



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Suvi Turunen

Kalibrointikovuuden ja -materiaalin vaikutuksien arviointi kenttäkovuusmittauksessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Bio- ja kemiantekniikka

Insinöörityö

27.11.2019

Tekijä Otsikko	Suvi Turunen Kalibrointikovuuden ja -materiaalin vaikutuksien arviointi kenttäkovuusmittauksessa
Sivumäärä Aika	63 sivua + 14 liitettä 27.11.2019
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Bio- ja kemiantekniikka
Ammatillinen pääaine	Materiaali- ja pinnoitetekniikka
Ohjaajat	Lehtori Juha Kotamies Johtava asiantuntija Johanna Tuiremo
<p>Tämän insinööryön tavoitteena oli selvittää millä tavalla kalibrointikappaleen kovuus ja materiaali sekä mitattavan kohteen muoto vaikuttavat kenttäkovuusmittarilla saatuihin kovuusmittaustuloksiin. Työssä käytettiin Struersin sertifioituja kalibrointikappaleita sekä teräksestä X10CrMoVNb9-1 valmistettuja vertailukappaleita. Vertailukappaleet on lämpökäsitelty aiemmin Kiwa Inspectalle tehdyn insinööryön yhteydessä, jossa haettiin sopivia lämpökäsittelyparametreja. Tämän työn yhteydessä X10CrMoVNb9-1 kappaleiden materiaali varmistettiin OES-laitteistolla ja validoitiin pöytäkovuusmittarilla. Näitä kappaleita käytettiin kalibrointikappaleina mitattaessa X10CrMoVNb9-1 putkimateriaalia.</p> <p>Mittaukset suoritetaan kahdella eri UCI-menetelmää käyttävällä kenttäkovuusmittarilla, joista toista operoidaan koevoimalla 49 N, kun puolestaan toisessa käytettävät koevoimat ovat 49 N ja 98 N.</p> <p>Teoria osuudessa perehdytään kovuuteen käsitteenä, kovuusmittauksen periaatteeseen sekä kenttäkovuusmittareiden käyttämään UCI-menetelmään. Osuudessa käydään läpi myös mittaushetkiä, joissa kenttäkovuusmittausta voidaan hyödyntää.</p> <p>Mittauksissa ilmeni, että kovuusmittaustulosten tarkkuus lisääntyi, kun kalibrointikappaleen kovuus oli samalla tasolla tai hieman kovempi kuin mitattavat kappale. Käytettäessä mitattavaa kappaletta huomattavasti pehmeämpää kalibrointikappaletta kalibrointikorjauksen merkitys kasvaa. X10CrMoVNb9-1 -putken mittauksissa ilmeni, että pinnan kaarevuudella oli vaikutusta tuloksiin; tuloksissa oli suuri hajonta kunkin mittarin ja anturin kohdalla. Poikileikkauksesta mitatut arvot olivat tasaiset ja keskenään verrattavat. Teräslajin vaikutuksesta kovuusmittaustulokseen, eli kun kalibrointikappale ja mitattava kohde olivat samaa materiaalia, ei saatu selkeää näyttöä.</p>	
Avainsanat	Kovuus, kovuusmittaus, Vickers-kovuus, UCI, kalibrointi

Author Title	Suvi Turunen Calibration Hardness and Material in Hardness Testing
Number of Pages Date	63 pages + 14 appendices 27 November 2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Biotechnology and Chemical Engineering
Professional Major	Material Technology and Surface Engineering
Instructors	Juha Kotamies, Project Manager Johanna Tuiremo, Leading Specialist
<p>The purpose of this thesis was to determine how the calibration hardness, calibration material and the curved surface affects the results obtained in the field hardness measurement. Struers certified calibration pieces and the reference pieces made of steel X10CrMoVNb9-1 were used in the work. The reference pieces have been heat treated in connection with a thesis made for Kiwa Inspecta earlier, where the purpose was to solve suitable heat treatment parameters. [1]. In this work, the material of the X10CrMoVNb9-1 reference pieces were verified with OES-analyzation and validated with a laboratory hardness tester. The reference pieces acted as calibration pieces along with the calibration pieces when testing the piping material X10CrMoVNb9-1.</p> <p>Measurements were performed with two different field hardness testers using the UCI-method., one of which was operated at a force of 49 N, while the other is operated at test forces 49 N and 98 N.</p> <p>The theory section addresses the concept of hardness, the principle of the hardness measurement and the UCI method used in field hardness testers. The theory part also presents measurement sites where hardness testing can be used.</p> <p>The measurements showed that the accuracy of the hardness measurement results increased when the calibration piece was at the same hardness or slightly harder than the piece to be measured. The use of a significantly softer calibration piece increases the significance of the calibration correction. Measurements of the X10CrMoVNb9-1 pipe revealed that the curvature of the surface affected the results; the results showed a large dispersion for each meter and sensor. Values got from the cross-section of the pipe were even and comparable. There was no clear evidence of the effect of the steel grade on the hardness test result, i.e. when the calibration piece and the test object were the same material.</p>	
Keywords	Hardness, hardness testing, Vickers hardness, UCI, calibration

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Kiwa Inspecta	1
2.1	Kiwa Inspectan juuret Suomessa	1
2.2	Inspectan palvelut	2
2.3	ACTA*, Kiwa ja Shield Group	3
3	Kovuus ja kovuusmittaus	4
3.1	Kovuus	4
3.2	Kovuusmittaus	5
3.2.1	Kovuusmittauksen historiaa	5
3.2.2	Kovuusmittauksen suorittaminen eri menetelmillä	5
3.3	Kovuuden yhteys muihin mekaanisiin ominaisuuksiin	6
3.4	Kenttäkovuusmittaus	7
4	Vickers-kovuusmittaus ja UCI	9
4.1	Vickersin mittausperiaate	9
4.2	UCI-mittausperiaate	11
4.3	Kimmokertoimen vaikutus UCI-menetelmässä	13
4.4	Edut ja rajoitukset	14
5	Kenttäkovuusmittaukseen vaikuttavia tekijöitä	15
5.1	Mittaajan vaikutus	16
5.2	Kappaleen vaikutus	16
5.3	Testattavan pinnan vaikutus	18
5.4	Mittakärjen vaikutus	19
5.5	Ympäristön vaikutus	19
6	Kovuuden mittaaminen	20
6.1	Elinkaaren alussa	20
6.2	Elinkaaren aikana	21
6.3	Hitsauksen ja lämpökäsittelyn onnistuminen	21

7	Kalibrointi	22
7.1	Kalibroinnin tarkoitus	23
7.2	Kalibrointi ja vertailupalan ero	23
8	Käytettävät mittarit ja anturit	25
8.1	Mittarit	25
8.2	Anturit	26
9	Kokeellisen osuuden valmistelu	27
9.1	Materiaalintunnistus, OES	27
9.2	Vertailupalasarjan valmistus	30
9.3	Laboratoriossa suoritettu pöytäkovuusmittaus	30
10	Kokeellinen osuus	32
11	Mittaukset ja havainnot	33
11.1	Vertailupalasarja	34
11.1.1	Vertailupala 1	35
11.1.2	Vertailupala 2	36
11.1.3	Vertailupala 3	39
11.2	Putkistomateriaali X10CrMoVNb9-1	42
11.2.1	Anturi 1	44
11.2.2	Anturi 2	49
11.2.3	Anturi 3	53
12	Pohdinta	56
	Lähteet	56

Liitteet

Liite 1. Käytettävät laitteet

Liite 2. Mittauksissa käytettävät kalibrointikovuudet

Liite 3. Eri ferriittiset teräkset. Kalibrointipala 149,5 HV5; kalibrointi

Liite 4. Eri ferriittiset teräkset. Kalibrointipala 149,5 HV5; mittaukset

Liite 5. Eri ferriittiset teräkset. Kalibrointipala 239,3 HV5; kalibrointi

Liite 6. Eri ferriittiset teräkset. Kalibrointipala 239,3 HV5; mittaukset

Liite 7. Eri ferriittiset teräkset. Kalibrointipala 344 HV5; kalibrointi.

Liite 8. Eri ferriittiset teräkset. Kalibrointipala 344 HV5; mittaukset

Liite 9. X10CrMoVNb9-1-putki. Anturi 1; kalibrointi

Liite 10. X10CrMoVNb9-1-putki. Anturi 1; mittaustulokset

Liite 11. X10CrMoVNb9-1-putki. Anturi 2; kalibrointi

Liite 12. X10CrMoVNb9-1-putki. Anturi 2; mittaustulokset

Liite 13. X10CrMoVNb9-1-putki. Anturi 3; kalibrointi

Liite 14. X10CrMoVNb9-1-putki. Anturi 3; mittaustulokset

Lyhenteet

HAZ	Heat Affect Zone (hitsin muutosvyöhyke)
HV	Hardness Vickers, Vickers-kovuus
NDT	Non Destructive Testing (rikkomaton aineenkoetus)
OES	Optical Emission Spectrometry, (optinen emissiospektrometri)
PMI	Positive Material Identification (positiivinen materiaalintunnistus)
R _a	Pinnankarheus, average roughness value (keskiarvollinen karheusarvo)
SD	Standard Deviation (keskihajonta)
TIC	Testing, Inspection and Certification (testaus, tarkastus ja sertifiointi)
TIV	Through-Indenter-Viewing, Vickers-menetelmään perustuva optinen tutkimusmenetelmä
TTK	Teknillinen tarkastuskeskus
TTL	Teknillinen tarkastuslaitos
UCI	Ultrasonic Contact Impedance (ultraäänikontakti-impedanssi)

1 Johdanto

Tämän insinööri työ aiheen on antanut Kiwa Inspecta Oy:n materiaalitekniikan yksikkö ja työssä tutkitaan eri ferriittisten terästen vaikutusta kenttäkovuusmittauksessa. Mittauksissa käytetään Struersin kalibrintipaloja sekä kuimalujasta teräksestä valmistettuja vertailupaloja kolmessa eri kovuudessa. Työssä kovuusmittausta suoritetaan myös X10CrMoVNb9-1-putkelle.

Vertailupalasarjan mittauksissa tuloksia tarkastellaan siltä näkökannalta, vaikuttaako kalibrintipalan kovuus tai mahdollinen kalibrintipalan erilainen seostus mittaustuloksiin. Putken mittauksissa kenttäkovuusmittarit kalibroidaan niin kalibrintipaloilla kuin vertailupalasarjalla ja tarkastellaan saatujen mittaustulosten eroavaisuuksia.

Mittauksia suoritetaan insinööri työ aikana kenttäkovuusmittareilla myös alumiinisiin kalibrintikappaleisiin sekä messinkiseen kappaleeseen, tarkastellen mittareiden soveltuvuutta kyseisille materiaaleille. Raportointi mittaustuloksista on jätetty työn ulkopuolelle.

2 Kiwa Inspecta

Hollantilainen ACTA*, Kiwa ja Shield Groupin holding-yhtiö osti suomalaisen Inspectan vuonna 2015. Kauppa toteutui 9. kesäkuuta, kun brittiläinen investointiyritys 3i, ICG ja Inspectan toimiva johto myi osakkeensa. Kiwa kiinnostui Inspectan sertifiointipalveluiden maajohtajuudesta Suomessa sekä tarkastuspalveluiden osaamisesta teollisuuden ja kiinteistöjen puolella Pohjoismaissa. Yritystoston jälkeen ACTA*:sta kasvoi yksi alan suurimmista TIC (Testing, Inspection and Certification) -alan yrityksistä. Kiwa, Shield Group ja Inspecta yhdessä työllistävät noin 4 500 henkilöä 40 maassa. [1; 2.]

2.1 Kiwa Inspectan juuret Suomessa

Kiwa Inspectan juuret ulottuvat Suomessa yli 40 vuoden taakse, kun Suomen valtio perusti Teknillisen tarkastuslaitoksen (TTL) vuonna 1975. TTL perustettiin varmistamaan

painelaitteiden ja turvallisuuskriittisten kohteiden turvallisuutta. Nimi muutettiin myöhemmin Teknilliseksi tarkastuskeskukseksi, TTK:ksi, ennen kuin markkinoiden vapautuminen vuonna 1998 aloitti Inspecta Oy:n toiminnan. [3.]

Inspecta on 2000-luvulla kasvattanut markkinaosuuttaan Suomessa, Pohjoismaissa ja Baltiassa ja on kasvanut merkittäväksi tarkastus-, testaus- ja sertifiointiyritykseksi Pohjoisessa Euroopassa. Samaan aikaan Inspectan nykyinen omistaja Kiwa laajensi toimiansa Keski-Euroopassa. Inspectan henkilöstömäärä tuplaantui ja toiminta laajeni kolmesta maasta kahdeksaan brittiläisen 3i:n omistuksen aikana vuosina 2007-2015, jonka jälkeen yrityksen omistus vaihtui [1]. Kesällä 2017 yritys työllisti 600 henkeä Suomessa. Kiwa Inspectan Suomen pääkonttori sijaitsee Helsingissä [4]. Kiwa konserniin siirtyminen uudisti yrityksen logon (kuva 1.). [3.]



Kuva 1. Kiwa Inspectan vanha logo ja uusi logo. [5;6.]

Siirtyminen Kiwa-konserniin on vienyt Suomesta ulkomaille tarkastusosaamista teollisten ja kiinteistöjen laitteistojen osalta. Inspecta vaihtoi uudeksi brändinimekseen Kiwa Inspecta 6.9.2017. Samalla yrityksen ulkoasu ja logo uudistuivat. Uudistus on tapa selkeyttää useita brändejä sisältävää Kiwa-konsernia ja tehdä palveluiden kansainvälisyys näkyväksi. Maayhtiöllä on tästä huolimatta itsenäinen asema konsernissa. [2;4.]

2.2 Inspectan palvelut

Nykyään Kiwa Inspecta tarjoaa testaus-, tarkastus-, sertifiointi- ja teknisten alojen konsultointipalveluita sekä koulutuksia eri alojen tarpeisiin mm. teollisuudessa, rakennusteollisuudessa, kaupan alalla ja muilla aloilla. Rakennusten, koneiden, laitteiden ja prosessien turvallisuutta, toimivuutta ja luotettavuutta parannetaan tarkastuksien, testausten ja sertifiointien avulla. [7.]

Tarkastus- ja testauspalveluita Kiwa Inspecta suorittaa massiivisista painelaitteista pieniin mittalaitteisiin. Tarkastuksia voidaan suorittaa laitteen koko eliniän ajan, ja päämääränä on taata turvallinen laitteen käyttö, havaiten ennakkoon varoitusmerkkejä mahdollisista tulevista laitteenkäyttöön tai materiaalin kestävyysliittyvistä ongelmista. Tarkastuksia ja testauksia suoritetaan mm. sähkölaitteille, painelaitteille, mittalaitteille, nostureihin ja nostolaitteisiin. NDT (rikkomaton aineen koetus) -tarkastusten ja DT (rikkova aineen koetus) -tarkastusten puolella testataan mm. hitsien kuntoa ja niiden sopivuutta käyttökohteeseen, teollisia putkistoja korroosion varalta sekä turbiineja, generaattoreita ja prosessisäiliöitä. [8; 9.]

Teknologiapalvelut pitävät sisällään vaurioselvityksiä, kunnonseurantaa, eliniän arviointia, projektien riskien hallintaa ja riskikartoituksia. Myös vaurioselvitykset sekä hiili- ja lämpökamerakuvaukset ovat yrityksen teknologiapalveluiden piirissä. Kiinteistöjen puolella Kiwa Inspecta voi toimia kumppanina rakennuksen koko elinkaaren ajan. Yrityksen puolelta saa apua suunnittelusta rakentamiseen, kuntoarvioiden suorittamiseen sekä huolehtimaan rakennusten terveellisyydestä mitaten sisäilmaa ja haitta-aineita. Kiinteistöissä voidaan tarkastaa myös palo- ja sammutusjärjestelmiä sekä hissejä, liukuportaita ja ovia. Kiwa Inspectan palvelut sisältävät myös tuotteiden ja palveluiden sertifiointia sekä koulutuksia. [8; 10; 11.]

2.3 ACTA*, Kiwa ja Shield Group

ACTA* sai alkunsa vuonna 1948, kun hollantilaiset vesiyhtiöt perustivat Kiwa NV:n juomavesijärjestelmien sertifiointia ja testausta varten. Kiwa tulee sanoista the Keurings-Instituut voor Waterleiding Artikelen (Vesilaitostuotteiden Tutkimusinstituutti (Dutch Waterworks Testing and Research Institute)). Vuodesta 2004 alkaen on ACTA* yritysostojen, orgaanisen kasvun ja laajentuneen palveluvalikoiman kautta muokkautunut kansainväliseksi testaus- tarkastus- ja sertifiointiyritykseksi. Yhtiön omistaa ACTA*:n toimiva johto ja sijoittaja NPM Capital, yrityksen pääkonttori sijaitsee Rijswijkissä, Alankomaissa. [1;12;13.]

