_H$
132,9	130,9	133,4	130,5

Taulukkoon 19 on laskettu hälytys- ja toimintarajat mittaustulokselle. Hälytysrajoja on käytetty kuvassa 18.

**Kuva 18. HBW 1/30 132 Brinell mittaustulokset kuvaajana**

Määritetään mittausepävarmuus menetelmällä 1. Laskennassa on käytetty taulukon 20 tuloksia.

Taulukko 20. Ensimmäisen sarjan tulokset

Kovuuspala HB30 132 +/- 2,3			
mittausten lkm.	tulos Xi	Xi - H	(Xi - H) ²
1	132,3	0,64	0,4096
2	131,7	0,04	0,0016
3	131,3	-0,36	0,1296
4	131,0	-0,66	0,4356
5	132,0	0,34	0,1156
Summa:	658,3	0,0	1,09
Keskiarvo H:	131,66		

$$U_{HTM} = 2 * \sqrt{u_E^2 + u_{CRM}^2 + u_H^2 + u_x^2 + u_{ms}^2}$$

$$u_E = \frac{u_{E,2r} * x_{CRM}}{2,8} = \frac{0,025 * 132}{2,8} = 1,18 \quad /25, \text{ s. } 56./$$

$$u_{CRM} = \frac{U_{CRM}}{2} = \frac{2,3}{2} = 1,15$$

$$u_H = \frac{t * s_H}{\sqrt{n}} = \frac{1,14 * 0,52}{\sqrt{5}} = 0,27$$

$$u_{ms} = \frac{\delta_{ms}}{2\sqrt{3}} = \frac{1}{2\sqrt{3}} = 0,29$$

$$U_{HTM} = 2 * \sqrt{1,18^2 + 1,15^2 + 0,27^2 + 0,29^2} = 3,39$$

Mittaustulos = 131,7 +/- 3,39 HBW → 2,57 % (M1)

Taulukko 21. Mittausepävarmuuden määrittämiseen liittyvät tunnuksset.

H	Mittaustulosten ka.	131,70 (1)	131,95 (2)
S _H	Keskihajonta	0,52 (1)	0,31 (2)
u _H	Standardimittausepäv.	0,26	
b	kovuusmittarin poikkeama	-0,3 (1)	0,2 (2) → b = 0,05
U _{CRM}	vertailupalan mittausepävarmuus	± 2,30	
u _{CRM}	k = 2	± 1,15	
H _{CRM}	vertailupalan kovuus	132	
δ _{ms}	kovuusmittarin lukemistarkkuus	0,1	μm
u _{ms}	kovuusmittarin lukemistarkkuudesta johtuva epävarmuus	0,029	δ _{ms} /(2√3)
t	tasaantumisaika	1,14	
n	tulosten lkm	5	10
u _{HTM}	yhdistetty mittausepävarmuus	± 1,695	
U _{HTM}	laajennettu mittausepävarmuus	± 3,39	
U _{corr}	korjattu mittausepävarmuus	± 2,65	

Taulukossa 21 on tunnuksia ja vertailukovuuspalan arvoja epävarmuuslaskentaan.

Esimerkki mittausepävarmuudesta menetelmällä 2. Esimerkissä on käytetty taulukon 22 tuloksia.

Taulukko 22. Ensimmäisen ja toisen sarjan tulokset

Kovuuspala HB30 132 +/- 2,3			
mittausten lkm.	tulos Xi	Xi - H	(Xi - H) ²
1	132,3	0,64	0,4096
2	131,7	0,04	0,0016
3	131,3	-0,36	0,1296
4	131,0	-0,66	0,4356
5	132,0	0,34	0,1156
Summa:	658,3	0,0	1,09
Keskiarvo H:	131,7		

Kovuuspala HB30 132 +/- 2,3			
mittausten lkm.	tulos Xi	Xi - H	(Xi - H) ²
1	132,0	-0,2	0,0400
2	132,0	-0,2	0,0400
3	132,0	-0,2	0,0400
4	132,3	0,1	0,0100
5	132,7	0,5	0,2500
Summa:	661,0	0,0	0,38
Keskiarvo H:	132,2		

$$U_{corr} = k * \sqrt{u_{CRM}^2 + u_H^2 + u_x^2 + u_{ms}^2 + u_b^2}$$

u_H laskennassa käytetään suurempaa arvoista s_{H1} ja s_{H2}

$$s_b = \sqrt{\frac{1}{n_m - 1} \sum_{i=1}^{n_{m1}} (b_i - \bar{b})^2}$$

$$s_b = 0,41$$

$$u_b = \frac{t^* s_b}{\sqrt{n_m}} = 0,53$$

$$U_{\text{corr}} = 2,65$$

Mittaustulos korjatulla keskiarvolla: $\bar{X}_{\text{corr}} = (\bar{x} + \bar{b}) \pm U_{\text{corr}}$

$$\bar{X}_{\text{corr}} = 132,00 \pm 2,65 \text{HV}(M2) \rightarrow 2,00 \%$$

Mittaustulos korjatulla epävarmuudella: $\bar{X}_{\text{ucorr}} = \bar{x} \pm (U_{\text{corr}} + |\bar{b}|)$

$$\bar{X}_{\text{ucorr}} = 131,95 \pm 2,70 \text{HV}(M2) \rightarrow 2,04 \%$$

Sallittu virhe saa olla enintään 2,5 % ja menetelmällä 1 virheprosentti oli vähän enemmän ja menetelmällä 2 alle 2,5 %:n, joten menetelmällä 2 päästiin parempaan tulokseen.

5.2. Vetokokeen tulokset ja mittausepävarmuus

Ensimmäiseen mittaukseen otettiin kymmenen sauvaa, joista otettiin talteen kaikki tieto mahdollista myöhempää tarvetta varten. Mittausepävarmuus laskettiin murtolujuudelle R_m ja murtovenymälle A. Epävarmuuden arviointiin käytettiin standardin SFS-EN ISO 6892-1 mukaisesti tyyppiä A, jota käytetään toistettavalle mittaukselle.

Alla olevassa taulukossa 23 on käsitelty robotilla mitattuja tuloksia din-sauvoille.

Taulukko 23. Murtolujuuden tulokset

Murtolujuus R_m			
tulos X _i	X _i - H	(X _i - H) ²	
640,8	0,55	0,3025	
639,4	-0,85	0,7225	
639,8	-0,45	0,2025	
639,5	-0,75	0,5625	
642,2	1,95	3,8025	
640,1	-0,15	0,0225	
639,7	-0,55	0,3025	
640,1	-0,15	0,0225	
639,3	-0,95	0,9025	
641,6	1,35	1,8225	
Summa	6402,5	0,0	8,87
Keskiarvo	640,25		
Keskihajonta	0,9926		

Mittausepävarmuus laskettiin käyttämällä menetelmää A (toistettava mittaus), alla olevalla kaavalla:

$$u_{Rm} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{0,9926}{\sqrt{10}} = 0,3139$$

Murtovenymä laskettiin samalla periaatteella, tulokset taulukossa 24.

Taulukko 24. Murtovenymän tulokset

Murtovenymä A₈₀			
tulos X _i	X _i - H	(X _i - H) ²	
55,5	0,71	0,50	
54,8	0,01	0,00	
53,9	-0,89	0,79	
54,3	-0,49	0,24	
56,4	1,61	2,59	
55,8	1,01	1,02	
54,2	-0,59	0,35	
54,1	-0,69	0,48	
53,2	-1,59	2,53	
55,7	0,91	0,83	
Summa	547,90	0,00	9,33
Keskiarvo	54,79		
Keskihajonta	1,0182		

Murtovenymän mittausepävarmuudeksi saatiin menetelmällä A:

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{1,0182}{\sqrt{10}} = 0,3220$$

Lopuksi laskettiin vielä murtolujuuden ja murtovenymän yhdistetty epävarmuus:

$$u(y) = \sqrt{(u(x_1))^2 + u(x_2)^2 + \dots + u(x_n)^2}$$

$$u(y) = \sqrt{0,3139^2 + 0,3220^2} = 0,4497$$

Laajennettu mittausepävarmuus: $U = 2 \cdot u(y)$, ($k = 2$)
 $U = \pm 0,90$

Manuaalisella vetokoneella tehtiin mittaukset samoille sauvoille, jolloin laajennetuksi mittausepävarmuudeksi saatiin $U = \pm 1,28$. Vetokoneen tulokset ovat liitteessä 2 (1/2).