Kiwa toimii 22 maassa tuottaen TIC-palveluita tuotteille, prosesseille, järjestelmille ja ihmiselle monilla markkina-alueilla, kuten energia, rakentaminen, elintarvikkeet, turvallisuus ja koulutus. Shield-ryhmä puolestaan keskittyy vaarallisten materiaalien määräysten valvontaan ja riskienhallintaan niin elin- ja työympäristössä kuin merenkulussa. Shield liittyi ACTA*:aan vuonna 2009 ja toimii aktiivisena seitsemässä Euroopan maassa. [1;12.]

3 Kovuus ja kovuusmittaus

Määritelmänä kovuus on keskusteltu aihe tekniikan parissa ja sillä on useita määritelmiä. Kovuus ei ole materiaalin perusominaisuus vaan siihen vaikuttavat useat tekijät muun muassa materiaalin valmistuksen aikana. [14;15.]

3.1 Kovuus

Materiaalin kovuuden määrittävät monet tekijät. Metallurgisesti kovuus määritellään aineen kyvyksi vastustaa siihen tunkeutuvaa esinettä eli kovuus on materiaalin kyky vastustaa plastista eli pysyvää muodonmuutosta kuormituksen aikana. Tämä ominaisuus täydentää materiaalin kimmomoduulia, joka mittaa materiaalin kykyä vastustaa elastista eli palautuvaa muodonmuutosta jännityksen vaikutuksen alaisena. Kovuuden muita määritelmiä ovat aineen kyky vastustaa kulumista, naarmuuntumista ja leikkaamista. [16; 17; 18; 19.]

Kovuudella on yhteyksiä materiaalin muihin ominaisuuksiin, mm. murtolujuuteen. Kovuusarvo on kuitenkin tapauskohtainen ja absoluuttisia materiaalikohtaisia standardeja kovuudelle ei ole. On esimerkiksi haasteellista puhua tietyn teräksen kovuudesta, jos teräkselle suoritettuja lämpökäsittelyjä ei tunneta. Lämpökäsittely aiheuttaa teräksen mikrorakenteeseen muutoksia, ja näin ollen se vaikuttaa myös teräksen kovuuteen. Kovuudelle voidaan kuitenkin saada kvantitatiivinen arvo, kun voima, aika ja testausmenetelmä tunnetaan. [19; 20.]

Kovuus on hyödyllinen apuväline arvioitaessa materiaalin kulumiskestävyyttä ja likimääräistä teräksen lujuusarvoa. Kuitenkaan suoraa riippuvuussuhdetta muiden materiaalin mekaanisten ominaisuuksien tai käytön aikaisen käyttäytymisen ja kovuuden välillä ei ole. [21.]

3.2 Kovuusmittaus

Kovuusmittaus on materiaalin testausmenetelmä, jossa suhteellisen nopeasti saadaan tietoa materiaalista. Erilaisia testejä mitata materiaalin kovuutta on käytetty jo yli 250 vuotta. Kovuuden mittauksessa on käytössä useita erilaisia menetelmiä, jotka ovat mahdollistaneet laajat sovellusmahdollisuudet. Yleisesti menetelmää valittaessa on mietittävä, mitataanko kovuutta laboratorio-olosuhteissa vai kentällä, minkä kokoinen on mitattava komponentti ja miksi mittaus suoritetaan. [22; 23.]

3.2.1 Kovuusmittauksen historiaa

Kovuusmittauksen ensimmäisiä apuvälineitä oli tanko, jonka kovuus kasvoi tangon päästä päähän. Kappaleen kovuus määriteltiin tällöin sen perusteella, mihin kohtaan tankoa naarmuja alkoi syntyä. Kehityksen myötä syntyi timantilla materiaalin pintaa naarmuttava menetelmä, joka perustui aiheutuneen uran leveyden mittaukseen ja sen seurauksena metallipallon tunkeutumaan perustuva mittaus. Maailmanlaajuinen teollistuminen ja maailmansotien aikaiset tarpeet kehittivät hienostuneempia kovuusmittaustekniikoita laadukkaampien materiaalien aikaansaamiseksi sekä tuotannon kasvaviin tarpeisiin. [22.]

3.2.2 Kovuusmittauksen suorittaminen eri menetelmillä

Kovuusmittaus on erinomainen tapa testata materiaalia, vaikka tietty kovuus ei ole materiaalin perusominaisuus. Yleisimmin käytössä olevat kovuusmittaustekniikat perustuvat materiaalin kykyyn vastustaa plastista eli pysyvää muodonmuutosta. Näitä ovat Vickers-, Rockwell-, Brinell- ja Knoop-testi, jossa pyramidin, pallon tai kartion muotoinen kärki painetaan kappaleen pintaan. Kovuutta voidaan mitata myös muun muassa kimmahdusmenetelmällä (Leeb) ja ultraäänellä (Ultrasonic Contact Impedance, UCI), joita

käytetään kenttäkovuusmittareissa. Kenttäkovuusmittaus lasketaan NDT (Non Destructive Testing) -testauksen piiriin, kun puolestaan laboratorioissa käytettävä pöytäkovuusmittari vaatii kappaleelta suurempia esivalmisteluja, ja näin ollen lukeutuu DT (Destructive Testing) -testauksen piiriin. Pöytäkovuusmittauksen aiheuttamat painaumat testikappaleen pinnassa on nähtävillä kuvassa 2. [16; 17; 22.]



Kuva 2. Pöytäkovuusmittarin aiheuttamat mittausjäljet kappaleen pinnassa.

Eri menetelmillä (esim. Vickers-, Rockwell-, Brinell- ja Knoop) saatuja arvoja ei suoraan voida verrata keskenään, koska tulokset poikkeavat toisistaan. On kuitenkin olemassa suosituksia, jotka antavat likimääräisiä muunto arvoja. Suositukset on saatu aikaan verrattaessa tiettyjä materiaaleja eri testausmenetelmillä. Matemaattista yhtälöä ei kovuusien välillä ole, ja näin ollen kovuusasteikot ovat täysin verrattavissa vain saman testausmenetelmän tuloksiin. [23.]

3.3 Kovuuden yhteys muihin mekaanisiin ominaisuuksiin

Kovuusmittaus ja vetokoe mittaavat metallin kykyä vastustaa pysyvää eli plastista muodonmuutosta, ja näiden testien tuloksia voidaan karkeasti rinnastaa toisiinsa [20]. Jos

mitattavaa kappaletta ei saa rikkoa tai vetokoe on hankala tai mahdoton suorittaa, joudutaan käytännössä usein kovuuskokeiden perusteella tekemään johtopäätöksiä ja arvioita metallin murtolujuudesta [24].

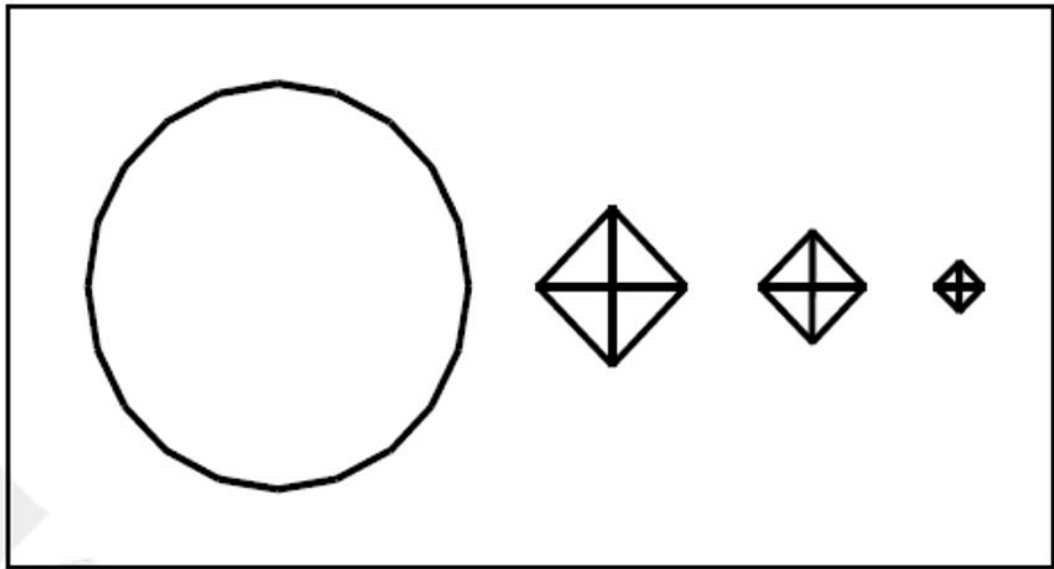
Materiaalin ominaisuuksista kovuudella ja murtolujuudella on kokeellinen suhde ja näiden kahden ominaisuuden välillä on hyvä korrelaatio. Mahdollisia kokemusperäisiä vastaavuuksia on mittausten välille mahdollista saada rajattuihin käyttötarkoituksiin. Nyrkki-sääntönä toimii: mitä suurempi kovuusarvo, sitä suurempi murtolujuus. Korrelaatio kovuuden ja murtolujuuden välillä ei ole voimassa kuitenkaan kaikilla teräslaaduilla, ja murtolujuuden suhteellinen arviointi kovuuden avulla on mahdollista vain tietyille materiaaleille. Muuntotaulukoita eri materiaaleille on kirjattu standardeihin SFS-EN ISO 18265 ja ASTM E140. Standardissa SFS-EN ISO 18265 korrelaatioita kovuuden ja murtolujuuden välille on määritetty nuorutus-, kylmätyö- ja pikateräksille sekä seostamattomille ja niukkaseosteisille teräksille ja kovametalleille. [24; 25.]

Mitattua kovuusarvoa voi verrata materiaalin murtolujuuteen, mutta se ei kerro materiaalin kimmorajasta eikä myötörajaista. Näin ollen kovuusmittauksella ei voida korvata vetoa. Kovuusmittauksessa kuormitus on paikallinen ja kohdistuu mittakärjen päähän, kun puolestaan vetokokeessa kappale on kiinnitettyä kummastakin päästä vedon aikana ja kuormitus kohdistuu näin ollen suuremmalle alueelle. Tästä syystä luotettavaa vastaavuutta mahdotonta johtaa näillä kokeilla saatujen ominaisuuksien välille. Kovuusmittaus on paikallinen testausmenetelmä, kun vetokoe tuottaa enemmän materiaalin keskiarvoa vastaavan tuloksen. Vetokokeen suoritus on standardisoitu, ja testikappaleet tehdään ja koe suoritetaan standardeja noudattaen. [26.]

3.4 Kenttäkovuusmittaus

Kannettavien kenttäkovuusmittareiden kehittyminen perustuu tarpeeseen mitata tuotantoon integroitua komponentteja prosessi- ja elinikähuoltojen aikana. Ensimmäiset kannettavat kenttäkovuusmittarit perustuivat syntyneen painauman analysointiin ja olivat vain osittain kannettavia. Neljän edellisen vuosikymmenen aikana Leebin kimmahdusmenetelmä ja ultraääneen perustuva UCI-menetelmän käyttö on levinnyt räjähdysmäisesti. Kolmas tapa mitata kovuuksia kentällä on TIV (Through-Indenter-Viewing) -menetelmä. [27; 28.]

Kun valitaan parhaiten sopivaa kenttäkovuusmittaria ja menetelmää mittaushetkelle, on tarkasteltava muutamia asioita. Mittauksen aikaansaama mittakärjen painauma on tärkeä ottaa huomioon valittaessa mittaushetkelle. Jotta saavutettaisiin tarkka ja toistettava tulos, on painauman osuttava haluttuun mikrorakenteeseen. UCI-menetelmä soveltuu parhaiten hienojakoisille materiaaleille, koosta ja muodosta riippumatta. Kimmahdusmenetelmä puolestaan soveltuu isoille, epähomogeenisille, karkearakeisille materiaaleille ja valukappaleille. Kimmahdusmenetelmän aiheuttama painauma on suurempi pinta-alaltaan kuin UCI-menetelmässä ja tästä syystä kuvaa mm. valujen rakennetta laajemmalla alalla. Suurempi mittakärjen painauma vaatii pinnalta vähemmän viimeistelyä. Painaumien kokoerot on havainnollistettu kuvassa 3. [29.]



Kuva 3. Kimmahdusmenetelmän (Leeb) painauma verrattuna Vickers-mittakärjen 98 N, 49 N ja 10 N:n aiheuttamaan painauman kokoon. [30.]

Kenttäkovuusmittaus on kohtalaisen helppo suorittaa ja normaalisti täysin kappaletta rikkomaton tai hieman rikkova testausmenetelmä. Testaus voidaan myös suorittaa suoraan tutkittavaan kappaleeseen ilman suurempia muutoksia. Etuna kovuusmittauslaitteistossa on kohtalaisen edullinen hinta suhteessa muihin aineen koetuslaitteistoihin verrattuna. [22; 27; 28.]

4 Vickers-kovuusmittaus ja UCI

Vickers-kovuustestissä ennalta määrätyn muotoinen mittakärki painetaan tunnetulla voimalla kappaleen pintaan, jonka jälkeen syntyneen kuvion halkaisija mitataan. Kovuusarvo määritellään käytetyn voiman ja painauman koon lukuarvojen suhteesta. UCI-menetelmän kovuusmittaus perustuu puolestaan ultraääneen ja taajuuden muutokseen, ja sen on keksinyt Claus Kleesattel vuonna 1968. UCI-menetelmä perustuu Vickers-kovuusmittaukseen, ja sillä on useita etuja muihin kovuusmittausmenetelmiin nähden ja on laajalti käytössä kenttäkovuusmittareissa. [16.]

4.1 Vickersin mittausperiaate

Vickers-kovuustestissä painauma synnytetään neliökantaisella, pyramidinmuotoisella timanttikärjellä, jonka kylkien kulma on 136° . Kovuusarvo on yksikköä HV (Hardness Vickers), ja se saadaan jakamalla koevoima F syntyneen kuvion pinta-alalla A . Pinta-ala A nähdään koevoiman poistamisen jälkeen ja on luettavissa painauman lävistäjistä d_1 ja d_2 (kuva 4). [14;16.]

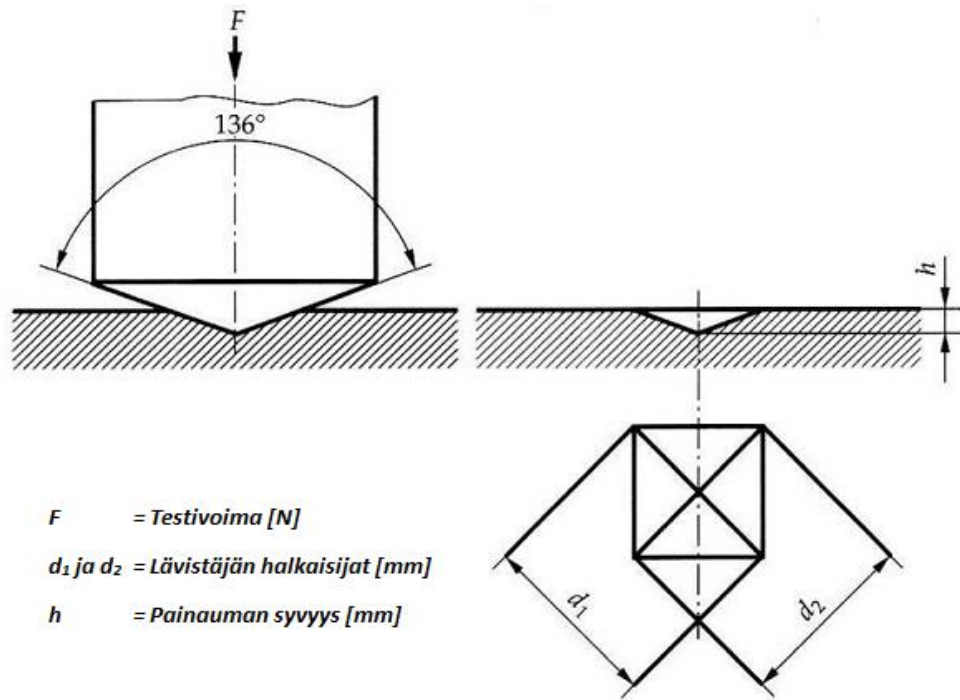
$$HV = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Kaavaa avaamalla saadaan kovuus määritellyksi.

$$HV = 0,102 * \frac{2 * F * \sin(136^\circ / 2)}{d^2} \quad (2)$$

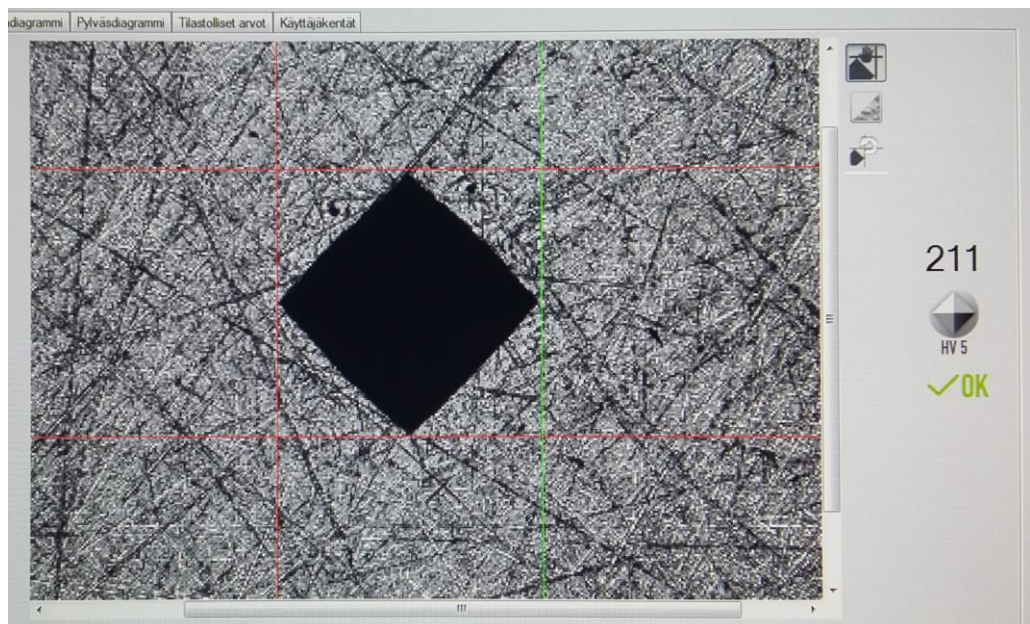
Kaavassa ylempänä F on käytetty koevoima ja d on aritmeettinen keskiarvo lävistäjille d_1 ja d_2 . Lävistäjän halkaisijat on nähtävissä kuvassa 4. [14.]

Vickers-menetelmä on useasti yksinkertaisempi tapa mitata kovuutta kuin muut kovuusmittausmenetelmät. Vickers-kovuuteen ei vaikuta painimen koko, koska kärjen kulmat eivät muutu. Samaa mittakärkeä voidaan käyttää materiaalista ja kovuudesta riippumatta, joka takaa laajat käyttömahdollisuudet. Mittauksesta aiheutunut painauman syvyys on noin seitsemäs osa painauman halkaisijasta. [14.]



Kuva 4. Vickers-mittakärjen aiheuttama painauma. [31.]

Kovuuden määrittäminen Vickers-menetelmällä vaatii optisen määrittämisen painauman pinta-alasta, ja se on nähtävissä kuvassa 5.



Kuva 5. Vickers-kovuuden optinen määrittäminen.

Vickers-kovuudet esitetään muodossa xxxHVyy, esimerkiksi 330HV10, jossa

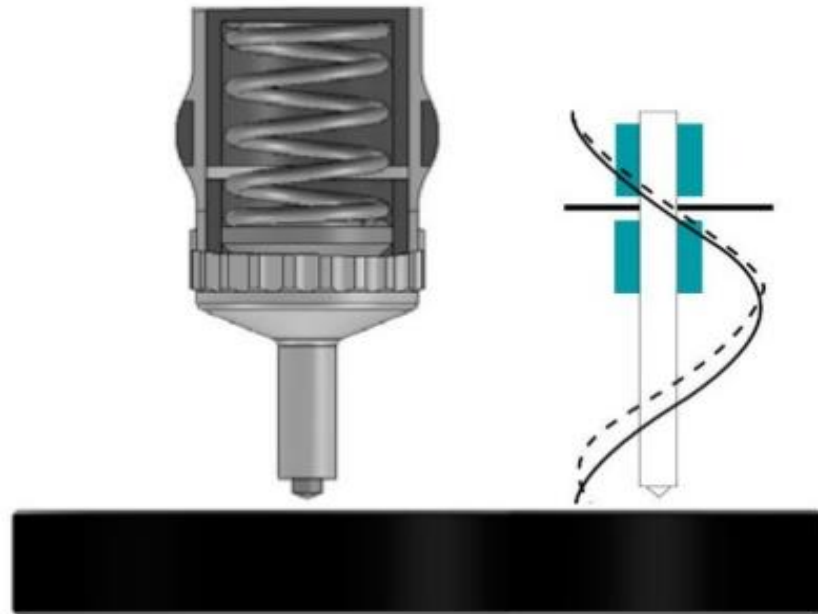
- 330 on saatu kovuusarvo,
- HV on yksikkötunnus, Vickers-kovuus,
- 10 on koevoima, likimääräinen arvo kilogrammavoimana (98 N)
- Jos kuormitusaika poikkeaa 10–15 s, se ilmoitetaan tuloksessa. [14.]

Vickers-testillä on mahdollista mitata kovuuksia käyttäen mikro- ja makrokovuusmittausta. Käytetty voima erottaa nämä mittaukset toisistaan. Makrokovuusmittaus tehdään 1–120 kg:n voimalla, kun puolestaan mikrokovuus mitataan 10–1000 g:n voimalla. Aiheutunut painauma on yhtäläisen muotoinen, mutta makrokovuusmittaus aiheuttaa suuremman painauman tutkittavaan kappaleeseen. Standardin mukaiset koevoimat makrokovuusmittauksessa on 5, 10, 20, 30, 50, 100 ja 120 kg [32]. Tämä insinöörityö keskittyy makrokovuusmittaukseen. [16.]

4.2 UCI-mittausperiaate

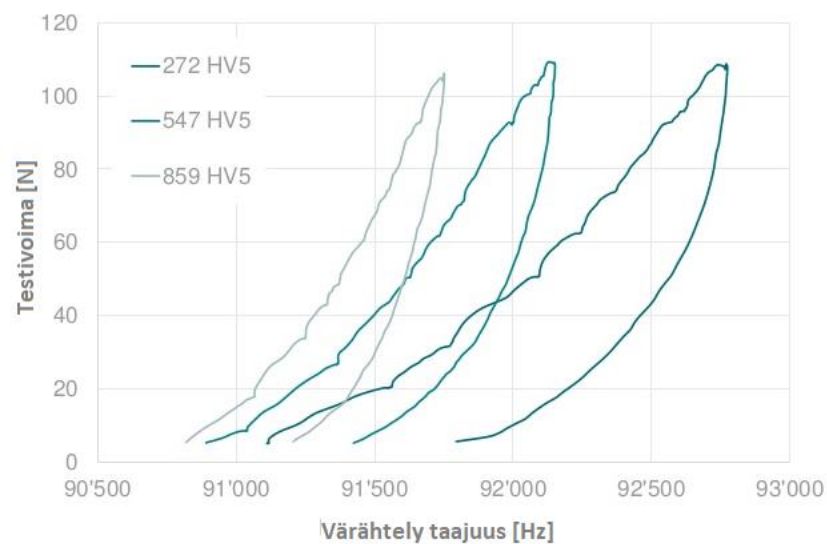
UCI-menetelmällä mitatessa määritetään ultraäänen taajuuden muutosta. Mittauksessa syntynyttä painauma ei määritellä optisesti, vaan elektronisesti mittaamalla ultraäänen taajuuden muutosta. UCI-menetelmässä Vickers-timanttipään omaava mittapää on kiinnitettynä jousen avulla värähtelevään tankoon (kuva 6). Tangon toisessa päässä on kiinnitettynä pietsokeraaminen kide. Mittauksen aikana tapahtuu taajuuden muutos, jota pietsoelementit mittaavat. [17; 27; 33.]

Taajuuden muutos on riippuvainen Vickers-timantin aiheuttaman painauman suuruudesta, joka on riippuvainen kappaleen kovuudesta. Mitä pehmeämpi materiaali on, sen suurempi ja syvempi on painauma sekä mittauksen aikana tapahtuva taajuuden muutos. UCI-mittarilla mitattaessa tulos on elektronisesti luettavissa ja mittaus kestää vain muutaman sekunnin. [27; 28.]



Kuva 6. UCI-mittapää. [34.]

Kuvassa 7 on esimerkki testivoiman vaikutuksesta värähtelyn taajuuteen mitattaessa eri kovuisia testikappaleita. Vasemmanpuoleinen, nouseva käyrä näyttää manuaalisen voimanlisäyksen testikappaleeseen. Manuaalinen testivoiman lisäys aiheuttaa epätasaisuutta käyrälle. Oikeanpuoleinen, laskeva käyrä on tulosta koevoiman poistamisesta testikappaleesta. [27.]



Kuva 7. Taajuuden muutos mittauksen aikana.

Käyrän leveys kasvaa materiaalin pehmentyessä, johtuen suuremmasta taajuuden muutoksesta mittauksen aikana. Painauma aiheuttaa niin plastista eli pysyvää, kuin elastista, eli palautuvaa muodonmuutosta, ja tästä syystä on käyrien kaltevuudessa eroavaisuuksia. Mitä leveämpi on alkupisteen ja loppupisteen etäisyys, sitä enemmän plastista muodonmuutosta on tapahtunut. UCI-menetelmä käyttää ultraäänen värähtelyjä määrittääkseen kappaleen kovuuden. Tästä johtuen menetelmä ei ole täysin staattinen ja elastisten ominaisuuksien vaikutus on kohtalaisen suuri. [27.]

4.3 Kimmokertoimen vaikutus UCI-menetelmässä

Ultraääneen perustuva UCI-menetelmä ei toimi täysin staattisella periaatteella, vaan myös materiaalin elastiset ominaisuudet eli materiaalikohtaiset kimmomoduulit vaikuttavat vahvasti taajuudenmuutokseen. Tämä on otettava huomioon käytännön mittauksissa. Matalampi kimmomoduuli vaimentaa resonanssia vähemmän ja johtaa matalampiin taajuuden muutoksiin. [27.]

UCI-menetelmällä mitatessa asetuksia on säädettävä materiaalikohtaisien kimmokertoimien mukaan. Mitattaessa erilaisia materiaaleja on laite kalibroitava kyseiselle materiaalille erikseen, jotta kimmomoduulin aiheuttamat eroavaisuudet saadaan huomioitua mittauksen aikana ja saadut tulokset ovat todenmukaisia. Mittakärkien tehdasasetukset on kalibroitu matalaseosteisille tai seostamattomille teräksille, joiden kimmokerroin on samankaltainen, 210 000 N/mm² (MPa). Modernit testivälineet ovat nopeasti kalibroitavissa muille materiaaleille, joiden kimmokerroin poikkeaa tästä arvosta. [28.]

Kimmokerroin kuvaa materiaalin kykyä palautua alkuperäiseen tilaansa kuormituksen jälkeen. Tämä on tärkeä tekijä kovuusmittausta suorittaessa, jotta laitteet pystytään kalibroimaan oikein. [29.]

Kimmokerroin (E) on materiaaliominaisuus, joka voidaan määrittää kaavalla:

$$E = \frac{F}{A} \cdot \frac{l}{\Delta l} \quad (3)$$

,jossa F on voima (N), A on painauman pinta-ala (m^2), l on sauvan pituus (m) ja Δl on sauvan venymä (m). Kimmokertoimen yksikkö on Pascal (Pa). [36.]

UCI-menetelmä on riippuvainen materiaalin ja Vickers-timantin kosketuspinta-alasta, ja resonanssitaajuuden muutoksen voi laskea seuraavalla kaavalla.

$$\Delta f = f(E_{\text{eff}}, A) \quad (4)$$

,jossa Δf on taajuuden muutos, A painauman pinta-ala ja E_{eff} on efektiivinen kimmokerroin, joka huomio kimmokertoimen sekä materiaalin muutokset niin näytteestä kuin mittakärjestä. [28.]

$$\Delta f \approx E * \sqrt{A} \quad (5)$$

,jossa Δf on taajuuden muutos, A on kosketuspinta-ala ja E on kimmomoduuli. [17.]

Ylempänä määriteltiin resonanssitaajuuden muutos (Δf), jossa efektiivinen kimmokerroin määrittää tulosta. Efektiivinen kimmokerroin E_{eff} on määriteltävissä kaavalla

$$\frac{1}{E_{\text{eff}}} = \frac{1 - \nu^2}{E} + \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} \quad (6)$$

,jossa ν on materiaalin Poissonin luku, E on materiaalin kimmokerroin (Pa), ν_i on mittakärjen Poissonin luku ja E_i on mittakärjen kimmokerroin. [37.]

Efektiivinen elastinen moduuli ottaa huomioon, että elastisia muutoksia materiaalissa tapahtuu niin näytteessä kuin mittakärjen Vickers-timantissa. Efektiivinen elastinen moduuli on määritettävissä kimmokertoimen (E) ja Poissonin luvun (ν) avulla. [37.]

4.4 Edut ja rajoitukset

UCI-menetelmällä on useita etuja muihin mittausmenetelmiin nähden. Kovuusmittauksen suoritus on nopeaa ja yksinkertaista ja mittapää on tarkasti sijoitettavissa haluttuun

kohtaan. Tämä tarjoaa laajan, pääsyn mm. ahtaampiin kohteisiin. UCI-menetelmä on optimaalinen hitsien muutosvyöhykkeiden (HAZ) kovuusmittaukseen, sekä muun muassa hammaspyöriin ja laakereihin ja isoihin monimutkaisiin elementteihin. [23; 27.]

UCI-menetelmää suositellaan käytettäväksi, kun materiaaliominaisuuksissa on tiukat toleranssit, esim. tarkasteltaessa muokkauslujittumista taotuilla kappaleilla, tai testataan kaikenkokoisia ja -muotoisia hienorakeisia kappaleita. Taulukossa 1. on esillä erilaisten mittauskohteiden soveltuvuus UCI-menetelmällä toimivaan kenttäkovuusmittariin. [17.]

Taulukko 1. UCI-menetelmän käyttökohteita.

Käyttökohde	Soveltuvuus		
Vaikeasti luokse päästävä kohde	+++		
Ohut kerros	+++		
Putki: seinämä < 20 mm	+++	Erinomainen	+++
Putki: seinämä > 20 mm	+++	Hyvä	++
Hitsaussauman HAZ	+++	Joskus	+
Kiinteä kappale	++	Ei suositella	-
Teräs ja alumiinivalu	+		
Epähomogeeninen pinta	-		
Karkearakeinen materiaali	-		

Ohut mittakärki takaa ahtaampaan mittauspaikkaan hyvän luokse päästävyuden, kun puolestaan epähomogeeninen pinta ei sovellu mitattavaksi pienen painauman aiheuttamalla mittarilla [17].

5 Kenttäkovuusmittaukseen vaikuttavia tekijöitä

Kenttäkovuusmittauksia suorittaessa on otettava huomioon monia mittaukseen vaikuttavia tekijöitä. Kenttäkovuusmittauksessa hajontaa tuloksiin voi aiheuttaa muun muassa mittaaja, pinnanlaatu ja pinnan kaarevuus sekä käytettävä mittausmenetelmä.

5.1 Mittaajan vaikutus

Electric Power Research Instituten (EPRI:n) tutkimuksen perusteella on tärkeää, että henkilö, joka suorittaa kovuusmittauksia, käyttää mittauksissa asianmukaisesti validoituja mittareita, menetelmiä ja menettelyjä [26]. Yksi UCI-menetelmän haittapuolista on osittainen mittaaja riippuvuus. Mittaustuloksiin voi vaikuttaa esimerkiksi voiman lisäys mittauksen aikana. Kuormituskäyrällä ja voimanlisäyksen nopeudella on vaikutusta tuloksiin. [27.] Anturin koskettaessa mitattavaa kappaletta on vältettävä anturin kääntämistä. Kosketuksissa oleva timanttikärki voi vaurioitua väännön seurauksena. [29.]

Mittauskulmalla on merkitystä saatuun mittaustulokseen, ja tästä syystä mittauskulman tarkkailu on tärkeää. Mittauskulma ei saisi poiketa yli $\pm 5^\circ$ suorasta, 90° :n mittauskulmasta ASTM A1038:n ja DIN 50159:n mukaan. Mittaus aiheuttaa pienen mittausjäljen, ja pienikin mittakärjen liike voi vaikuttaa tuloksiin. Mittauspisteiden sijainti on olennaista useissa tapauksissa. Liian lähellä toisiaan olevat mittauspisteet ja reunan läheisyys voivat vaikuttaa kenttäkovuusmittarin antamaan tulokseen. Jokaisen mittauspisteen etäisyys toisesta mittauspisteestä on oltava vähintään 3 tai 4 kertaa painauman halkaisija. [27; 38.]

Uusinta teknologiaa on säädettävä/mukautuva automaattinen mittakärki UCI-mittareihin, johon on mahdollista säätää testaus eri testivoimilla. Tällä mittakärjellä voidaan saavuttaa täysin tasainen ja toistettava tulos. Mittauksesta on mahdollista näin myös saada enemmän tietoa, kun mittaus on läpi käytävissä askel askeleelta. [27.]