Manuaalisella vetokoneella mittausepävarmuus on hivenen suurempi, koska siihen sisältyy myös käsin mittausta. Vaikka käsin mittauksessa käytettävät välineet ovat säännöllisesti kalibroituja, vaikuttaa ihmisen ”kädenjälki” lopputulokseen. Tulosten kuvaajat ovat liitteessä 3 (1/3) ja liitteessä 3 (2/3).

Mittausepävarmuuksien laskennassa ei ole huomioitu laitteistoparametrien vaikutusta.

Mittausepävarmuus haluttiin selvittää myös SS-sauvalle. Testissä laskettiin kymmenen mittauksen murtolujuuden keskihajonta, jonka avulla saatiin selville murtolujuuden mittausepävarmuus.

Alla olevassa taulukossa 25 on käsitelty robotilla mitattuja tuloksia ss-sauvoille.

Taulukko 25. Murtolujuuden tulokset

Murtolujuus Rm			
tulos Xi	Xi - H	(Xi - H) ²	
593,3	0,81	0,6561	
592,6	0,11	0,0121	
592,4	-0,09	0,0081	
591,8	-0,69	0,4761	
592,3	-0,19	0,0361	
591,9	-0,59	0,3481	
592,1	-0,39	0,1521	
591,7	-0,79	0,6241	
592,7	0,21	0,0441	
594,1	1,61	2,5921	
Summa	5924,9	0,0	4,95
Keskiarvo	592,49		
Keskihajonta	0,7415		

Mittausepävarmuus laskettiin käyttämällä menetelmää A (toistettava mittaus):

$$u_{Rm} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{0,7415}{\sqrt{10}} = 0,234$$

Murtovenymä laskettiin samalla periaatteella. Murtovenymän tulokset ovat taulukossa 26.

Taulukko 26. Murtovenymän tulokset

Murtovenymä A50			
tulos Xi	Xi - H	(Xi - H) ²	
51,9	-0,28	0,08	
52,2	0,02	0,00	
52,4	0,22	0,05	
52,7	0,52	0,27	
52,1	-0,08	0,01	
52,6	0,42	0,18	
52,3	0,12	0,01	
52,1	-0,08	0,01	
51,5	-0,68	0,46	
52,0	-0,18	0,03	
Summa	521,80	0,00	1,10
Keskiarvo	52,18		
Keskihajonta	0,3496		

Murtolajuuden mittausepävarmuudeksi saatiin menetelmällä A:

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{0,3496}{\sqrt{10}} = 0,1106$$

Lopuksi laskettiin vielä murtolajuuden ja murtovenymän yhdistetty epävarmuus:

$$U(y) = \sqrt{(u(x_1))^2 + u(x_2)^2 + \dots + u(x_n)^2}$$

$$U(y) = \sqrt{0,234^2 + 0,1106^2} = 0,259$$

Laajennettu mittausepävarmuus $U = 2 \cdot u(y)$, ($k = 2$)
 $U = \pm 0,518$

Manuaalisella vetokoneella tehdyille mittauksille saatiin laajennetuksi mittausepävarmuudeksi $U = \pm 0,87$. Vetokokeen tulokset ovat liitteessä 2 (2/2). Tulosten kuvaajat ovat liitteessä 3 (1/3) ja liitteessä 3 (2/3).

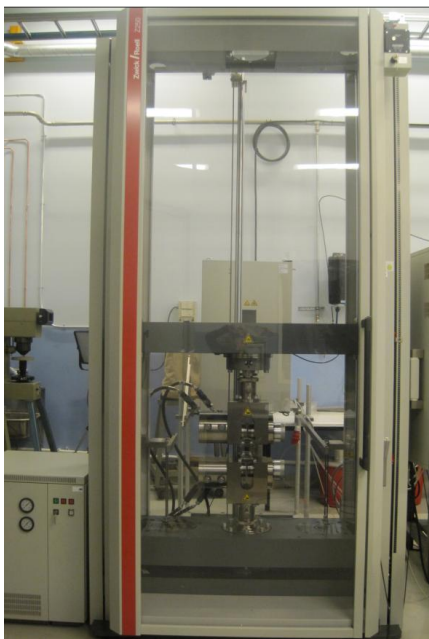
Manuaalisen vetokoneen tuloksiin ja suurempaan epävarmuuteen vaikuttavat käsin tehtävät mittaukset.

6. CASE-ESIMERKKI, KTAMK

Opinnäytetyössä haluttiin verrata kovuusmittauksia ja vetokoetuloksia eri ympäristössä ja eri laitteilla tehtynä. Kovuusmittauksissa käytettiin samoja kalibrintikovuuspaloja ja vetokokeissa käytettiin din- ja ss-sauvoja. Vertailutestit tehtiin KTAMK:ssa, jossa on vastaava kovuusmittari kuin TRC:ssä. Kuvassa 22 on KTAMK:n kovuusmittari ja kuvassa 23 on KTAMK:n vetokone.



Kuva 22. Kovuusmittari Duramin-250



Kuva 23. KTAMK:n Vetokone Zwick/Roell Z250

6.1. Mittausepävarmuus kovuusmittaukselle KTAMK:ssa

Vickers

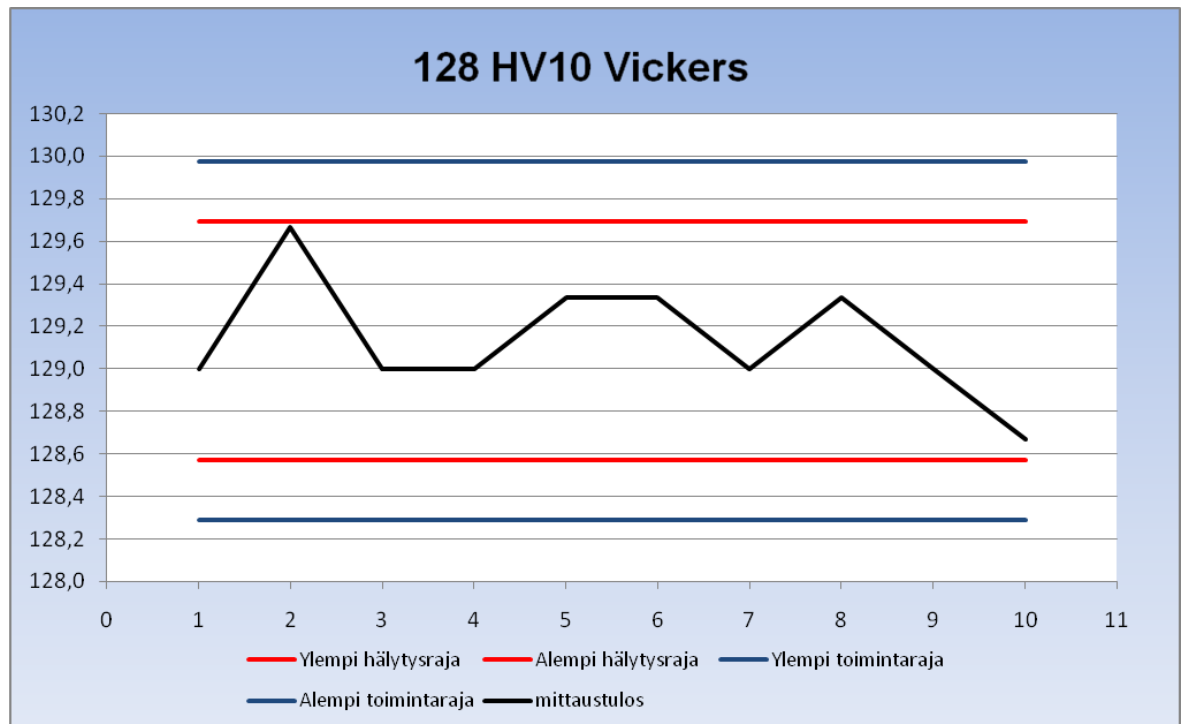
Mittaukset tehtiin kolmen sarjoissa, yhteensä mittauksia tehtiin kolmekymmentä. Laskettiin kolmen tuloksen keskiarvo, saatiin yhteensä kymmenen keskiarvoa. Keskiarvojen perusteella määritettiin hälytys- ja toimintarajat. Tulokset ovat taulukossa 27 ja hälytysrajat ovat taulukossa 28. Tuloksista tehtiin kuvaaja (kuva 24).