5.2 Kappaleen vaikutus

Testattavan kappaleen on täytettävä vaadittavat minimivaatimukset paksuuden ja massan osalta, jotta vältetään kappaleen värähtelyltä ja ultraäänen heijastumiselta [27]. Yleisenä vaatimuksena asianmukaiselle mittaukselle UCI-menetelmässä on näytteen minimipaksuus 2–3 mm ja minimipaino 300 g. Jos kuitenkin näitä vaatimuksia ei voida täyttää, voidaan kappale yhdistää suurempaan ja raskaampaan tukeen. Tukilevy ja kyt-

kentäteknikka yhdessä estävät pienten kappaleiden resonoinnin, ja näin ollen takaa luotettavamman tuloksen. Jos tukeminen ei ole mahdollista, kannattaa harkita pienempää testivoimaa käyttävää anturia. [17.]

UCI-menetelmällä on mahdollista testata ohuita nitrattuja tai hiiletettyjä pintakarkaistuja pintoja ja pinnoitteita kuten kromia. Jotta pinnoitteen kovuusmittaukseen ei vaikuta pehmeämpi pohjamateriaalin kovuus, tulee pinnoitteen olla vähintään 10-kertainen painauman syvyyteen nähden. Pinnoitteen vaadittava minimipaksuus kovuuksille 100 HV–750 HV mitattaessa MIC10:llä, testivoimalla 50 N on määritelty taulukossa 2. [29; 39.]

Taulukko 2. Testikuormalla 49 N aiheutunut lävistäjä (d), painauman syvyys (h) ja vaadittava materiaalin minimipaksuus.

Kovuus [HV]	Lävistäjä d [μm]	Syvyys h [μm]	Vaadittava pinnoitepaksuus [μm]
100	304	44	440
250	193	28	280
500	136	19	190
750	111	16	160

Materiaalin vaadittava minimipaksuus kovuuksille 100 HV–750 HV, testivoimalla 98 N on määritelty taulukossa 3. Mittauksen aiheuttaman painauman syvyys ei kaksinkertaistu testivoiman noustessa kaksinkertaiseksi. [39.]

Taulukko 3. Testikuormalla 98 N aiheutunut lävistäjä (d), painauman syvyys (h) ja vaadittava materiaalin minimipaksuus.

Kovuus [HV]	Lävistäjä d [μm]	Syvyys h [μm]	Vaadittava pinnoitepaksuus [μm]
100	431	62	620
250	272	39	390
500	193	28	280
750	157	22	220

Vaadittava pinnoitteen paksuus kasvaa mennessä kovemmasta materiaalista pehmeämpään. Kuitenkin on huomioitava, että testattava kappale on minimipaksuudeltaan kokonaisuudessaan vaaditut 2–3 mm. [29.]

5.3 Testattavan pinnan vaikutus

UCI-menetelmä, kuten muutkin kovuusmittausmenetelmät, vaativat ennalta määrätyn valmistelun testattavalle pinnalle, kuten tietyn pinnankarheuden (taulukko 4.). Nämä vaatimukset ovat riippuvaisia materiaalin kovuudesta ja käytetystä testikuormituksesta. Pinnankarheus ei saa ylittää $\approx 30\%$ painaumasta aiheutuneesta syvyydestä ($Ra \leq 0,3 \times h$). Karkeampi viimeistely pinnalla johtaa yleisesti matalampiin mittaustuloksiin. Testikappaleen pinnan valmistelut voidaan suorittaa kulmahiomakoneella, kuitenkin huolehtien, ettei pinta ylikuumene tai kylmä muovaudu. Tämä onnistuu pudottamalla kierroksia kulmahiomakoneesta siirryttäessä hienompaan hiomakarheuteen. [27; 29.]

Taulukko 4. Pinnankarheusvaatimus eri testivoimilla. [40.]

Testivoima	98 N	50 N	10 N	3 N
Ra (μm)	≤ 15	≤ 10	≤ 5	$\leq 2,5$

Karkeampi pinta vaatii suuremman testivoiman ja/tai suuremman mittakärjen, joka aiheuttaa painauman laajemmalle pinta-alalle. Suurempi testivoima on saavutettavissa UCI-menetelmällä, mutta suurempi pinta-ala vaatii eri testimenetelmän valinnan, esimerkiksi Brinell-menetelmän. [38.]

Tarkka mittaustulos vaatii puhtaan testipinnan. Maalipinta ja suojaavat pinnoitteet on poistettava mittauskohdasta. Pinnan epäpuhtaudet, kuten rasva, oksidit ja pöly aiheuttavat merkittäviä poikkeumia tuloksiin. Tämä voi aiheuttaa peruuttamattoman vaurion joko testattavaan kappaleeseen tai vertailupalaan. [29; 38.]

Testattava pinta voi olla joko kupera tai kovera ja tällöin on huomioitava, että näytteen kaarevuussäde on soveltuva käytettyyn anturiin. Mittaajan on silloin oltava tarkkana, että anturi on kohtisuorassa mitattavaan kappaleeseen nähden. [40.]

5.4 Mittakärjen vaikutus

UCI-menetelmällä on mahdollista mitata useilla testivoimilla, joita käytetään erilaisiin sovelluksiin. Koska menetelmällä mitataan kenttäolosuhteissa, on käytettävä voima usein pienempi kuin pöytäkovuusmittareissa. Viisi eri testivoimaa (HV0,3; HV0,8; HV1,0; HV5 ja HV10) voidaan käyttää mitattaessa UCI-menetelmällä. Useimmiten testivoimat kannettavissa mittareissa ovat väliltä HV1 ja HV10. Yleisimmin käytetty mittakärki on HV5. [27; 17.]

Taulukko 5. Tyypillisiä mittauskohteita ja muita ominaisuuksia eri testivoimille.

Testivoima	Tyypillinen käyttökohte	Muuta
HV1	Pinnoitteet, ohut seinäiset kappaleet, hammaspyörän sivut, laakeri, jne.	Hyvä hallittavuus jyrkemmille säteille, kevyt käyttää
HV5	Hitsien tarkastukset, akselit, koneiden osat, jne.	Anturi yleiskäyttöön, laajat käyttömahdollisuudet
HV10	Hitsien tarkastukset, HAZ, valumateriaalit, taotut materiaalit	Tunkeutuma on suuri, vaatii vähäisen pinnan valmistelun

Taulukossa 5 on yleisimmin käytetyille testivoimille tyypillisiä mittauskohteita ja huomioita. Nyrkkisääntönä toimii, että valitaan suurempi testivoima suurille kappaleille ja epähomogeenisille materiaaleille. Ohuet ja herkäät pinnat puolestaan mitataan pienemmällä testivoimalla. [27.]

5.5 Ympäristön vaikutus

Lämpötila voi vaikuttaa kovuusmittausarvoihin. Proceq-valmistaja sanoo, että jos kenttäkovuusmittarin käyttölämpötila ylitetään, voi sillä olla negatiivista vaikutusta mittaustu-

lokseen. Proseqin mittarin on määritetty lämpötila-alueelle $-10...+50\text{ }^{\circ}\text{C}$, ja jos tämä lämpötila-alue ylitetään ei voida oikeita tuloksia taata. [41.] Krautkramerin MIC10 on suunniteltu anturin kanssa käytettäväksi lämpötila-alueella $0\text{ }^{\circ}\text{C}...+40\text{ }^{\circ}\text{C}$, itse mittaria voidaan käyttää $-15\text{ }^{\circ}\text{C}...+55\text{ }^{\circ}\text{C}$:ssa [39]. SonoDur2 puolestaan soveltuu anturin kanssa käytettäväksi lämpötilojen $0\text{ }^{\circ}\text{C}...+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ välissä ja mittari itsenäään operoi lämpötila-alueella $-10\text{ }^{\circ}...+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ [42].

Proceq on tehnyt testejä, jossa tutkittava kappale on lämmitetty ja kappaleen eri jäähtymisvaiheissa on mitattu kovuusarvoja. Proseqin tutkimus on osoittanut, että kovuusarvot ovat matalampia, mitä lämpimämpi testikappale on. Tämä käytös on kuitenkin materiaaliirippuvainen, joten korjausarvoa lämpötilan ja kovuuden välille ei voida tuottaa. [41.]

6 Kovuuden mittaaminen

Materiaalin elinkaaren aikana kovuutta voidaan mitata useissa eri vaiheissa. Kovuutta voidaan mitata esimerkiksi materiaalin valmistuksen yhteydessä tai hitsauksen jälkeisenä toimenpiteenä. Myös valmiiden tuotteiden laatua tarkkaillaan käyttövuosien, eli elinajan lisääntyessä. [17.]

6.1 Elinkaaren alussa

Kovuusmittaus on laajalti käytössä materiaalituotannossa, kun uusia materiaaleja tutkitaan ja kartoitetaan. Uusien materiaalien testaus on avainasemassa mm. rakennushankkeissa, jotta materiaalit toimitetaan vaatimuksen mukaisina. Kovuusmittausta suoritetaan kenttäolosuhteissa laadunvalvontatoimenpiteenä, varmistaen materiaalille vaadittujen laatuvaatimusten täyttämisen. Kenttäkovuusmittaus voidaan suorittaa, jotta asiakkaan määritellyt, materiaali-kohtaiset tai standardin mukaiset laatuvaatimukset täyttyvät. Nämä määritetyt laatuvaatimukset tyypillisesti sisältävät materiaalille vaaditun minimiarvon ja maksimiarvon kovuuden osalta tai sallitun alueen, jolle kovuuden tulee osua. Kovuuden määrittäminen on tärkeää, koska materiaalin toimitukset epäasiallisilla kovuuksilla voi tulla kalliiksi tai aiheuttaa pahimmassa tapauksessa katastrofaalisen vian tai murtuman kappaleeseen. [17,21,22.]

6.2 Elinkaaren aikana

Kovuusmittausdataa tarvitaan myös käytössä olevien komponenttien testaukseen, jotta voidaan selvittää, ovatko osat edelleen käyttökelpoisia käyttökohteessa. Tarkastuksia suoritetaan mm. komponenteille, joiden käyttölämpötilat ovat korkeita, useita satoja asteita, jotta voidaan selvittää, onko käytön aikana materiaalin lujuus laskenut. Kovuusmittaus voi paljastaa myös materiaalin herkkyyden halkeiluun mm. jos kappale altistuu rikivedylle käyttöympäristössään. [43.]

Kenttäkovuusmittaus on usein käytetty tarkastusmenetelmä voimaloiden seisokkien aikana tai koneiden ollessa pois käytöstä. Kenttäkovuusmittausta käytetään apuna elinikäntarkastuksissa mm. jäljenteiden lisäksi. Kovuusmittaus yhdistettynä jäljenteiden avulla tarkasteltavaan mikrorakenteeseen antaa tietoa materiaalin nykytilasta. [44.]

Voimalaitoksissa kovuusmittaus suoritetaan aina huoneenlämpötilassa. Kovuusmittaus datalla analysoidessa virumista tai murtumisominaisuuksia tarvitaan kokeellinen korrelaatio saatavilla olevista tietokannoista. Huoneenlämpötilassa mitattua kovuutta ei suoraan voida samaistaa muihin materiaali ominaisuuksiin. Tutkimukset ovat osoittaneet, että vaikka kerättäisiin paljon kovuusmittausdataa tietyin väliajoin voimalaitoksilta, ei se yksinään ole riittävää komponentin jäljellä olevaan eliniän määrittämiseksi. [26.]

6.3 Hitsauksen ja lämpökäsittelyn onnistuminen

Lämpökäsittelyn laaduntarkkailu on yksi käytetyimmistä kovuusmittauskohteista. Kovuutta mitataan lämpökäsittelyn jälkeen, jotta saadaan selville lämpökäsittelyn onnistuminen materiaalille. Esimerkiksi joillain teräksillä on havaittu valmistuksen aikaisia ongelmia, jotka on linkitetty virheelliseen lämpökäsittelyn kontrollointiin. Kovuusmittaus onkin rutiininomaisesti lisätty laadun tarkkailun avuksi, jos poikkeavan matalia tai korkeita kovuuksia löytyy. Kovuusmittaus laaduntarkkailussa vaatii usein pääsyn dokumentteihin, joissa selviää kappaleelle suoritettut toimenpiteet, esim. lämpökäsittelyt. Yleisesti perusaineelle on määritelty minimi- ja/tai maksimiarvot sekä hitsien kovuuksien maksimit. On osoitettu, että paikalliset lämpökäsittelypoikkeamat aiheuttavat paikallisia ongelmia mik-

rorakenteessa. Siispä minimikovuuden rajojen määrittämisen tarkoituksena on ensisijaisesti varmistaa, että ei edes paikallisia alueita lämpökäsittelystä materiaalista pääsisi käyttöön ylikuumentuneessa tilassa [26.]

Hitsien muutosvyöhykkeen, HAZ:n kovuusmittauksella määritetään esimerkiksi, onko hitsauksen jälkeinen lämpökäsittely tarpeen. Perusaineelle, hitsille sekä hitsinmuutosvyöhykkeelle asetetaan rajoitukset kovuuden osalta, koska liian kova materiaali ei ole tarpeeksi sitkeä käyttöolosuhteissa tai materiaalin kyky suojautua korroosiota voi laskea. Lämpökäsittelyä käytetään hitsauksen jälkeen alentamaan hitsin kovuutta. Tämä on yksi kovuusmittausta käyttävä teollisuuden osa. Hitsaus saattaa nostaa alueellista kovuutta, ja lämpökäsittelyllä pyritään saamaan lukemat sallitulle alueelle. Kovuusmittauksella tarkastetaan hitsien alentunut kovuus lämpökäsittelyn jälkeen, eli lämpökäsittelyn onnistuminen. Liian korkea kovuus esim. X10CrMoVNb9-1:llä (> 350 HV) hitsausalueella tuo mukanaan hitsauksen aiheuttaman kylmähalkeilun riskin. [45.]

Hitsin muutosvyöhyke voi olla vain noin 3 mm leveä ja sisältää useita metallurgisesti erilaisia alueita. Tästä syystä pieni mittakärjen aiheuttama painauma on suotava, jotta havaitaan kapea alue, jossa kovuus on noussut. Liian suuren painuman aiheuttavat esim. Brinell-menetelmä, joka osuu mitatessa useille vyöhykkeille samanaikaisesti. Tämä saattaa piilottaa epäsuotuisat olosuhteet suuren painauman alle. Tästä esimerkkinä korkea martensiittipitoisuus HAZ -vyöhykkeellä on altis särön muodostumiselle. Korkea kovuuspiikki HAZ alueella toimii hyvänä indikaattorina martensiittipitoisuudesta. Tämä kriittinen alue voi olla noin 0,2–0,3 mm leveä. Mittauksissa on huomioitava, että käytettävä kovuusmittaustekniikka mahdollistaa mittauksen näin kapealta alueelta. Vickers-menetelmään perustuvat kovuusmittaukset 49 N:n ja 98 N:n antureilla aiheuttaa mitatessa painauman, joka osuu vain haluttuun kriittiseen alueeseen. [17; 26.]

7 Kalibrointi

Korkealaatuinen mittaustekniikka on edellytys laadukkaalle teollisuustuotannolle ja kehittyneelle yhteiskunnalle, ja ilman kalibrointia ei tämä olisi mahdollista. Kalibrointien avulla mahdollistetaan tarkat ja laadukkaat testitulokset. [46.]

7.1 Kalibroinnin tarkoitus

Kalibroinnilla selvitetään mittauslaitteen antaman tuloksen oikeellisuutta ja sen avulla saadaan selville satunnaisten virheiden aiheuttaman hajonnan arvo ja systemaattiset virheet. Kalibroinnissa ei säädetä itse mittaria, vaan saadaan selville, kuinka lähelle oikeaa mittari näyttää. Oikean arvon ja mittaustuloksen yhteensopivuus, eli mittauslaitteen tarkkuus, voidaan määrittää vain kalibroinnin avulla. Mittalaitteen kalibroinnissa verrataan mittalaitetta tarkempaan mittalaitteeseen, jonka tiedetään näyttävän oikein ja jonka epävarmuus tunnetaan. Mittarin käyttäjän on mittauksien aikana osattava huomioida mittarin aiheuttama virhe. [46; 47.]

Ilman kalibrointia voi mittausjärjestelmä antaa vain kvalitatiivista tietoa mittauskohteesta. Jäljitettävän kalibroinnin avulla saadaan yhteys mitattavan suureen todellisen arvon ja mitatun arvon välille. Kun kalibroinnit ovat jäljitettävissä samoihin mittanormaaleihin, eri paikoissa mitatut arvot ovat keskenään vertailtavissa. [48.]

Kalibrointi tehdään, jotta saadaan esim. prosessin osat toimimaan oikein. Kalibroinnin puuttuessa on mahdollista koneen rikkoutua, tuotteen laatu voi kärsiä tai pahimmillaan voi aiheutua henkilövahinkoja. Jos mittari ei toimi oikein, voi tulla laatuongelmia, turvallisuusriskejä, energiahukkaa tai ympäristöongelmia. Oman laadunvarmistuksen lisäksi säännöllisillä mittalaitteiden kalibroinneilla voidaan osoittaa asiakkaille, että laitteet toimivat oikein. [49.]

7.2 Kalibrointi ja vertailupalan ero

Kalibrointipalat ovat ulkopuolisen toimittajan sertifioituja kalibrointipaloja (kuva 8.). Kalibrointipaloille on suoritettu ulkopuolisen toimijan toimesta kovuusmittaus valituille pisteille kiekosta. Kalibrointipalalla on kyseiselle kappaleelle määritelty palan numero (Block No.), sertifikaatin numero (Cert. No.), kovuusarvo kappaleelle ja kalibrointipäivämäärä sekä kalibrointitodistus.



Kuva 8. Kalibrintipalat kuljetuspaketeissa.

Vertailupalasarjan kappaleet on puolestaan lämpökäsitelty Kiwa Inspectan toimesta aikaisemmin ja kappale on tämän jälkeen validoitu Kiwa Inspectan akkreditoitussa laboratoriossa ottaen 30 kpl mittauspisteitä vertailupalasta kalibroidulla pöytäkovuusmittarilla. Vertailupalan kovuus on tämän jälkeen määritetty laskemalla pisteiden keskiarvo. Vertailupalat eivät ole sertifioituja kappaleita, mutta validointi toimii tässä laadun varmistuksena.

Kalibrintipala on sertifioitu kappale, jonka mukana tulee aitoustodistus ja mittapistekartta, mistä kovuudet on mitattu. Vertailupalasarja on mahdollista tehdä itse, esim. lämpökäsittelyn avulla, jonka jälkeen kappaleet validoidaan kalibroiduilla, ja tutkitusti toimivilla pöytäkovuusmittauslaitteistoilla.

8 Käytettävät mittarit ja anturit

Insinööriyössä käytetään Kiwa Inspecta Oy:n kahta erilaista kenttäkovuusmittaria. Molemmat mittarit toimivat Vickers-mittausperiaatteeseen perustuvalla UCI-menetelmällä. Tulokset ovat tästä syystä keskenään vertailukelpoisia. Kumpaakin mittaria testataan koevoimalla 49 N (HV5). Tämän lisäksi Krautkramerin mittarilla suoritetaan samat mitaukset myös suuremmalla, 98 N:n (HV10) voimalla.

8.1 Mittarit

Kokeellisessa osuudessa mittauksia suoritetaan GE Inspection Technologiesin Krautkramer MIC10:llä (kuva 9.), ja toisena vertailtavana mittarina on Kiwa Inspectan uusin kenttäkovuusmittari SonoDur2, jonka valmistaa NewSonic GmbH (kuva 10.). SonoDur2-mittarissa on kosketusnäyttö, kun MIC10:llä valikoissa suunnistetaan erilaisilla näppäinyhdistelmillä. Tarkemmat tiedot mittareista löytyvät liitteestä 1.



Kuva 9. Krautkramer MIC10 -kenttäkovuusmittari.

Kaikissa mittareissa on mittausanturi, sekä mittarin ja anturin yhdistävä piuha. MIC10-kenttäkovuusmittarissa on anturisuoja, joka suojaa mittausanturia mittauksen aikana ja tekee mittauksesta mitaajaystäväisemmän. Anturisuoja myös suojaa kenttäkovuusmit-

tarissa anturin ja piuhan välistä liitoskohtaa. SonoDur2-mittarissa puolestaan anturisuojaa ei ole, ja tämä saattaa olla kenttäolosuhteissa mittarin heikko kohta. Anturisuojaa on mahdollista ostaa lisäosana mittariin.



Kuva 10. NewSonic GmbH:n SonoDur2 -kenttäkovuusmittari.

Hajontaa kenttäkovuusmittauksessa aiheuttaa se, kuinka anturia mittauksen aikana käyttää, ja kokematon käyttäjä saa todennäköisemmin hajonnalta suurempia tuloksia kuin kokenut mittaaja. MIC10:n käyttöohjeessa kuitenkin sanotaan, että hajonnan ei pitäisi ylittää 5 % kalibroitikkappaleen kovuudesta otettaessa 10 mittaustulosta. SonoDur2-mittarille annetaan tämä samainen arvo. On otettava huomioon, että ilman tukeaa mitatessa tämä hajonta voi kasvaa käyttäjästä riippuen. [39;42.]

8.2 Anturit

Testit suoritetaan kahdella erilaisella anturilla 49 N ja 98 N. MIC10:ssä anturit näyttävät identtisiltä, mutta eroavat toisistaan käytettävän testivoiman perusteella. Mittaukset Krautkramer MIC10:llä suoritetaan näillä kahdella eri testivoimalla. SonoDur2:lla mittaukset suoritetaan ainoastaan pienemmällä (49 N) testivoimalla.



Kuva 11. Käytetyt anturit MIC10-kenttäkovuusmittarilla, vasemmalla 98 N ja oikealla 49 N.

Kuva 11 havainnollistaa MIC10:ssä käytettävien antureiden saman näköisyyden. SonoDur2:n anturi on MIC10:n antureihin verrattuna hieman suurempi kokonaisuudessaan. Antureiden mittakärjet ovat kuitenkin samankokoisia, koska kaikkien antureiden mittaus perustuu Vickers-mittausperiaatteeseen.

9 Kokeellisen osuuden valmistelu

Ennen varsinaisia mittauksia suoritettiin OES-analyysien otto, vertailupalasarjan valmistelut mittauksia varten, sekä vertailupalasarjan ja X10CrMoVNb9-1-putken pöytäkovuusmittaus.

9.1 Materiaalintunnistus, OES

Materiaalit tunnistetaan käyttämällä optista emissio spektrofotometriä (OES), joka kuuluu PMI (Positive Material Identification) -testauksen piiriin. Lähes kaikki teräkset sisältävät murto-osan epäpuhtauksia, esimerkiksi fosforia ja rikkiä, jotka ovat läsnä terästeollisuuden raaka-aineissa, kuten romussa. Epäpuhtauksien määrät vaihtelevat teräksillä käyttökohteiden mukaan, esim. painelaiteteräkset ja rakenneteräkset ja niiden sallitut määrät on määritelty esim. standardeissa. Taloudelliselta näkökannalta epäpuhtauksien poisto ei ole aina kannattavaa, varsinkin jos epäpuhtaudet eivät vaikuta valmistettavan materiaalin käyttöominaisuuksiin [21.]

OES-analysointilaitteisto käyttää spektrometrissä sijaitsevaa elektrodin läpi kulkevaa suurijännitteistä sähköistä lähdettä, joka virittää metallisen näytteen atomit tuottamaan niille ominaista valoa, optista säteilyä. Näyte lämpenee näytteenottokohdasta tällöin 2000 °C:seen. Sähköisen potentiaaliero näytteen ja elektrodin välillä tuottaa sähköisen purkauksen, joka kulkee näytteen läpi kuumentaen ja höyrystäen näytteen pintaa. Näytteen atomit virittävät ja kullekin alkuaineelle spesifi optinen säteily emittoituu. Korkea lämpötila näytteen ottamisen aikana aiheuttaa kappaleen pintaan selkeästi havaittavat polttojäljet, jotka ovat nähtävillä kuvassa 12. [50.]

Vertailupalasarjasta otettiin OES (Optical Emission Spectroscopy) -analyysi, jonka pohjalta materiaalit määritettiin. Ennen OES-analyysiä kappale on hiottu analyysinotto puolelta käyttämättömällä AlO₃-hiomalalla, jonka karheus on 60. Hionta suoritetaan, jotta kappaleen pinnalla olevat epäpuhtaudet saadaan poistetuksi. Epäpuhtauksien poisto täytyy suorittaa, jotta testikappaleen pinnalla olevat aineet eivät pääse vaikuttamaan tulokseen.



Kuva 12. OES-analyysin aiheuttaman polttojäljet X10CrMoVNb9-1-vertailupalan pinnassa.

Kaikki kolme vertailupalasarjan kappaletta ovat keskenään samaa materiaalia, ja tästä syystä vain yhden palan tunnistus oli riittävää. Mittaukset suoritettiin Hitachin Foundry-Master Optimumilla (kuva 13).



Kuva 13. Hitachi Foundry-Master Optimum; OES-analysaattori ja näyttöet otto.

Vertailupalasarjan testikappaleesta otettiin kahdeksan analyysiä, joista valittiin lopulta kolme kappaletta. Näiden kolmen tuloksen keskiarvosta on laskettu kappaleen koostumus, joka näkyy taulukossa 6.

Taulukko 6. Tutkittavien kappaleiden OES-analysit

Alkuaine	Alkuainepitoisuus (m-%)			
	Vertailupala X10CrMoVNb9-1	Kalibrointipala 149,5 HV5	Kalibrointipala 239,3 HV5	Kalibrointipala 344 HV5
Fe	89,53	92,05	91,95	96,2
C	0,099	0,396	0,373	0,948
Si	0,275	0,221	0,215	0,277
Mn	0,434	0,35	0,412	1,165
P	0,006			
S	<0,003			
Cr	8,134	5,065	5,135	0,543
Mo	0,884	1,22	1,215	
Ni	0,151	0,032	0,049	
Al	<0,002			
Nb	0,085			
V	0,225	0,475	0,487	0,088
W				0,512

Vertailupalasarjan kappaleet ovat materiaaliltaan kuumalujaa terästä, X10CrMoVNb9-1. Kalibrointipalat ovat materiaaliltaan työkaluterästä. Kovimman kalibrointipalan, 344 HV5

koostumus vastaa kylmätyökaluterästä 95MnWCr5 seosaineiden perusteella. Kaksi pehmeämpää kalibrintipalaa 149,5 HV5 ja 239,3 HV5 vastaavat koostumuksen perusteella lähimmäksi työkaluterästä X37CrMoV5-1. Piipitoisuus kyseiselle materiaalille kuitenkin poikkeaa standardissa SFS-EN ISO 4957 määritellystä 0,80 - 1,20 %. Kalibrintipalojen kalibrintitodistuksissa ei ole määritelty kappaleiden materiaalia, ja tästä syystä materiaalia ei voi tarkasti todeta. [51.]

9.2 Vertailupalasarjan valmistus

Vertailupalasarjan X10CrMoVNb9-1 materiaaliset lämpökäsitellyt kiekot olivat Kiwa Inspectalla valmiina ennen työn aloitusta ja ne on valmistettu alun perin lämpökäsittelyparametrien löytämiseksi Kiwa Inspectalle tehdyn insinööriyön yhteydessä [53]. Struersin kalibrintipalat 149,5 HV5, 239,3 HV5 ja 344 HV5 ovat virallisia kalibrintipaloja, ja ovat suoraan käyttövalmiita mittausten suorituksiin. Kuitenkin vertailupalasarjan kappaleet vaativat käsittelyitä ennen varsinaisten mittausten aloitusta. Vertailupalat koneistettiin Kiwa Inspectan Vantaan konttorilla materiaalin tunnistuksen jälkeen. Kaikista kolmesta vertailupalasarjan kappaleesta on molemmin puolin lastuttu yksi kerros. Tämän lisäksi kappaleiden reunat on hiottu, jotta kappaleiden lastuaminen vältetään seuraavassa vaiheessa.

Koneistetut vertailupalasarjan kappaleet on tämän jälkeen läpätty Okun Koneistuspalvelu Oy:ssä, Outokummussa. Läppäys on hionta- tai kiillotusprosessi, jossa vapaana oleva hioma-aine on asetettu kahden vastakkain olevan, liikkuvan pinnan väliin. Pinnat eivät kuitenkaan saa olla kosketuksissa toisiinsa. Prosessia hyödynnetään, kun halutaan erittäin tasainen tai kiiltävä pinta, tai erittäin mittatarkat kappaleet. [53.] Läppäyksen jälkeen vertailupalasarjan kappaleet validoidaan Kiwa Inspectan Vantaan konttorilla. Validointi suoritetaan käyttäen Vickers-kovuusmittausmenetelmää pöytäkovuusmittarilla laboratorio-olosuhteissa.

9.3 Laboratoriossa suoritettu pöytäkovuusmittaus

Vertailupalasarjan kappaleiden validointi vaatii 30 mittauspisteestä mitatut kovuudet. Pöytäkovuusmittarilla saadut kovuusmittaustulokset määritellään yksitellen optisesti.

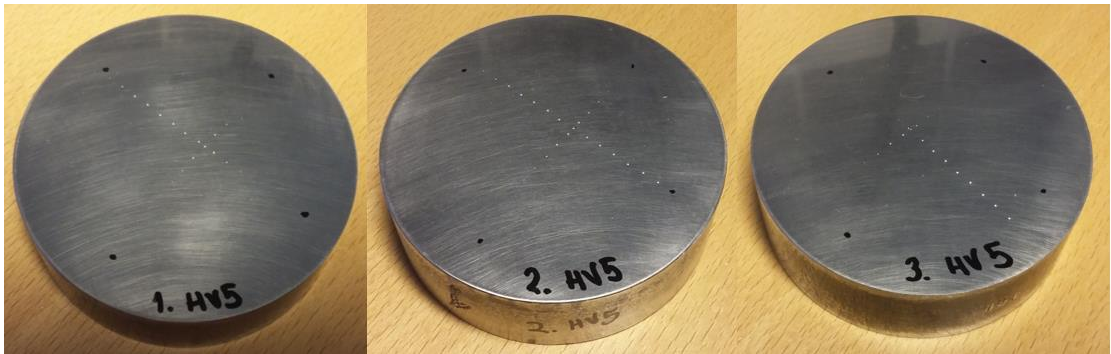
Optisen tarkastelun jälkeen jokaiselle mittapisteele on saatu määriteltyä kovuus ja näiden tulosten perusteella määritetään vertailupalasarjan kovuus keskiarvon perusteella.

Laboratoriokovuusmittaukset suoritettiin Struersin DuraScan 80 G5 -kovuusmittarilla (kuva 14.). Kovuusmittari on akkreditoitu ja ulkoinen toimittaja kalbroi mittarin kerran vuodessa. Pöytäkovuusmittarilla on mahdollista mitata kovuuksia mittaamenetelmillä HV1, HV5, HV10 ja HBW 2,5/62,5.



Kuva 14. Struersin pöytäkovuusmittari.

Ennen validointia pöytäkovuusmittari on kalibroitu Indentec Hardness Testing Machines Ltd:n kalibroitipalalla 177,9 HV5. Validointi suoritettiin vertailupaloista kahteen suuntaan koko halkaisijalta, 15 mittaus suuntaan. Kuvassa 15 on nähtävillä validoinnista aiheutuneet mittauskärjen painaumat.



Kuva 15. Vertailupalasarjan validointi.

Vertailupala 1:llä on suuri keskihajonta, joka on nähtävissä taulukossa 10. Suuren keskihajonnan takia kappaletta ei voida luotettavasti käyttää kalibrointiin ja on tästä syystä jätetty pois kalibrointien vertailusta. Vertailupaloilla 2 ja 3 on selkeästi matalampi keskihajonta, mikä lisää mittaustulosten luotettavuutta kokeellisessa osuudessa.

10 Kokeellinen osuus

Kokeellisessa osuudessa vertaillaan eri ferriittisillä teräksillä kalibroituja kenttäkovuusmittareita. Tuloksien perusteella vertaillaan kalibrointimateriaalin vaikutusta saatuun kovuusarvoon mitattaessa kuumalujaa terästä X10CrMoVNb9-1 niin vertailupalasarjan kuin valmiin putken muodossa.

Vertailupalasarjaa mitatessa kalibrointi suoritettiin Struersin kalibrointipaloilla 149,5 HV5, 239,3 HV5 ja 344 HV5. Vertailupalasarjan kovuudet ovat väliltä 219 HV5–405 HV5. Kovuusmittauksia suoritettiin tämän lisäksi X10CrMoVNb9-1-materiaalista valmistettuun valmiiseen putkeen poikkileikkauksesta ja kappaleen ulkopinnalta. Kalibrointi suoritettiin samoilla kalibrointikappaleilla kuin vertailupalasarjan mittauksissa, ja tämän lisäksi myös itse vertailupaloilla 219 HV5 ja 236 HV5.

Kalibrointipalan materiaalin vaikutusta kenttäkovuusmittarin säätöihin ja tulosten luotettavuuteen testataan alumiinilla ja messingillä. Tulosten tarkastelu jätetään kuitenkin työn ulkopuolelle.

11 Mittaukset ja havainnot

Kenttäkovuusmittareita vertailtaessa pyrittiin ympäristön vaikutusta mittaustuloksiin minimoimaan, ja mittaukset suoritettiin akkreditoitussa laboratoriossa, jossa lämpötila on 23 ± 5 °C. Tämän lisäksi kaikki mittaukset erilaisilla mittareilla ja testikappaleilla suoritettiin tukevalla kivipöydällä, joka minimoi alustan joustamisen vaikutusta mittaustuloksiin. Mittausten suorittaja pysyi myös samana kaikissa mittauksissa, joka poissulkee eri mitaajan vaikutuksen mittaustuloksissa. Tuloksien kirjauksessa käytettävät nimet antureille ja mittareille on nähtävillä taulukosta 7.

Taulukko 7. Työssä käytettävät yksilöidyt nimet testattaville mittareille.