Taulukko 27. Vickersin mittausten tulokset

KT-AMK	Näyte	128	HV10	± 1,5		
mittauskerta	1	2	3	ka.	$X_i - H$	$(X_i - H)^2$
1	129	129	129	129,0	-0,1	0,02
2	131	129	129	129,7	0,5	0,25
3	130	128	129	129,0	-0,1	0,02
4	129	129	129	129,0	-0,1	0,02
5	130	129	129	129,3	0,2	0,04
6	129	129	130	129,3	0,2	0,04
7	128	130	129	129,0	-0,1	0,02
8	129	130	129	129,3	0,2	0,04
9	129	129	129	129,0	-0,1	0,02
10	129	129	128	128,7	-0,5	0,25

Taulukko 28. Tulosten perusteella lasketut rajat

Ylempi hälytysraja	Alempi hälytysraja	Ylempi toimintaraja	Alempi toimintaraja
$H+2s_H$	$H-2s_H$	$H+3s_H$	$H-3s_H$
129,7	128,6	130,0	128,3



Kuva 24. HV10 128 tulokset kuvaajassa

Määritetään mittausepävarmuus menetelmällä 1. Laskennassa on käytetty taulukon 29 tuloksia.

Taulukko 29. Ensimmäisen sarjan tulokset

mittauskerta	tulos Xi	Xi - H	(Xi - H) ²
1	129,0	-0,2	0,04
2	129,7	0,5	0,25
3	129,0	-0,2	0,04
4	129,0	-0,2	0,04
5	129,3	0,1	0,01
Summa:	646,0	0,0	0,38
Keskiarvo H:	129,2		

$$U_{HTM} = 2 * \sqrt{u_E^2 + u_{CRM}^2 + u_H^2 + u_x^2 + u_{ms}^2}$$

$$u_E = \frac{u_{E,2r} * x_{CRM}}{2,8} = \frac{0,03 * 128}{2,8} = 1,37 \quad /29, \text{ s. } 170./$$

$$u_{CRM} = \frac{U_{CRM}}{2} = \frac{1,5}{2} = 0,75$$

$$u_H = \frac{t * s_H}{\sqrt{n}} = \frac{1,14 * 0,308}{\sqrt{5}} = 0,157$$

$$u_{ms} = \frac{2\bar{H}}{d} * \frac{\delta_{ms}}{2\sqrt{3}} = \frac{129,2}{0,381} * \frac{0,0001}{2\sqrt{3}} = 0,0098 \quad /31, s. 76./$$

$$U_{HTM} = \pm 3,14$$

$$\text{Mittaustulos} = 129,2 \pm 3,14 \rightarrow 2,43 \% \text{ (M1)}$$

Taulukko 30. Mittausepävarmuuden määrittämiseen liittyvät tunnuksat ja tulokset

H	Mittaustulosten ka.	129,20 (1)	129,25 (2)
S _H	Keskihajonta	0,308 (1)	0,335 (2)
u _H	Standardimittausepäv.	0,171	
b	kovuusmittarin poikkeama	1,2 (1)	1,30 (2) → b = 1,22
U _{CRM}	vertailupalan mittausepävarmuus	± 1,50	
u _{CRM}	k = 2	± 0,75	
H _{CRM}	vertailupalan kovuus	128	
δ _{ms}	kovuusmittarin lukemistarkkuus	0,1	µm
u _{ms}	kovuusmittarin lukemistarkkuudesta johtuva epävarmuus	0,029	δ _{ms} /(2√3)
t	tasaantumisaika	1,14	
n	tulosten lkm	5	10
u _{HTM}	yhdistetty mittausepävarmuus	± 1,57	
U _{HTM}	laajennettu mittausepävarmuus	± 3,14	
U _{corr}	korjattu mittausepävarmuus	± 1,54	

Taulukossa 30 on tunnuksia ja vertailukovuuspalan arvoja epävarmuuslaskentaan.

Määritetään mittausepävarmuus menetelmällä 2. Esimerkissä on käytetty taulukon 31 tuloksia.

Taulukko 31. Ensimmäisen ja toisen mittaussarjan tulokset

mittausten lkm.	tulos Xi	Xi - H	(Xi - H) ²
1	129,0	-0,2	0,04
2	129,7	0,5	0,25
3	129,0	-0,2	0,04
4	129,0	-0,2	0,04
5	129,3	0,1	0,01
Summa:	646,0	0,0	0,38
Keskiarvo H:	129,2		

mittausten lkm.	tulos Xi	Xi - H	(Xi - H) ²
1	129,3	0,04	0,0016
2	129,0	-0,26	0,0676
3	129,3	-0,04	0,0016
4	129,0	-0,26	0,0676
5	128,7	-0,56	0,3136
Summa:	646,3	-1,08	0,45
Keskiarvo H:	129,3		

$$U_{corr=k} = k * \sqrt{u_{CRM}^2 + u_H^2 + u_x^2 + u_{ms}^2 + u_b^2}$$

u_H laskennassa käytetään suurempaa arvoista s_{H1} ja s_{H2}

$$s_b = \sqrt{\frac{1}{n_m - 1} \sum_{i=1}^{n_{m1}} (b_i - \bar{b})^2}$$

$$s_b = 0$$

$$u_b = \frac{t^* s_b}{\sqrt{n_m}} = 0$$

$$U_{\text{corr}} = 1,54$$

Mittaustulos korjatulla keskiarvolla: $\bar{X}_{\text{corr}} = (\bar{x} + \bar{b}) \pm U_{\text{corr}}$

$$\bar{X}_{\text{corr}} = 130,5 \pm 1,54 \text{ HV} \rightarrow 1,18 \% \text{ (M2)}$$

Mittaustulos korjatulla epävarmuudella: $\bar{X}_{\text{ucorr}} = \bar{x} \pm (U_{\text{corr}} + |\bar{b}|)$

$$\bar{X}_{\text{ucorr}} = 129,25 \pm 2,79 \text{ HV} \rightarrow 2,16 \% \text{ (M2)}$$

Tulos tarkoittaa, että mittausepävarmuuden sisältävä kovuusmittarin poikkeama täyttää standardin 6507-2 mukaisen enimmäisvaatimuksen $\pm 3 \%$. Menetelmällä 2 saatiin parempi tulos kuin menetelmällä 1.