Mittari ja anturi	Tekstissä käytetty nimi
MIC10; 49 N	Anturi 1
MIC10; 98 N	Anturi 2
SonoDur2; 49 N	Anturi 3

MIC10-kenttäkovuusmittarilla suoritettiin harjoitusmittauksia useita kertoja ennen varsinaisten mittausten suoritusta, harjoitusmittauksia suoritettiin useana päivänä. Puolestaan SonoDur2-mittarilla harjoituskertoja ennen varsinaisia mittauksia oli huomattavasti vähemmän ja harjoitusmittauksia suoritettiin vain yhtenä päivänä.

Tuloksissa tarkastellaan tuloksien hajontaa kaavioiden avulla, jotka on saatu mittarin näytöltä luettuina. Puolestaan kalibrointikorjauksen vaikutusta ja kalibroinnin luotettavuutta arvioidaan työssä korjatun keskiarvon avulla. Tämä korjattu keskiarvo on kalibrointimittauksen sekä samoilla kalibrointiasetuksilla tehdyn vertailevan mittauksen avulla saatu niin kutsuttu oikea arvo. Vertailumittaus suoritetaan eri kovuiseen kalibrointikapaleeseen.

11.1 Vertailupalasarja

Eri ferriittisen teräksen vaikutusta mittaustuloksiin tarkasteltiin kuumalujan teräksen ja työkaluteräksen kesken. Mittareiden kalibrointiin käytettiin Struersin työkaluteräksisiä kalibrointipaloja, ja mittaus suoritettiin kuumalujaan teräkseen X10CrMoVNb9-1. Kalibrointikovuudet ovat 149,5 HV5, 239,3 HV ja 344 HV5. Kalibrointipaloissakin on paikallisia kovuudellisia eroja, mikä antaa myös kalibrointikappaleelle hajonnan. Kalibrointipalojen minimi- ja maksimiarvot sekä keskihajonnat ovat nähtävillä liitteestä 2. Kalibrointipalan ja kalibrointivertailussa käytettävät kovuudet on nähtävillä taulukossa 8.

Taulukko 8. Kalibrointipalan ja kalibrointivertailupalan kovuudet.

Kalibrointipalan kovuus		
149,5 HV5	239,3 HV5	344 HV5
239,3 HV5	149,5 HV5	239,3 HV5

Vertailupalan kovuus

Vertailumittauksen kovuus valittiin siten, ettei se eroa huomattavasti kalibrointipalan kovuudesta. Mittausten suorituksen jälkeen selvisi, että kalibrointihetkellä mittari näyttää kalibrointipalan kovuuden näytöltä oikein, mutta kun tästä kovuudesta poiketaan, voi mittarin näyttö antaa oikeasta kovuudesta poikkeavia tuloksia. Korjaavan arvon saamiseksi tarvitaan näin ollen vertailumittaus, jonka kuuluisi jättää testikappaleen kovuus kalibrointikovuuden ja vertailukovuuden väliin. Näin mittarin näytön antama lukema saadaan kalibrointikorjattua oikeaksi arvoksi.

Mittaukset

Kokeelliset mittaukset eri seosteisten terästen välillä suoritettiin kolmeen vertailupalaan, materiaaliltaan X10CrMoVNb9-1. Taulukossa 9 on nähtävillä vertailupalojen keskiarvoiset laboratoriossa pöytäkovuusmittarilla saadut kovuudet sekä mittausten keskihajonta (SD). Tulokset ovat saatu 30 mittauspisteellä.

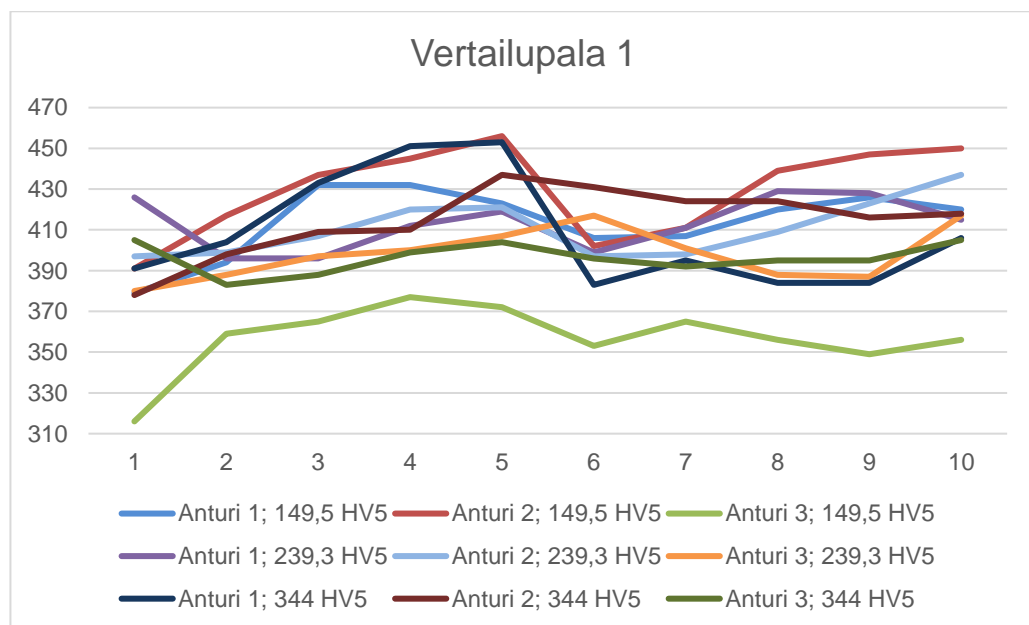
Taulukko 9. Vertailupalojen 1, 2 ja 3 kovuudet ja keskihajonnat.

	Vertailupala 1	Vertailupala 2	Vertailupala 3
Keskiarvo	404,7 HV5	236,1 HV5	218,6 HV5
Keskihajonta	± 11,1	± 3,3	± 2,4

Pöytäkovuusmittauksessa saadut kovuusarvot vaihtelivat vertailupalalla 1 arvojen 386 HV5 - 426 HV5 välillä. Vertailupalan 2 kovuudet vaihtelivat välillä 229 HV5 - 243 HV5, sekä vertailupalan 3 kohdalla kovuuksia saatiin väliltä 214 HV5 - 223 HV5.

11.1.1 Vertailupala 1

Kovimman, vertailupalan 1 kohdalla on mittausten perusteella haastavaa tehdä luotettavia johtopäätöksiä tulosten perusteella. Pöytäkovuusmittarilla saadut tulokset vaihtelivat suuresti, mittaustulosten keskihajonnan noustessa ± 11,1 HV5. Kenttäkovuusmittauksien aikana mittauksia suoritettiin koko kiekon pinta-alalta ja saatujen mittaustulosten ero oli vielä tätäkin suurempi. Kuva 16 havainnollistaa tulosten hajontaa mittausten välillä.

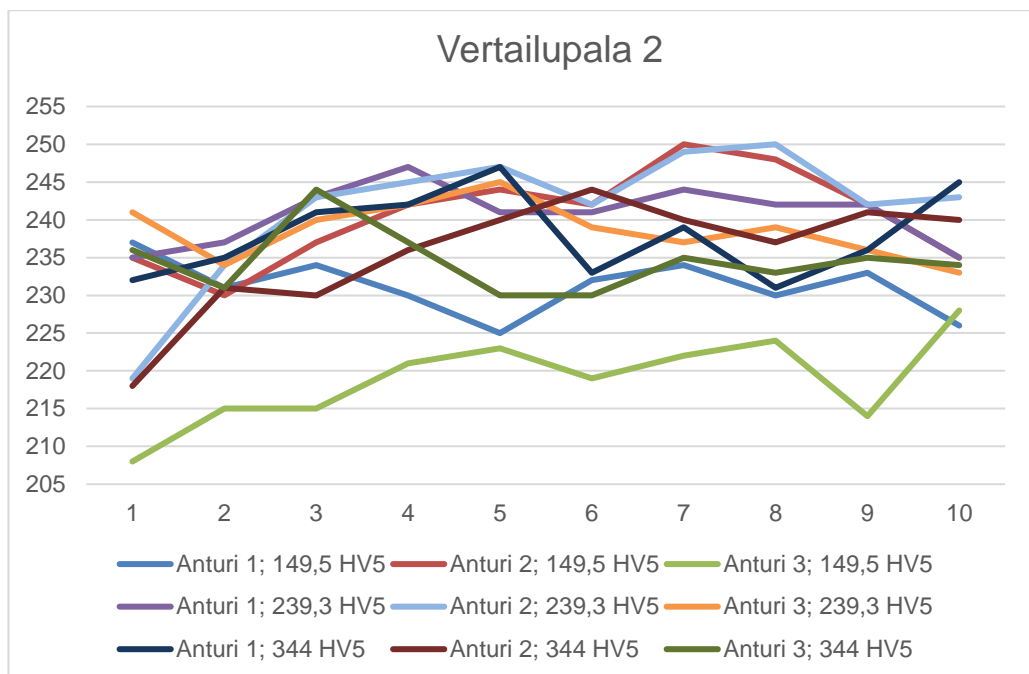


Kuva 16. Mittaukset vertailupala 1, 404,7 HV5; anturit 1., 2. ja 3.

Tulokset ovat hajonnallisesti erittäin suuret, ja tulosten perusteella on vaikea tehdä luotettavia johtopäätöksiä kalibrointikovuuden tai kalibrointipalan seostuksen vaikutuksesta mittaustuloksiin.

11.1.2 Vertailupala 2

Kaaviosta on nähtävillä mittarin ruudulta luettu kovuusarvo ennen kalibrointien avulla saatavaa korjattua arvoa. Mittaukset on suoritettu 2 x 5 kpl:n sarjassa, mutta kaavion selkeyttämiseksi kaikki 10 kpl mittauksia on laitettu yhdelle janalle. Kuvassa 17 on nähtävillä mittaustulosten keskiarvo, joka on luettu mittarin näytöltä ja joiden pohjalta käyrät on tehty.



Kuva 17. Mittaukset vertailupala 2, 236,1 HV5; anturit 1., 2. ja 3.

Vertailupalan 2 kovuusarvot pöytäkovuusmittarilla mitattuina vaihtelivat arvojen 229 - 243 HV5 välillä, keskihajonnan ollessa $\pm 3,3$ HV5.

Anturin 1 kohdalla keskihajonnat ovat pysyneet tasaisena mittausten aikana. Mittarin näytöltä luettuina mittaustulosten keskiarvot olivat samankaltaiset kalibrointipalojen

239,3 HV5 ja 344 HV5 välillä. Kalibrointipalan 149,5 HV5 kohdalla mittarin näytöltä luetavat tulokset olivat keskiarvollisesti hieman alakanttiin.

Kalibrointien kautta korjattuja arvoja tarkastellessa anturilla 1 (taulukko 10) ei ole selkeitä eroja havaittavissa mittarin näytöltä luetun lukeman ja korjatun keskiarvon välillä mittausten kesken. Suurimmaksi mittaustulosten korjattu keskiarvo on noussut kalibrointipalalla 344 HV5, mutta selkeää eroa ei ole havaittavissa. Testikappaleen kovuus jäi niukasti kalibrointipalan ja vertailupalan kovuuden väliin pehmeämmillä kalibrointipaloilla (149,5 HV5 ja 239,3 HV5), puolestaan hieman testikappaleen kovuuden ulkopuolelle jäi kalibrointimittaus 344 HV5 ja kyseisen kalibroinnin vertailumittaus.

Taulukko 10. Mittarin näytöltä luetut kovuusarvot; vertailupala 2.

Vertailupala 2.		Kalibrointi		
236,1 HV5		Kalibrointipala	Kalibrointipala	Kalibrointipala
Anturi	Mittaus	149,5 HV5	239,3 HV5	344 HV5
Anturi 1	1.-5.	231 HV5	241 HV5	239 HV5
	6.-10.	231 HV5	241 HV5	237 HV5
Anturi 2	1.-5.	239 HV10	238 HV10	231 HV10
	6.-10.	243 HV10	245 HV10	240 HV10
Anturi 3	1.-5.	216 HV5	217 HV5	236 HV5
	6.-10.	221 HV5	217 HV5	233 HV5

Anturilla 2 mittarin näytöltä luetuilla arvoilla ei ole suurta eroa eri kalibrointien mittausten välillä. Keskihajonnat ovat jääneet anturilla 2 suuriksi kahdella mittaussarjalla (taulukko 11), mutta muuten tulosten keskihajonta on tasaista. Mittaustulosten suurempaan keskihajontaan vaikuttaa todennäköisimmin kokemattoman mittaajan anturin hallinta suuremmalla testivoimalla. Anturilla 2 on havaittavissa sama vaikutus kalibrointipalojen välillä kuin anturilla 1. Kalibrointipalan 149,5 HV5 vertailumittauksien kautta korjattu arvo muuttuu hieman muita enemmän, mutta korjattu arvo asettuu samaan suuruusluokkaan kuin muilla kalibroinneilla. Tuloksissa ei ole selkeästi havaittavissa eroja kalibrointien välillä, mutta tulosten perusteella näistä paras valinta olisi itse testikappaletta kovempi kalibrointikappale, 344 HV5. Anturi 2, joka toimii suuremmalla testivoimalla, antoi hieman suurempia korjattuja keskiarvollisia tuloksia kuin anturi 1.

Keskihajonnat ovat jääneet kohtalaisen pieniksi anturilla 3 ja tuloksia on näin ollen helpompi tulkita. Anturilla 3 mittarin näytöltä luetut kovuusarvot olivat selkeästi matalampia muihin mittauksiin verrattaessa kalibrointipaloilla 149,5 HV5 ja 239,3 HV5. Kalibrointipalalla 149,5 HV5 on nähtävillä n. 10 HV5:n muutos korjatun arvon ja mittarin näyttämän välillä, kun puolestaan 239,3 HV5:lla ero on huomattava. Kalibrointipala 239,3 HV5 antaa korjatuksi arvoksi testikappaleita selkeästi korkeampia arvoja, vaikka mittarin näyttämä oli alhainen. Kalibrointikorjattuja arvoja tarkasteltaessa kalibrointipalalla 239,3 HV5 on palattava tarkastelemaan kalibrointi-arvoja (liite 5.). Kalibrointi-arvoista on huomioitava, että tulokset heittävät selkeästi kalibrointipalan kovuudesta, joten anturilla 3 suoritettu kalibrointi palaan 239,3 HV5 voidaan jättää tulkitseematta. Tämä epäonnistunut kalibrointi aiheuttaa kalibrointikorjaukseen suuren eron mittarin näyttämän kanssa. Kalibrointipalan 344 HV5 muutos korjattuun arvoon ja mittarin näyttämän välillä on pienintä, ja korjattu arvo asettuu lähimmäksi testikappaleen kovuutta.

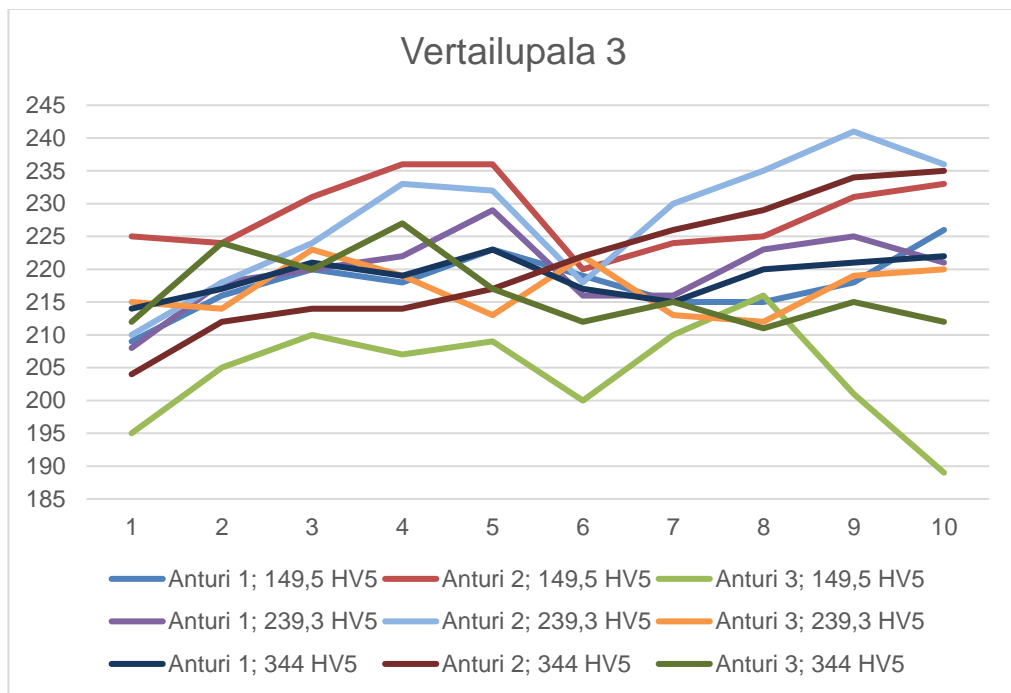
Taulukko 11. Vertailupala 2; korjatut keskiarvot ja keskihajonnat; anturit 1, 2 ja 3.

Vertailupala 2. 236,1 HV5		Kalibrointi		
		Kalibrointipala 149,5 HV5	Kalibrointipala 239,3 HV5	Kalibrointipala 344 HV5
1.-5.	Ka.	238 HV5	238 HV5	243 HV5
	SD	(± 4,0)	(± 4,3)	(± 5,3)
6.-10.	Ka.	237 HV5	238 HV5	240 HV5
	SD	(± 2,8)	(± 3,1)	(± 4,9)
1.-5.	Ka.	245 HV10	240 HV10	235 HV10
	SD	(± 3,3)	(± 10,3)	(± 7,4)
6.-10.	Ka.	250 HV10	249 HV10	244 HV10
	SD	(± 5,3)	(± 3,5)	(± 2,2)
1.-5.	Ka.	228 HV5	257 HV5	239 HV5
	SD	(± 5,3)	(± 3,6)	(± 5,0)
6.-10.	Ka.	234 HV5	252 HV5	237 HV5
	SD	(± 4,7)	(± 2,2)	(± 1,9)

Vertailupalan 2 mittauksissa hieman muita kalibrointipaloja tarkempia tuloksia saatiin kalibrointipalalla 344 HV5. On havaittavissa, että kalibrointipalan on parempi olla kovempia kuin itse testikappale, kuin että kalibrointipala olisi selkeästi pehmeämpi kuin itse testikappale. Kalibrointipala 239,3 HV5 antaa tulokset myös lähelle kappaleen pöytäkovuutta, mutta anturin 3 kohdalla ei tuloksia voi verrata epäonnistuneen kalibroinnin takia.

11.1.3 Vertailupala 3

Käyrät havainnoivat mittaustulosten hajontoja mitattaessa vertailupalaa keskiarvolla 219 HV5, tulokset ovat mittarin näytöltä saatuja arvoja (kuva 18). Pöytäkovuusmittarilla saadut tulokset vaihtelivat välillä 214 - 223 HV5. Kaaviosta on nähtävillä mittarin ruudulta luettu kovuusarvo ennen kalibrointien avulla saatavaa korjattua arvoa. Mittaukset on suoritettu 2 x 5 kpl:n sarjassa, mutta kaavion selkeyttämiseksi kaikki 10 kpl mittauksia on laitettu yhdelle janalle.



Kuva 18. Mittaukset vertailupala 3, 218,6 HV5; anturit 1, 2 ja 3.

Anturilla 1 hajonta mittausten välillä on suurimmillaan $\pm 6,8$ HV5, eli mittaustulokset ovat suhteelliset tasaisia ottaen huomioon kokemattoman mittaajan. Korjattu keskiarvo nousee vain hieman jokaisen kalibrointipalan kohdalla, ja korjatut keskiarvot ovat lähes identtisiä keskenään. Korjattuun arvoon vaadittavat vertailumittaukset ovat samat kuin edellisillä mittareilla, ja vertailupalan 3 kohdalla ei ole havaittavissa selkeitä eroja mittausten välillä. Taulukossa 12 on esillä mittarin näytöltä luettujen mittausten keskiarvot ja taulukossa 13 kalibrointikorjauksen jälkeen saadut arvot.

Taulukko 12. Mittarin näytöltä luetut kovuusarvot; vertailupala 3.

Vertailupala 3 218,6 HV5		Kalibrointi		
Anturi	Mittaus	Kalibrointipala 149,5 HV5	Kalibrointipala 239,3 HV5	Kalibrointipala 344 HV5
Anturi 1	1.-5.	217 HV5	219 HV5	219 HV5
	6.-10.	219 HV5	220 HV5	219 HV5
Anturi 2	1.-5.	230 HV10	223 HV10	212 HV10
	6.-10.	227 HV10	232 HV10	229 HV10
Anturi 3	1.-5.	205 HV5	217 HV5	220 HV5
	6.-10.	201 HV5	217 HV5	213 HV5

Anturin 2 mittauksissa mittarin näytöltä luettu arvo on hieman pienempi kuin kalibrointien kautta saatu korjattu arvo kaikilla mittauksilla, kuitenkin kaikkien mittaussarjojen keskiarvot korjatut arvot ovat lähes poikkeuksetta saaneet testikappaleelta kovempia arvoja. Sama oli havaittavissa myös vertailupalan 2 mittauksissa. Korjatun arvon erotus saatuun mittarin näytön antamaan tulokseen ei eroa huomattavasti kalibrointipalojen välillä. Kalibrointipalan 239,3 HV5 kohdalla korjattu arvo laskee, kun muiden kalibrointipalojen kohdalla tulos nousee. Tämä näkyi yhtä lailla vertailupalan 2 kohdalla. Kalibrointikorjatut arvot jäävät testikappaleen kovuuden yläpuolelle anturilla 2. Kuitenkaan kalibrointikorjaus ei nosta mittarinnäyttämää usealla yksiköllä, joten kalibrointi on onnistunut. Kappaleen matalakovuus suhteutettuna anturin testivoimaan voisi aiheuttaa tuloksiin oikeasta arvosta poikkeavia tuloksia. Yleisesti on haastavaa sanoa sopivinta kalibrointia anturille 2 vertailupalan 3 mittauksissa.

Taulukko 13. Vertailupala 2; korjatut keskiarvot ja keskihajonnat; anturit 1, 2 ja 3.

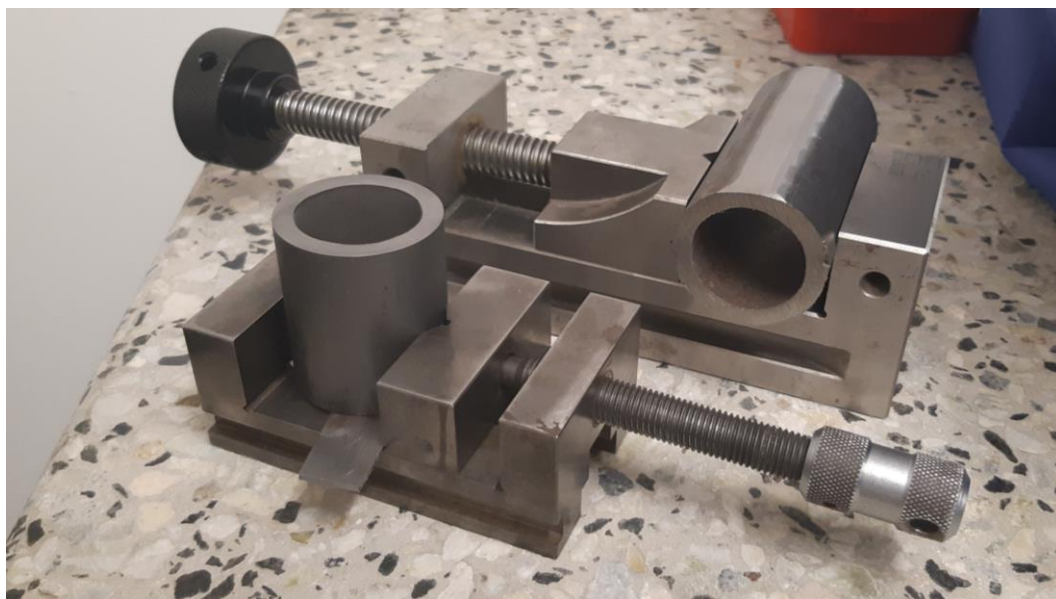
Vertailupala 3. 218,6 HV5		Kalibrointi		
		Kalibrointipala 149,5 HV5	Kalibrointipala 239,3 HV5	Kalibrointipala 344 HV5
Mittaus				
1.-5.	Ka.	222 HV5	215 HV5	223 HV5
	SD	(± 4,7)	(± 6,8)	(± 3,1)
6.-10.	Ka.	223 HV5	216 HV5	224 HV5
	SD	(± 4,0)	(± 3,7)	(± 2,6)
1.-5.	Ka.	236 HV10	225 HV10	216 HV10
	SD	(± 5,2)	(± 8,7)	(± 4,4)
6.-10.	Ka.	232 HV10	234 HV10	233 HV10
	SD	(± 4,8)	(± 7,8)	(± 4,9)
1.-5.	Ka.	215 HV5	225 HV5	224 HV5
	SD	(± 5,4)	(± 3,7)	(± 5,3)
6.-10.	Ka.	210 HV5	226 HV5	217 HV5
	SD	(± 7,1)	(± 4,0)	(± 1,7)

Mittarin näytöltä luetut arvot anturilla 3 olivat kaikilla kalibrointipaloilla matalampia kuin korjattu keskiarvo, eli kalibrointikorjaus nosti tuloksia. Pienintä eroavaisuus oli kalibrointipalalla 344 HV5. Kalibrointipalalla 149,5 HV5 korjattu keskiarvo saa keskiarvollisesti matalampia tuloksia testikappaleen kovuuteen verrattuna ja kalibrointipalalla 239,3 HV5 saadut tulokset saavat tuloksia testikappaleen kovuuden yläpuolelta. Kolmas vertailtava kalibrointipala 344 HV5 sai keskiarvollisia tuloksia testikappaleen keskiarvollisen kovuuden molemmiin puolin. Selkeitä eroavaisuuksia ei ole kalibrointipalojen välillä nähtävissä, mutta anturin 3 mittaustulosten perusteella tarkimmat tulokset saadaan, kun kalibrointipalan kovuus on suurempi kuin testikappaleen kovuus.

Kaikkia mittauksia tarkastellessa esiin nousee anturilla 2 nähtävissä oleva suurempi keskihajonta osassa mittaussarjoista. Suurempi, 98 N:n testivoima on vaikeampi hallita kuin puolet kevyempi testivoima. Pitkiä mittaussarjoja suorittaessa on mittausta tuettava varjolla, jotta käsien väsyminen ei vaikuttaisi mittaustuloksiin. Keskihajonnan suuruus ei merkitse testikappaleessa olevaa kovuuden vaihtelua, vaan kokemattoman mittaajan väsymistä suuremmalla testivoimalla mitatessa.

11.2 Putkistomateriaali X10CrMoVNb9-1

Kalibrintipalan kovuuden vaikutusta mittaustulokseen testattiin materiaalille X10CrMoVNb9-1. Mitattavana kappaleena oli kyseistä materiaalia oleva putki, jonka kovuuksia mitattiin putken ulkopinnalta hionnan ja kiillotuksen jälkeen sekä hiotulta ja kiillotetulta poikkileikkauspinnalta (kuva 19).



Kuva 19. X10CrMoVNb9-1-putket tuettuina mittausta varten.

Kaikki kenttäkovuusmittaukset suoritettiin mittareilla samaan kappaleeseen. Mittareiden kalibroinnit mittauksia varten suoritettiin Struersin kalibrintipaloilla: 149,5 HV5, 239,3 HV5 ja 344 HV5, sekä X10CrMoVNb9-1 vertailupaloilla 219 HV5 ja 236 HV5. Kalibrointitulokset ja vertailumittaukset ovat nähtävissä liitteessä 9.

Putkesta mitattiin pöytäkovuusmittarilla kovuudet poikkileikkauksesta sekä putken pinnalta testivoimilla HV5 ja 10 HV5. Mittauksia otettiin kymmenestä mittauspisteestä, ja saadut keskiarvot ja hajonnat ovat nähtävillä taulukossa 14.

Taulukko 14. Laboratoriokovuudet X10CrMoVNb9-1-putkesta.

	Vickers-kovuus HV5		Vickers-kovuus HV10	
	Poikkileikkaus	Putken pinta	Poikkileikkaus	Putken pinta
Keskiarvo	236,2	230,0	233,4	227,8
Keskihajonta	± 1,9	± 1,9	± 2,5	± 2,7

Minimi ja maksimikovuudet poikkileikkauksesta pienemmällä testivoimalla olivat 233 HV5 ja 239 HV5, sekä putken pinnalta 227 HV5 ja 233 HV5. Testivoimalla HV10:n kovuudet olivat väliltä 230 - 238 HV10 poikkileikkauksesta ja putken pinnalta väliltä 223 - 232 HV10. Eri testivoimilla saadut kovuusarvot poikkeavat hieman toisistaan, joten suora verrannollisuutta ei voi tehdä HV5:n ja HV10:n antureiden välillä.

Putken mittauksissa käytettiin viittä eri kalibrintikovuutta, joista kolme oli työkaluterästä ja kaksi oli X10CrMoVNb9-1:tä. Kalibrintien lisäksi kalibrintikorjaukseen vaadittiin vertailumittaus. Kalibrintivertailupalojen kovuus on nähtävillä taulukosta 15.

Taulukko 15. Kalibrintipala ja kalibrintikorjaukseen vaadittava vertailupala

Kalibrinti-/vertailupalan kovuus				
149,5 HV5	239,3 HV5	344 HV5	219 HV5	236 HV5
239,3 HV5	149,5 HV5	239,3 HV5	236 HV5	219 HV5

Kalibrintivertailupalan kovuus

Kalibrintivertailupalan kovuus valikoitui kalibrintipalan kovuuden läheisyydestä työkaluteräksisillä kalibrintipaloilla 249,5 HV5, 239,3 HV5 ja 344 HV5. Vertailupalasarjan kappaleet 2 ja 3 toimivat näissä mittauksissa kalibrintipaloina, ja kalibrintivertailumittaukset suoritetaan ristiin kappaleiden kesken.

Mittaukset

Kovuusmittauksia materiaaliin X10CrMoVNb9-1 suoritettiin putken ulkopinnalta sekä putken poikkileikkauksesta. Mitattavat kohdat hiottiin tasaisiksi ja kiillotettiin kiillotuslaskalla ennen mittauksia.

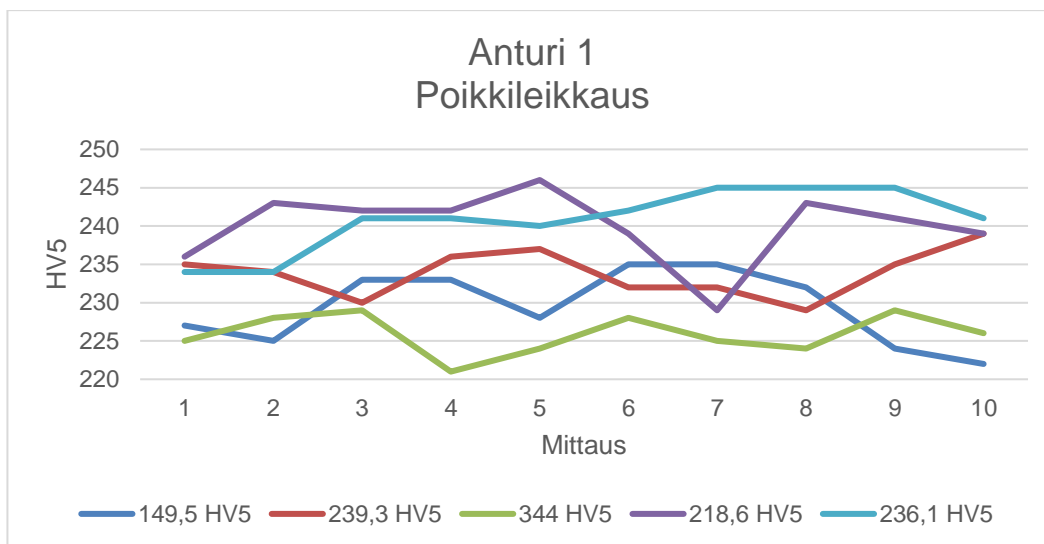
Kenttäkovuusmittarilla suoritettavat mittaukset antavat olettaa, että putken ulkopinnalla olisi kappaleen kovuus selkeästi korkeampi kuin poikkileikkauksessa. Pöytäkovuusmittarilla mitatut kovuudet puolestaan eivät anna kovuuksille suuria eroja poikkileikkauksen ja putken ulkopinnan välille, kuten taulukossa 14 on nähtävillä. Keskiarvillisesti poikkileikkauksesta saadut tulokset ovat matalampia kuin putken ulkopinnalta saadut kovuudet.

11.2.1 Anturi 1

Kuvan 20 käyrät kuvaavat mittaustulosten hajontaa, ja tulokset ovat mittarin näytöltä luettuja arvoja putken poikkileikkauksesta. Näiden näytöltä luettujen arvojen keskiarvot ja kalibrointien kautta saatu korjattu arvo on nähtävillä taulukossa 16. Anturin 1 kalibrointi ja kalibrointivertailutulokset ovat liitteessä 9 ja mittaustulokset ovat nähtävillä liitteessä 10.

Pöytäkovuusmittarilla saadut kovuudet kappaleen poikkileikkauksesta olivat väliltä 233 - 239 HV5. Mittaustulosten hajonta on kaikkien kalibrointien jälkeen ollut pientä, ja mittaukset ovat tässä suhteessa onnistuneet hyvin. Mittarin näytöltä saatujen keskiarvojen ero ei ole suurta kalibrointipalojen mittausten välillä, ja kaikkien mittaustulosten keskiarvot ovat väliltä 225 - 244 HV5.