Brinell

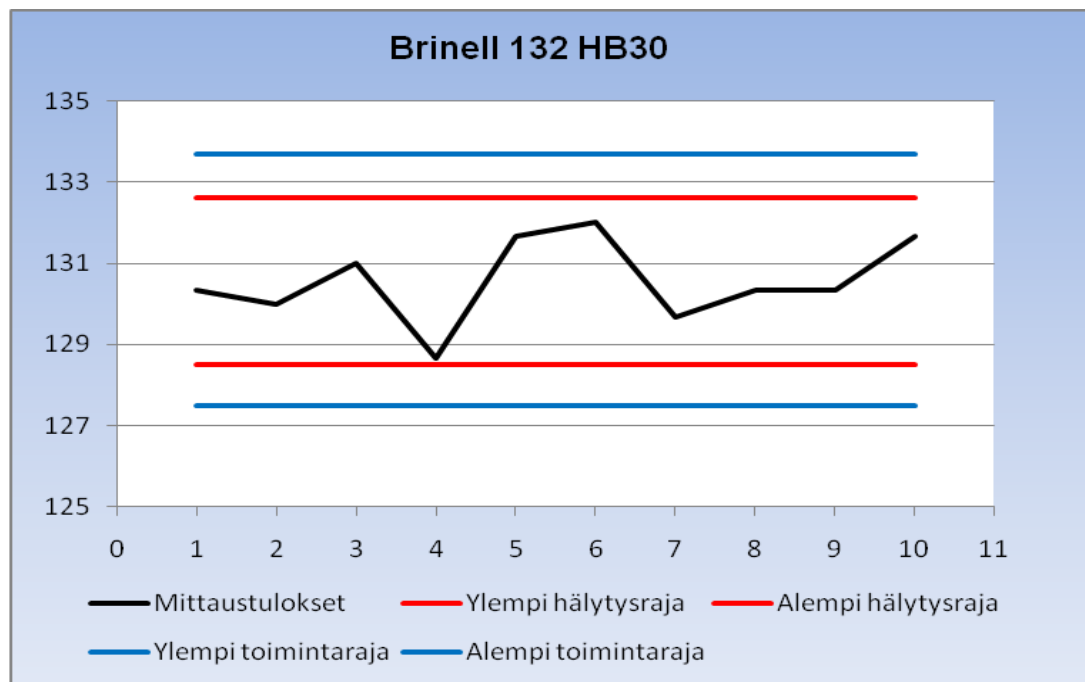
Mittauksia tehtiin kolmekymmentä. Tulokset ovat taulukossa 32. Laskettiin kolmen tuloksen keskiarvo, saatiin kymmenen keskiarvoa. Keskiarvojen perusteella määritettiin hälytys- ja toimintarajat (taulukko 33). Tuloksista piirrettiin kuvaaja (kuva 25).

Taulukko 32. KT-AMK:ssa mitatut tulokset

KT-AMK	Näyte			132	HB30	$\pm 2,3$	
mittauskerta	1	2	3	ka.	$X_i - H$	$(X_i - H)^2$	
1	131	133	127	130,3	-0,27	0,07	
2	131	127	132	130,0	-0,57	0,32	
3	132	131	130	131,0	0,43	0,18	
4	130	128	128	128,7	-1,87	3,50	
5	132	131	132	131,7	1,13	1,28	
6	131	134	131	132,0	1,43	2,04	
7	133	127	129	129,7	-0,87	0,76	
8	133	130	128	130,3	-0,27	0,07	
9	134	131	126	130,3	-0,27	0,07	
10	132	129	134	131,7	1,13	1,28	

Taulukko 33. Hälytysrajat

Ylempi hälytysraja	Alempi hälytysraja	Ylempi toimintaraja	Alempi toimintaraja
$H+2s_H$	$H-2s_H$	$H+3s_H$	$H-3s_H$
128,5	132,6	133,7	127,5

**Kuva 25. Brinellin tulosten kuvaaja**

Määritetään mittausepävarmuus menetelmällä 1. Laskennassa on käytetty taulukon 34 tuloksia.

Taulukko 34. Ensimmäisen mittaussarjan tulokset

Mittauskerta	Mittaustulokset	$X_i - H$	$(X_i - H)^2$
1	130,3	-0,27	0,07
2	130,0	-0,57	0,32
3	131,0	0,43	0,18
4	128,7	-1,87	3,50
5	131,7	1,13	1,28
Summa:	651,7	-1,15	5,35
Keskiarvo H:	130,3		

$$U_{HTM} = 2 * \sqrt{u_E^2 + u_{CRM}^2 + u_H^2 + u_x^2 + u_{ms}^2}$$
$$u_E = \frac{u_{E,2r} * x_{CRM}}{2,8} = \frac{0,025 * 132}{2,8} = 1,18 \quad /29, \text{ s. } 170./$$

$$u_{CRM} = \frac{U_{CRM}}{2} = \frac{2,3}{2} = 1,15$$

$$u_H = \frac{t * s_H}{\sqrt{n}} = \frac{1,14 * 1,16}{\sqrt{5}} = 0,59$$

$$u_{ms} = \frac{\delta_{ms}}{2\sqrt{3}} = \frac{1}{2\sqrt{3}} = 0,29 \quad /27, \text{ s. } 100 - 109./$$

$$U_{HTM} = 3,55$$

Mittaustulos = $130,3 \pm 3,55 \rightarrow 2,70 \%$ (M1)

Taulukko 35. Mittausepävarmuuden määrittämiseen liittyvät tunnuksat ja tulokset

H	Mittaustulosten ka.	130,30 (1)	130,80 (2)
S _H	Keskihajonta	1,16 (1)	1,12 (2)
u _H	Standardimittausepäv.	0,59	
b	kovuusmittarin poikkeama	-1,17 (1)	-1,12 (2) → b = 1,45
U _{CRM}	vertailupalan mittausepävarmuus	± 2,30	
u _{CRM}	k = 2	± 1,15	
H _{CRM}	vertailupalan kovuus	132	
δ _{ms}	kovuusmittarin lukemistarkkuus	0,1	μm
u _{ms}	kovuusmittarin lukemistarkkuudesta johtuva epävarmuus	0,029	δ _{ms} /(2√3)
t	tasaantumisaika	1,14	
n	tulosten lkm	5	10
u _{HTM}	yhdistetty mittausepävarmuus	± 1,775	
U _{HTM}	laajennettu mittausepävarmuus	± 3,55	
U _{corr}	korjattu mittausepävarmuus	± 2,65	

Taulukossa 35 on tunnuksia ja vertailukovuuspalan arvoja epävarmuuslaskentaan.

Määritetään mittausepävarmuus menetelmällä 2. Laskennassa on käytetty taulukon 36 tuloksia.

Taulukko 36. Ensimmäisen ja toisen sarjan tulokset

Mittauskerta	Mittautulokset	$X_i - H$	$(X_i - H)^2$
1	130,3	-0,27	0,07
2	130,0	-0,57	0,32
3	131,0	0,43	0,18
4	128,7	-1,87	3,50
5	131,7	1,13	1,28
Summa:	651,7	-1,15	5,35
Keskiarvo H:	130,3		

Mittauskerta	Mittautulokset	$X_i - H$	$(X_i - H)^2$
1	132,0	1,43	2,04
2	129,7	-0,87	0,76
3	130,3	-0,27	0,07
4	130,3	-0,27	0,07
5	131,7	1,13	1,28
Summa:	654,0	1,15	4,22
Keskiarvo H:	130,8		

$$U_{corr} = k * \sqrt{u_{CRM}^2 + u_H^2 + u_x^2 + u_{ms}^2 + u_b^2}$$

u_H laskennassa käytetään suurempaa arvoista s_{H1} ja s_{H2}

$$s_b = \sqrt{\frac{1}{n_m - 1} \sum_{i=1}^{n_{m1}} (b_i - \bar{b})^2}$$

$$s_b = 0,35$$

$$u_b = \frac{t * s_b}{\sqrt{n_m}} = \frac{1,14 * 0,35}{\sqrt{2}} = 0,28$$

$$U_{corr} = 2,65$$

Mittautulos korjatulla keskiarvolla: $\bar{X}_{corr} = (\bar{x} + \bar{b}) \pm U_{corr}$

$$\bar{X}_{corr} = 132 \pm 2,65 \text{ HBW} \rightarrow 2,00 \% \text{ (M2)}$$

Mittaustulos korjatulla epävarmuudella: $\bar{X}_{ucorr} = \bar{x} \pm (U_{corr} + |\bar{b}|)$

$$\bar{X}_{ucorr} = 130,6 \pm 4,10 \text{ HBW} \rightarrow 3,14 \% \text{ (M2)}$$

Sallittu virhe saa olla enintään 2,5 %.

6.2. Vetokoneen mittausepävarmuus KTAMK:ssa

Vetokoetesti tehtiin sekä ss- että din-sauvoilla. Alla olevassa taulukossa 37 on käsitelty KTAMK:n vetokoneella mitattuja tuloksia din-sauvoille.

Taulukko 37. Murtolujuuden tulokset

Murtolujuus Rm			
tulos Xi	Xi - H	(Xi - H) ²	
627,6	-0,5	0,3	
626,9	-1,2	1,4	
627,1	-1,0	0,9	
629,5	1,4	1,9	
629,4	1,3	1,7	
Summa	3140,6	0,0	6,2
Keskiarvo	628,1		
Keskihajonta	1,245		

Mittausepävarmuus laskettiin käyttämällä menetelmää A (toistettava mittaus).

$$u_{Rm} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{1,245}{\sqrt{5}} = 0,5568$$

Murtovenymä laskettiin samalla periaatteella. Esimerkissä on käytetty taulukon 38 tuloksia.

Taulukko 38. Murtovenymän tulokset

Murtovenymä A_{80}			
tulos X_i	$X_i - H$	$(X_i - H)^2$	
53,0	0,5	0,20	
53,4	0,9	0,84	
52,9	0,4	0,20	
53,4	0,9	0,73	
53,9	1,4	2,04	
Summa	266,59	4,09	4,01
Keskiarvo	53,30		
Keskihajonta	1,001		

Murtovenymän mittausepävarmuudeksi saatiin menetelmällä A:

$$u_{A80} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{1,001}{\sqrt{5}} = 0,4478$$

Lopuksi laskettiin murtolujuuden ja murtovenymän yhdistetty epävarmuus.

$$u(y) = \sqrt{(u(x_1))^2 + u(x_2)^2 + \dots + u(x_n)^2}$$

$$u(y) = \sqrt{0,5568^2 + 0,4478^2} = 0,7145$$

Laajennettu mittausepävarmuus

$$U = 2 \cdot u(y), (k = 2)$$

$$U = \pm 1,43$$

AMK:n vetokokeissa on käsin tehtäviä mittauksia. Tuloksista poistettiin hajontaa aiheuttaneet tulokset.

Taulukossa 39 on KTAMK:n vetokoneella mitattuja tuloksia ss-sauvoille.

Taulukko 39. Murtolujuuden tulokset

Murtolujuus R_m			
tulos Xi	Xi - H	(Xi - H) ²	
589,5	-0,4	0,1	
590,0	0,1	0,0	
593,2	3,3	10,8	
588,5	-1,4	2,0	
590,2	0,3	0,1	
588,1	-1,9	3,5	
590,4	0,5	0,2	
590,1	0,2	0,0	
589,3	-0,6	0,4	
Summa	5309,40	0,0	17,11
Keskiarvo	589,90		
Keskihajonta	1,462		

Mittausepävarmuus laskettiin käyttämällä menetelmää A (toistettava mittaus).

$$u_{Rm} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{1,462}{\sqrt{9}} = 0,4873$$

Murtovenymä laskettiin samalla periaatteella. Esimerkissä on käytetty taulukon 40 tuloksia.

Taulukko 40. Murtovenymän tulokset.

Murtovenymä A50			
tulos Xi	Xi - H	(Xi - H) ²	
52,96	-0,1	0,01	
52,72	-0,3	0,12	
53,38	0,3	0,09	
53,67	0,6	0,37	
53,21	0,1	0,02	
53,49	0,4	0,18	
53,03	0,0	0,00	
53,19	0,1	0,01	
52,11	-1,0	0,91	
52,91	-0,2	0,03	
Summa	530,67	0,00	1,75
Keskiarvo	53,10		
Keskihajonta	0,468		

7. YHTEENVETO

Kovuusmittaustuloksista voitiin todeta, että mittaasepävarmuus oli parempi menetelmällä 2. Menetelmässä 2 oli tuloksia käytettävänä enemmän, joten yksittäiset pienet heitot tuloksissa eivät aiheuttaneet niin paljon poikkeamia kuin pienemmässä erässä.

Verrattaessa tuloksia Outokummun Tornion tutkimuskeskuksen tutkimus- ja laadunvalvontalaboratorion ja Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun laboratorioden välillä oli kovuusmittausten mittaasepävarmuus lähes tulkoon sama. Pieniä eroavaisuuksia oli ja niiden uskotaan tulevan ulkoisista tekijöistä, kuten mittaajan vaihtumisesta ja eri laitteistosta. Menetelmässä 2, jossa huomioidaan kovuusmittarin aiheuttama systemaattinen virhe, oletetaan mittarin olevan kalibroitu ja näyttävän täysin oikein. Menetelmässä 1 mittarin aiheuttamaa virhettä ei huomioida ja epävarmuus lasketaan mittaustulosten perusteella.

Vickersin kovuudet olivat molemmissa laboratorioissa hyväksyttävät. Standardin mukaan tulokset olivat hyväksyttäviä, jos tulos oli alle 3 %. Siihen tulokseen päästiin sekä menetelmällä 1 että menetelmällä 2.

Brinellin menetelmässä oli jotakin pielessä, standardin mukaan tulosten piti olla alle 2,5 % ja ainoastaan menetelmällä 2 päästiin siihen tulokseen. Kuten aikaisemmin kerrottiin, yksittäiset heitot voivat aiheuttaa lopputuloksessa suuren poikkeaman. Sen vuoksi pitäisi aina, kun uutta tapaa aletaan käyttää, kerätä mittauksia pidemmältä ajanjaksolta, jotta ulkoiset virhetekijät saataisiin minimoitua.

Vetokoemittaukset tehtiin tutkimus- ja laadunvalvontalaboratoriossa robotilla, jossa on automaattinen paksuus-levyysmittari sekä manuaalisella vetokoneella, jossa tehdään käsin mittauksia työntömitalla ja mikrometrillä. Lopputuloksista voitiin todeta, että mittaasepävarmuus oli pienempi menetelmällä, johon ei kuulunut käsin tehtäviä mittauksia. AMK:ssa tehdyissä mittauksissa on myös käsin tehtäviä mittauksia ja siellä mittaasepävarmuus oli samaa luokkaa kuin tutkimus- ja laadunvalvontalaboratorion

mittauksissa. AMK:n tuloksista poistettiin hajontaa aiheuttaneet tulokset, koska ne olivat yksittäisiä, eikä voida tietää, johtuivatko ne materiaalista.

Vetokokeen mittausepävarmuuden laskentaan käytettiin tyyppiä A, jossa huomioitiin rutiinimittausten tulokset. Laskelmissa ei huomioitu laitteistoparametrien vaikutusta. Vetokokeen mittausepävarmuudessakin kannattaisi seurata mittauksia pidemmällä aikavälillä ja alkaa sitten vasta laskea epävarmuutta. Näin saataisiin luotettavimmat tulokset mittausepävarmuudesta.

Työ oli hyvin haastava ja mielenkiintoinen. Suurimmaksi ongelmaksi muodostui mittausepävarmuuden selvittäminen vetokokeeseen. Uusi vetokoestandardi oli vasta tullut ja sitä ei ollut vielä sovellettu käytäntöön kummassakaan laboratoriossa. Standardissa oli käsitelty epävarmuutta homogeeniseen materiaaliin ja siinä ei ollut huomioitu epähomogeenisuutta. Vetokokeen osalta mittausepävarmuuden selvittämiseen vaikuttavat monet eri asiat. Tässä työssä mittausepävarmuuden laskentaan huomioitiin murtolujuus ja murtovenymä. Laitteistoparametrien lisäksi vetokokeen mittausepävarmuuteen vaikuttavat ulkoiset asiat, kuten mittaaja, lämpötila ja ympäristö. Kovuusmittauksen epävarmuus oli helpompi selvittää, koska menetelmä on yksinkertaisempi. Kovuusmittausten osalta epävarmuuden selvittäminen oli kaavojen pyörittämistä, lisäksi standardeja joutuu käyttämään melko paljon kovuusmittausten epävarmuutta selvittäessä.

8. LÄHDELUETTELO

- /1/ Aaltonen, Kalevi, Seminaari Mittaukset konepajassa 30.5.2002, <https://noppa.tkk.fi/noppa/kurssi/kon-15.3122/materiaali/mittauskyky.pdf>, 2.12.2010.
- /2/ Euramet, Calibration Guide, http://www.euramet.org/fileadmin/docs/Publications/calguides/EURAMET-cg-16.01_Hardness.pdf, 5.7.2010.
- /3/ Gabauer W, SM&T Standards Measurement & Testing Project No. SMT4-ct97-2165, <http://www.docstoc.com/docs/50825514/The-Determination-of-Uncertainties-in-Notched-Bar-Creep-Rupture>, 5.7.2010.
- /4/ Huhtala Kyösti, Tilastollinen laadunohjaus, Jyväskylän yliopisto, 1993.
- /5/ Huhtala Kyösti, Tilastollinen laadunohjaus, Tampereen yliopisto, 1999.
- /6/ Karjalainen Asko, Mitä Benchmarking-arviointi on?, www oulu.fi/w5w/benchmarking/bm.RTF, 2.12.2010.
- /7/ Kume Hitoshi, Laadun parantamisen tilastolliset menetelmät, 1985.
- /8/ Kärhä, Petri, Mittausjärjestelmän kalibrointi ja mittausepävarmuus, http://metrology.hut.fi/courses/s108-180/Materiaali2004/uncert1_2004.pdf, 2.12.2010.
- /9/ Lähteenmäki Mika ja Leiviskä Kauko, Tilastollinen prosessinohjaus: perusteet ja menetelmät, <http://herkules oulu.fi/isbn9514275209/isbn9514275209.pdf>, 2.12.2010.
- /10/ Mattila Esko, Laaduntarkastukset terästeollisuudessa, Ruukki.
- /11/ Mikes Metrologia, Kemian metrologian opas, http://www.mikes.fi/documents/upload/j6_05_b5_nettiin.pdf, 2.12.2010.
- /12/ Niemi Pekka, K. Aineen koestus, http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/PN_jalkikasittely_K.pdf, 5.7.2010.
- /13/ Nordic Innovation Centre, Sisäinen laadunohjaus, http://www.nordicinnovation.net/nordtestfiler/tr569_trollboken_suomi_finnish_language.pdf, 2.12.2010.
- /14/ Oy FF-Chemicals Ab, Mittausepävarmuus, <http://ff-chemicals.fi/>, 2.12.2010.

- /15/ Polzin, Thomas, Experiences with the determination of uncertainty, <http://www.imeko.org/publications/tc5-2002/IMEKO-TC5-2002-025.pdf>, 2.12.2010.
- /16/ Polzin Thomas, Method for Uncertainty Determination of Hardness Testing, MP Materialprufung, Lehden numero 44, 2002, sivut 64 – 71.
- /17/ Salomäki Rauno, SPC-taskukirja.
- /18/ Sariola Kaisa, Tilastollinen prosessinohjaus, Johtamistaidon opisto.
- /19/ Sariola Kaisa, Mittausepävarmuus tilastollisesti tarkastellen, Johtamistaidon opisto.
- /20/ SFS3700 Perus- ja yleistermien sanasto.
- /21/ SFS-EN 10045-2.
- /22/ SFS-EN ISO/IEC 17025.
- /23/ SFS-EN ISO 18265.
- /24/ SFS-EN ISO 6506-1.
- /25/ SFS-EN ISO 6506-2.
- /26/ SFS-EN ISO 6506-3.
- /27/ SFS-EN ISO 6506-4.
- /28/ SFS-EN ISO 6507-1.
- /29/ SFS-EN ISO 6507-2.
- /30/ SFS-EN ISO 6507-3.
- /31/ SFS-EN ISO 6507-4.
- /32/ SFS-EN ISO 6508-1.
- /33/ SFS-EN ISO 6508-2.
- /34/ SFS-EN ISO 6508-3.
- /35/ SFS-EN ISO 6892-1.
- /36/ Siik Henri, Aineenkoetuslaboratorion tuotannonohjaus- ja raportointijärjestelmä, <http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/8772/Siik.Henri.pdf?sequence=2>, 2.12.2010.
- /37/ Tampere University of Technology, 7503020 Mittausten informaation sisältö ja datan luotettavuus, http://www.mit.tut.fi/7503020/7503020_Luento11.pdf, 2.12.2010.

/38/ Terästen iskutkeys, väsyminen ja haurasmurtuminen,
<http://www.terasrakenneyhdistys.fi/Esdep/12/HTML/WG2L32.htm>,
2.12.2010.

9. LIITELUETTELO

Liite 1 Kovuusmittausmenetelmien sallitut virheet

Liite 2 Manuaalisen vetokoneen tulokset

Liite 3 Vetokoetulosten kuvaajat

Rockwellin kovuusalueiden sallitut virheet (SFS-EN ISO 6508-2)

Rockwellin kovuusasteikko	Vertailukovuuspalan kovuusalue	Suurin sallittu virhe Rockwellin kovuusyksikköinä	Kovuusmittarin sallittu toistettavuus ^a
A	20...75 HRA > 75...88 HRA	±2 HRA ±1,5 HRA	≤ 0,02 (100 - \bar{H}) tai 0,8 Rockwellin yksikköä ^b
B	20...45 HRB > 45...80 HRB > 80...100 HRB	±4 HRB ±3 HRB ±2 HRB	≤ 0,04 (130 - \bar{H}) tai 1,2 Rockwellin yksikköä ^b
C	20...70 HRC	±1,5 HRC	≤ 0,02 (100 - \bar{H}) tai 0,8 Rockwellin yksikköä ^b
D	40...70 HRD > 70...77 HRD	±2 HRD ±1,5 HRD	≤ 0,02 (100 - \bar{H}) tai 0,8 Rockwellin yksikköä ^b
E	70...90 HRE > 90...100 HRE	±2,5 HRE ±2 HRE	≤ 0,04 (130 - \bar{H}) tai 1,2 Rockwellin yksikköä ^b
F	60...90 HRF > 90...100 HRF	±3 HRF ±2 HRF	≤ 0,04 (130 - \bar{H}) tai 1,2 Rockwellin yksikköä ^b
G	30...50 HRG > 50...75 HRG > 75...94 HRG	±6 HRG ±4,5 HRG ±3 HRG	≤ 0,04 (130 - \bar{H}) tai 1,2 Rockwellin yksikköä ^b
H	80...100 HRH	±2 HRH	≤ 0,04 (130 - \bar{H}) tai 1,2 Rockwellin yksikköä ^b
K	40...60 HRK > 60...80 HRK > 80...100 HRK	±4 HRK ±3 HRK ±2 HRK	≤ 0,04 (130 - \bar{H}) tai 1,2 Rockwellin yksikköä ^b
N		±2 HRN	≤ 0,04 (100 - \bar{H}) tai 1,2 Rockwellin yksikköä ^b
T		±3 HRT	≤ 0,06 (100 - \bar{H}) tai 2,4 Rockwellin yksikköä ^b

^a missä \bar{H} on kovuuden keskiarvo
^b kumpi arvoista on suurempi

Brinellin menetelmän sallittu virhe. (SFS-EN ISO 6506-2)

Vertailukovuuspalan kovuus	Kovuusmittarin sallittu suhteellinen toistettavuus r_{rel}	Kovuusmittarin sallittu virhe E_{rel}
HBW	%	% H
≤ 125	3,0	±3,0
125 < HBW ≤ 225	2,5	±2,5
> 225	2,0	±2,0

HBW: Brinellin kovuus.

Vickersin menetelmän sallittu virhe (SFS-EN ISO 6507-2)

Kovuuden tunnus	Kovuusmittarin suurin sallittu virhe prosentteina, E_{rel}															
	Kovuus, HV															
	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700	800	900	1 000	1 500
HV 0,01																
HV 0,015	10															
HV 0,02	8															
HV 0,025	8	10														
HV 0,05	6	8	9	10												
HV 0,1	5	6	7	8	8	9	10	10	11							
HV 0,2		4		6		8		9		10	11	11	12	12		
HV 0,3		4		5		6		7		8	9	10	10	11	11	
HV 0,5		3		5		5		6		6	7	7	8	8	9	11
HV 1		3		4		4		4		5	5	5	6	6	6	8
HV 2		3		3		3		4		4	4	4	4	5	5	6
HV 3		3		3		3		3		3	4	4	4	4	4	5
HV 5		3		3		3		3		3	3	3	3	3	4	4
HV 10		3		3		3		3		3	3	3	3	3	3	3
HV 20		3		3		3		3		3	3	3	3	3	3	3
HV 30		3		3		2		2		2	2	2	2	2	2	2
HV 50		3		3		2		2		2	2	2	2	2	2	2
HV 100				3		2		2		2	2	2	2	2	2	2

HUOM. 1 Arvoja ei esitetä, kun painuman lävistäjän pituus on alle 0,020 mm.

HUOM. 2 Välillä jäävien arvojen suurimmat sallitut virheet voidaan laskea interpoloimalla.

HUOM. 3 Mikrokovuusmittareiden arvot perustuvat painuman lävistäjien keskiarvon suurimpaan sallittuun virheeseen 0,001 mm tai 2 %, riippuen kumpi arvoista on suurempi.

Manuaalisen vetokoneen tulokset (TRC)

Din sauvojen tulokset

Murtolujuus R_m

tulos X_i	$X_i - H$	$(X_i - H)^2$
629	-2,6	6,76
630	-1,6	2,56
634	2,4	5,76
630	-1,6	2,56
630	-1,6	2,56
632	0,4	0,16
632	0,4	0,16
633	1,4	1,96
633	1,4	1,96
633	1,4	1,96

Summa	6316,0	0,0	26,40
Keskiarvo	631,6		
Keskihajonta	1,713		

Murtovenymä A_{80}

tulos X_i	$X_i - H$	$(X_i - H)^2$
53	0,5	0,25
55	2,5	6,25
52	-0,5	0,25
51	-1,5	2,25
52	-0,5	0,25
52	-0,5	0,25
52	-0,5	0,25
53	0,5	0,25
53	0,5	0,25
52	-0,5	0,25

Summa	525,00	0,00	10,50
Keskiarvo	52,5		
Keskihajonta	1,080		

yhdistetty mittausepävarmuus	0,638
laajennettu mittausepävarmuus	1,276

Ss-sauvojen tulokset

Murtolujuus Rm		
tulos Xi	Xi - H	(Xi - H) ²
596,0	1,3	1,69
594,0	-0,7	0,49
596,0	1,3	1,69
594,0	-0,7	0,49
595,0	0,3	0,09
595,0	0,3	0,09
597,0	2,3	5,29
593,0	-1,7	2,89
594,0	-0,7	0,49
593,0	-1,7	2,89

Summa	5947,0	0,0	16,10
Keskiarvo	594,7		
Keskihajonta	1,337		

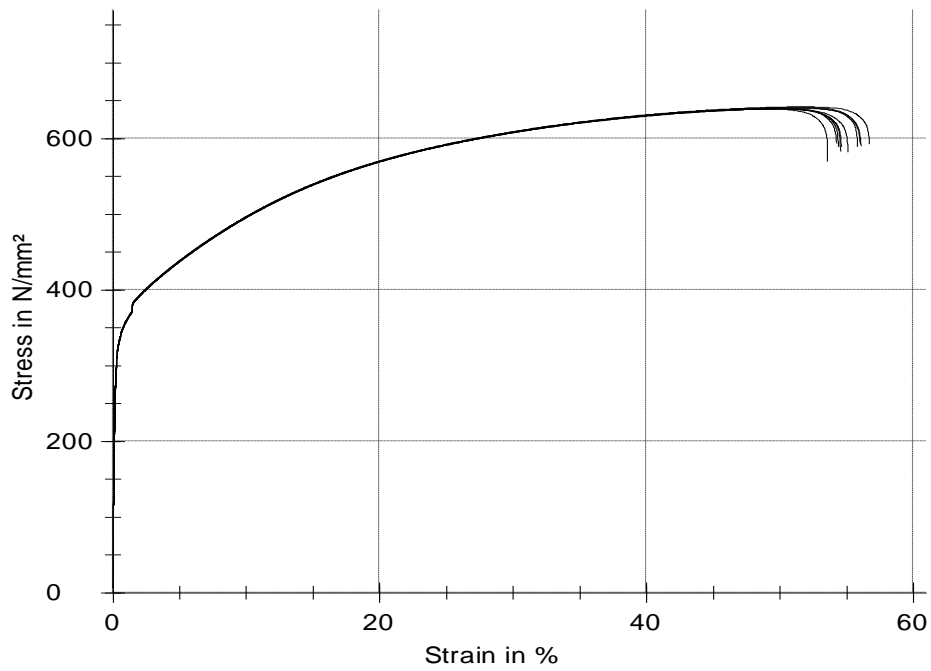
Murtovenymä A50		
tulos Xi	Xi - H	(Xi - H) ²
52,5	0,1	0,01
52,0	-0,4	0,15
52,6	0,2	0,04
52,1	-0,3	0,08
52,5	0,1	0,01
52,9	0,5	0,26
52,1	-0,3	0,08
52,7	0,3	0,10
51,9	-0,5	0,24
52,6	0,2	0,04

Summa	523,90	0,00	1,03
Keskiarvo	52,4		
Keskihajonta	0,338		

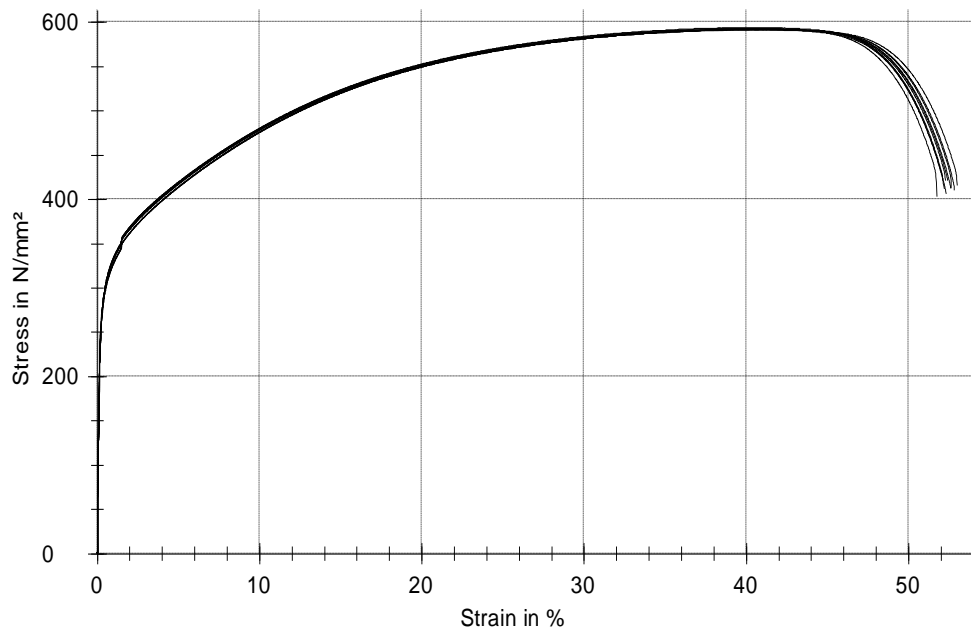
yhdistetty mittausepävarmuus	0,436
laajennettu mittausepävarmuus	0,872

Robotin Zwick / Roell Z250 tulosten kuvaajat

Din standardin mukaisten sauvojen jännitys-venymäkuvaajat.

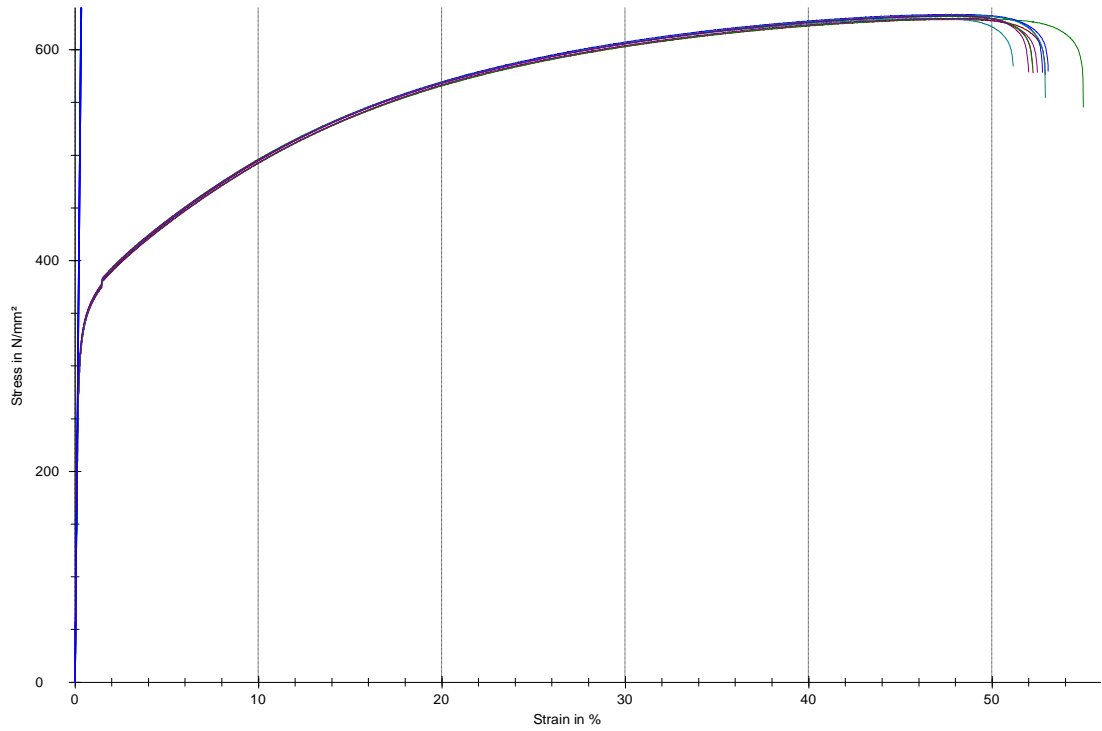


SS standardin mukaisten sauvojen jännitys-venymäkuvaajat.

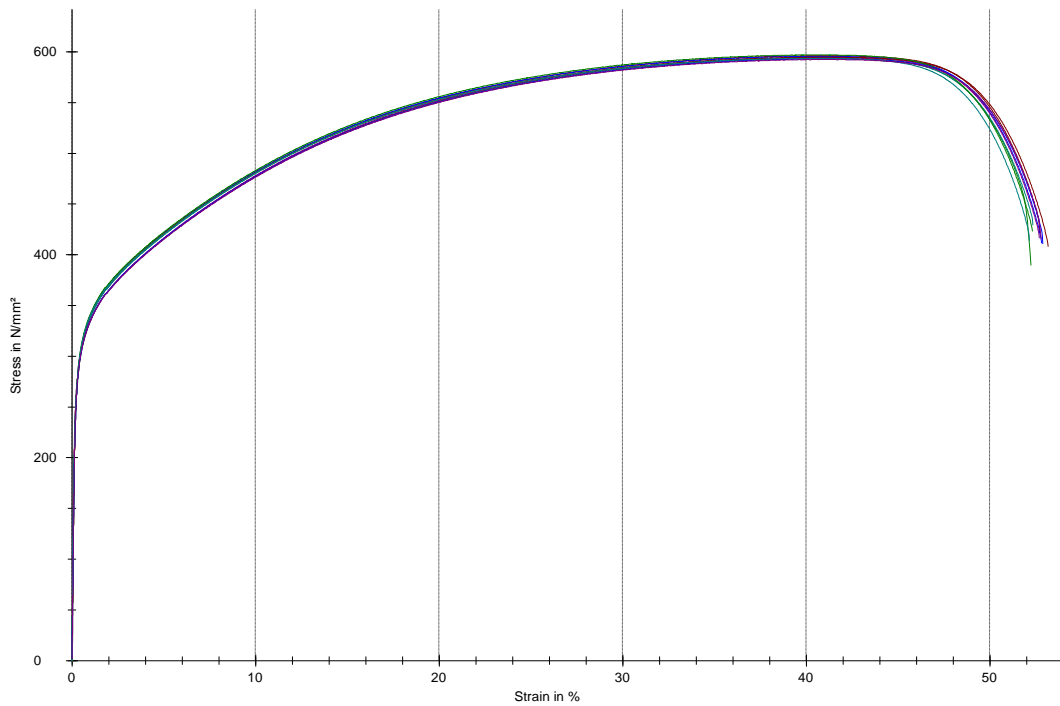


Manuaalisen vetokoneen Zwick Z250 tulosten kuvaajat

Din standardin mukaisten sauvojen jännitys-venymäkuvaajat.

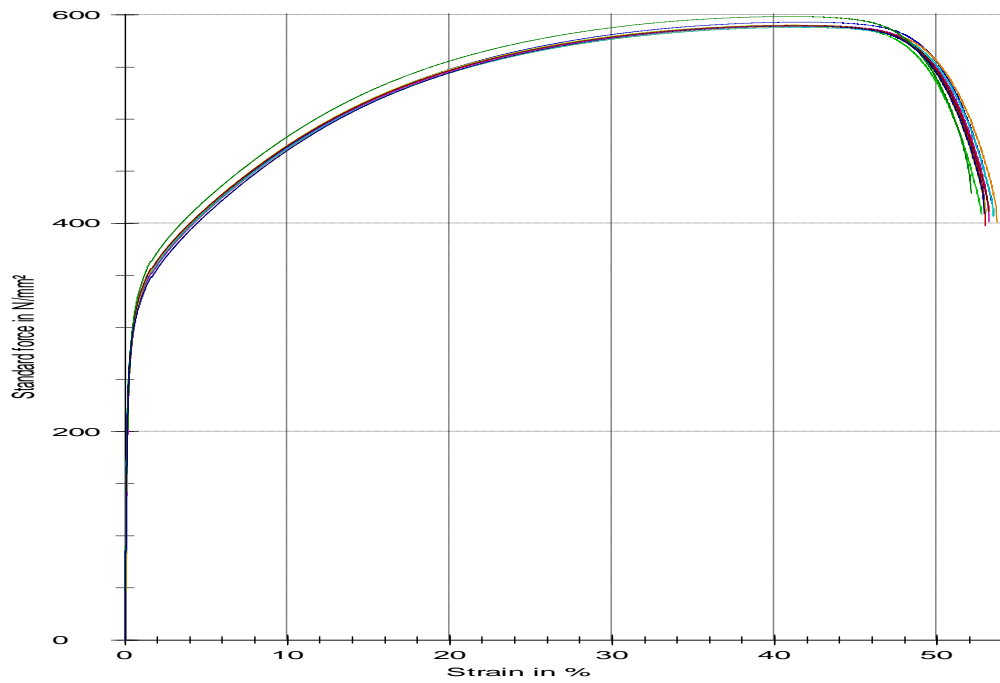


SS standardin mukaisten sauvojen jännitys-venymäkuvaajat.



KTAMK:n vetokoneen Zwick/Roell Z250 tulosten kuvaajat

Din standardin mukaisten sauvojen jännitys-venymäkuvaajat.



SS standardin mukaisten sauvojen jännitys-venymäkuvaajat.