Putken poikkileikkauksen kovuus osui kalibrointipalan ja kalibrointivertailupalan kovuuden väliin kalibroitaessa mittarit 149,5 HV5:llä ja 239,3 HV5:llä. Hieman laboratoriossa pöytäkoneella mitatun kovuuden ulkopuolelle jäädyään kalibrointipalalla 344 HV5 ja kyseisen kalibroinnin kalibrointivertailupalalla. Testikappaleen kovuuden alarajoille on päästy puolestaan kalibroitaessa mittarit vertailupaloilla 2 (236 HV5) ja 3 (219 HV5).



Kuva 20. Mittaukset X10CrMoVNb9-1, 236,2 HV5; anturi 3.

Kalibrointien kautta saatujen korjattujen arvojen keskiarvot sen sijaan vaihtelivat 232 - 247 HV5. Kalibrointikorjatut arvot eroavat vähiten vertailupalalla 2 sekä kalibrointipaloilla 149,5 HV5 ja 239,5 HV5. Kalibrointimateriaalin ollessa selkeästi testikappaletta kovempi 344 HV5 on kalibrointikorjatun arvon ja mittarin näyttämän välillä suurempi ero, joten voitaisiin sanoa tulosten luotettavuuden laskevan. Vertailupalan 3 kohdalla mittarin näytön ja korjatun arvon eroavaisuus on noin 5 HV5. Korjatut arvot nousevat myös suurimmiksi, kun mittari on kalibroitu vertailupala 3:lla (219 HV5).

Poikkileikkauksen keskiarvoinen kovuus pöytäkovuusmittauksessa oli 236,2 HV5. Mittaustuloksista lähimmäksi tätä arvoa on päästy kalibrointipalalla 239,3 HV5, jonka keskiarvoiksi on saatu lähes pöytäkovuudeksi saadut tulokset. Myös kalibrointipalan kovuus ja kalibrointivertailupala ovat testattavan kappaleen kovuuden molemmin puolin valittu. Kalibrointipalalla 344 HV5 on päästy lähelle pöytäkovuutta, mutta kalibrointien kautta saadun tuloksen suuri eroavaisuus tuo tulosten tulkintaan haasteita. Suuremman eron mittarin näyttämän ja kalibrointikorjatun arvon väliin aiheuttaa kalibrointipalan kovuuden suuri eroavaisuus testikappaleen kovuudesta.

Kalibrointipalan 149,5 HV5 tulokset jäävät kovuudellisesti noin 4 HV5:n verran testikappaleen keskiarvollisesta kovuudesta. Mittarin näyttämä sekä korjattu keskiarvo ovat lähellä testikappaleen keskiarvollista kovuutta. Kalibrointipalan ollessa pehmeämpi kuin itse testikappale nousee korjattu keskiarvo hieman mittarin näytön lukemasta. Tulokset

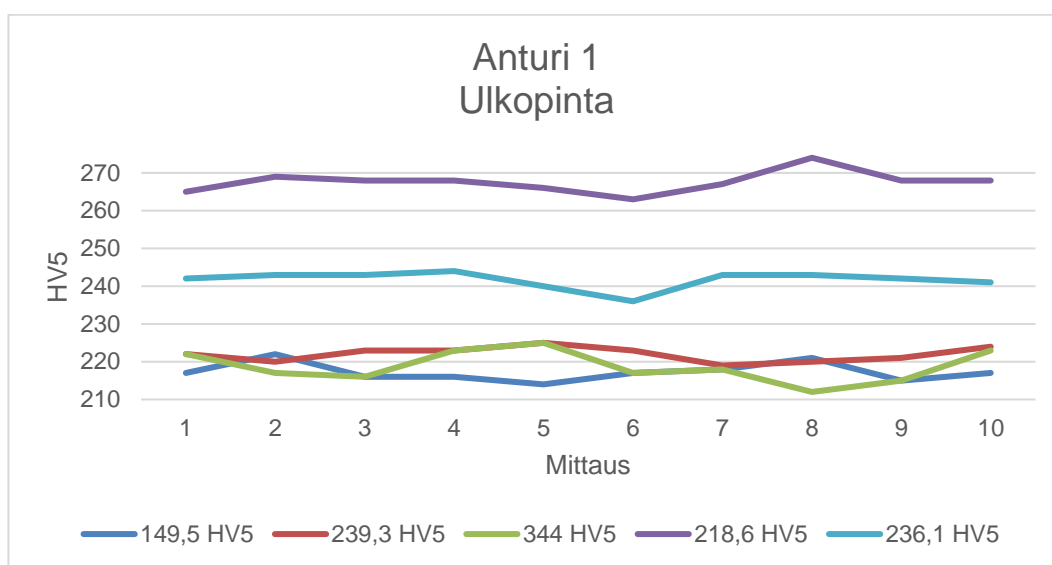
ovat odotetusti lähellä kappaleen kovuutta, kalibrointipalan ja kalibrointivertailupalan ollessa testikappaleen kovuuden ylä- ja alapuolelta. Vertailupalan 2 kohdalla tulokset olivat hieman keskiarvollaista kovuutta korkeampia, mutta mittarin näyttämän ja korjatun arvon välillä on vain pientä eroavaisuutta. Jos näin ei olisi, täytyisi kalibrointia tarkastella, koska testattava kappale on lähes vertailupalan 2 kovuinen. Vertailupalalla 3 saadut mittarin näytöltä luetut tulokset nousevat hieman kalibrointikorjauksen jälkeen, mikä oli nähtävissä myös pehmeimmällä, 149 HV5-kalibrointipalalla.

Taulukko 16. Mittarin antama ja kalibrointikorjattu keskiarvo sekä keskihajonta. Anturi 1; poikkileikkaus.

Anturi 1		Kalibrointi				
Poikkileikkaus						
236,3 HV5						
Mittaus	Mittaus	Kalibrointi-pala 149,5 HV5	Kalibrointi-pala 239,3 HV5	Kalibrointi-pala 344 HV5	Vertailupala 3 219 HV5	Vertailupala 2 236 HV5
1.-5.	Mittarin ka.	229 HV5	234 HV5	225 HV5	242 HV5	238 HV5
	Korjattu ka.	232 HV5	235 HV5	239 HV5	247 HV5	238 HV5
	SD	(± 3,2)	(± 2,4)	(± 2,9)	(± 3,2)	(± 3,3)
6.-10.	Mittarin ka.	230 HV5	233 HV5	226 HV5	238 HV5	244 HV5
	Korjattu ka.	232 HV5	234 HV5	240 HV5	243 HV5	243 HV5
	SD	(± 5,5)	(± 3,4)	(± 1,9)	(± 4,8)	(± 1,7)

Putkistomateriaalin poikkileikkauksen mittauksiin soveltuvin kalibrointi mittauksen perusteella on 239,3 HV5 ja tämän kalibrointivertailupala 149 HV5. Mittarin antama tulos, ja kalibroinnin kautta saadun korjatun arvon heitto oli pientä, ja mittaustulokset olivat lähes kappaleen pöytäkovuudella saatujen kovuuksien kaltaiset. Vertailupalan 2 tulokset ovat hieman korkeampia kuin kalibrointipalalla 149,5 HV5 saadut tulokset, mutta muuten kalibrointien välillä ei ole havaittavissa eroja. Vertailupala 3 ja kalibrointipala 344 HV5 olivat mittauksen perusteella epäsovimmimmat valinnat kyseisiin mittaukseen, mutta kalibrointia sekä kalibrointivertailumittausta olisi tarkasteltava lähemmin erojen oltaessa pieniä kalibrointipalojen välillä. Vertailupalalla 3 saadut korjatut arvot erosivat hieman mittarin antamista tuloksista, ja kalibrointikorjatut arvot saivat testikappaleen kovuutta suurempia tuloksia. Kalibrointipalan 344 HV5 kohdalla puolestaan korjattu arvo nousi 14 HV5:n verran ylöspäin, mutta muuten keskiarvallisesti tulokset osuivat poikkileikkauksen kovuuksien läheisyyteen.

Pöytäkovuusmittarilla putken ulkopinnalta saatiin kovuuksia väliltä 227 - 233 HV5. Mittausten edetessä todettiin kappaleessa olevan myös hieman paikallisia kovempia kohtia. Mittausten hajonta on pientä ulkopinnalta saaduissa mittauksissa, joten tuloksia on hyvä lähteä tulkitsemaan. Mittarin näytöltä on ulkopinnalta saatu tuloksia anturilla 1 väliltä 217 - 268 HV5 kalibrointien kesken. Korjatut arvot ovat väliltä 219 - 275 HV5. Kalibroinnit olivat samat kuin poikkileikkauksen mittauksessa, joten erot mittarin antaman tuloksen ja korjatun arvon välillä ovat samat. Kuva 21 havainnollistaa anturin 1 mittaustuloksia mittarin näytöltä luettuina.



Kuva 21. Mittaukset X10CrMoVNb9-1, 230,0 HV5; anturi 1.

Ulkopinnan keskiarvoinen kovuus pöytäkovuusmittauksessa oli 230,0 HV5. Lähimmäksi tätä arvoa on päästy kalibrointipalan 344 HV5 mittauksissa, mutta kalibrointikorjattua mittaustulosta on jouduttu selkeästi korjaamaan kalibrointikovuuden erotessa testikappaleen kovuudesta selkeästi. Kalibrointipalan 239,3 HV5 kohdalla ulkopinnalta saatu kalibrointikorjattu sekä mittarin näytöltä luettu keskiarvoinen tulos on testikappaleen kovuuden alapuolella. Poikkileikkauksesta samaisella kalibroinnilla saatiin lähes kappaleesta saatu pöytäkovuus. Mittarin näyttämä, kalibrointikorjattu keskiarvo ja keskihajonta on esitetty taulukossa 17.

Kalibrointikorjattuun arvoon aiheutuu pieni nousu kalibrointipalalla 149,5 HV5, mutta mittaustulokset jäävät keskiarvollisesti testattavan kovuuden alapuolelle. Kalibrointipala ja

kalibrointivertailupala kyseisellä kalibroinnilla jättää testikappaleen kovuuden näiden kovuuksien väliin. Vertailupalalla 2 saadut tulokset ovat hieman pöytäkovuusmittarilla saatuja tuloksia korkeammat, mutta selkeää eroa ei ole havaittavissa. Ero kalibrointikorjatun arvon ja mittarin näyttämän välillä on pientä palojen kovuuksien osuessa poikkileikkauksen kovuuden ympärille. Vertailupalan 3 kohdalla mittaustulokset ovat selkeästi muita mittauksia korkeammat, eikä tästä syystä ole järkevää lähteä niitä tulkitsemaan. Mittauksen aikana on mahdollisesti osuttu kappaleen paikallisesti kovempaan alueeseen.

Taulukko 17. Mittarin antama ja kalibrointikorjattu keskiarvo sekä keskihajonta. Anturi 1; ulkopinta.

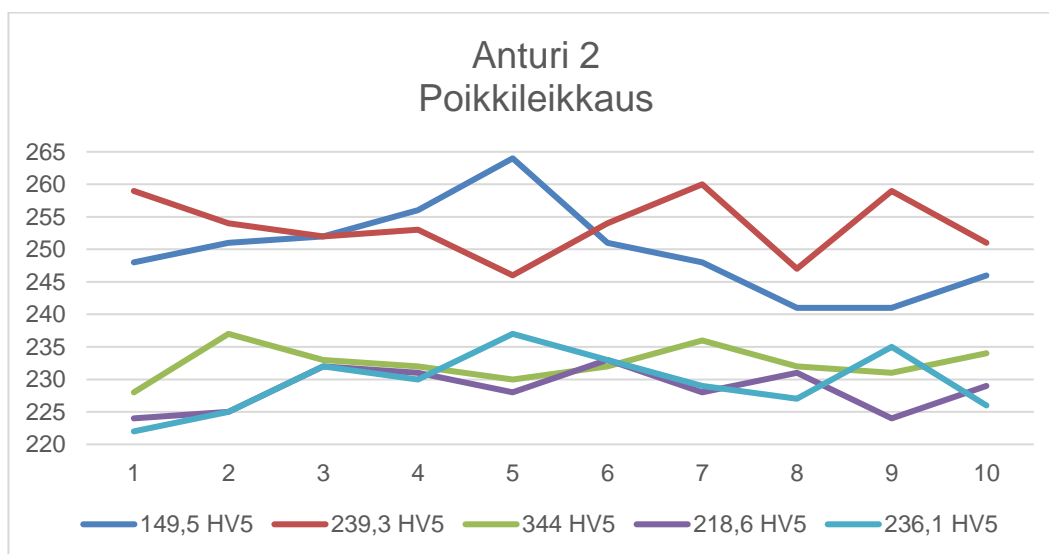
Anturi 1. Ulkopinta 230,0 HV5		Kalibrointi				
		Kalibrointi- pala	Kalibrointi- pala	Kalibrointi- pala	Vertailupala 3	Vertailupala 2
Mittaus		149,5 HV5	239,3 HV5	344 HV5	219 HV5	236 HV5
1.-5.	Mittarin ka.	217 HV5	223 HV5	221 HV5	267 HV5	242 HV5
	Korjattu ka.	219 HV5	223 HV5	234 HV5	274 HV5	242 HV5
	SD	(± 2,7)	(± 1,6)	(± 3,5)	(± 1,5)	(± 1,4)
6.-10.	Mittarin ka.	218 HV5	221 HV5	217 HV5	268 HV5	237 HV5
	Korjattu ka.	220 HV5	222 HV5	231 HV5	275 HV5	237 HV5
	SD	(± 2,0)	(± 1,9)	(± 3,6)	(± 3,5)	(± 5,2)

Ulkopinnalta saatujen keskiarvojen perusteella voisi sanoa, että anturin 344 HV5 tulokset osuvat lähimmäksi, joten tämä on mittausten perusteella tuottanut tarkimmat tulokset. Kuitenkin kyseinen kalibrointipala antaa myös korjattuun arvoon suurta nousua kalibrointipalan kovuuden erotessa testikappaleen kovuudesta. Vaikka kalibrointipalat 239,3 HV5 ja 149,5 HV5 antavat hieman keskiarvillisesti liian alhaisia tuloksia, voitaisiin sanoa kalibrointien olevan soveltuvia mittaushetkeen, kuitenkin kalibrointimateriaalin mennessä pehmeämmäksi tulos eroaa testikappaleen kovuudesta hieman enemmän.

Vertailupalan 2 kohdalla, joka puolestaan antoi hieman liian korkeita keskiarvillisia tuloksia, eivät tulokset eroa selkeästi kappaleen kovuudesta. Vertailupala 2 ja tämän kalibrointivertailupalan kovuudet soveltuvat kalibrointiin kyseiselle kovuudelle. Vertailupalan 3 kohdalla on tulosten perusteella tehdä johtopäätöksiä, koska putken ulkopinnan mittaukset ja poikkileikkauksen mittaukset poikkeavat niin selkeästi toisistaan.

11.2.2 Anturi 2

Anturin 2 mittauksissa testivoima oli suurempi, joten tuloksia verrataan koevoimalla HV10 saatuja pöytäkovuusmittaustuloksia, jotka olivat väliltä 230 - 238, keskiarvillisesti tuloksen olleen 233,4 HV5. Mittausten hajonnat ovat kohtalaisen pieniä, joten tulosten tulkinta on näin helpompaa. Kuvassa 22 nähtävät käyrät havainnollistavat mittauksia, ja ovat mittarin näytöltä luettuja arvoja. Mittausten mittarin näyttämän keskiarvot ja kalibrointikorjatut keskiarvot ovat nähtävillä taulukossa 18. Anturin 2 kalibrointi ja kalibrointi-vertailutulokset ovat liitteessä 11 ja mittaustulokset ovat nähtävillä liitteessä 12.



Kuva 22. Mittaukset X10CrMoVNb9-1, 233,4 HV10; anturi 2.

Mittarin näytöltä luetut mittausten keskiarvot vaihtelivat väliltä 228 - 254 HV10. Puolestaan kalibrointikorjatut arvot vaihtelivat välillä 223 - 262 HV10. Mittarin lukeman ja kalibrointikorjatun arvon eroavaisuus on pienintä vertailupalan 2 kohdalla, jossa tulokset eroavat vain muutaman yksikön. Kalibroinnin voidaan todeta onnistuneen, koska testattava pinta on lähes vertailupalan kovuinen, eli suurta muutosta ei kalibrointikorjauksen kuuluisikaan aiheuttaa. Kalibrointipaloilla 149,5 HV5 ja 344 HV5 mittarin lukeman ja korjatun arvon välillä on noin 8 HV10, ja ovat mittausten suurimmat. Tämä oli ennakoitavissa, koska näiden kalibrointikappaleiden kovuus eroaa testattavan pinnan kovuudesta selkeästi vaikkakin testattava kappale oli kalibrointikappaleen 149,5 HV5 ja kyseisen kalibrointivertailupalan kovuuden välistä.

Vertailupalan 3 kohdalla kalibrointikorjaus on madaltanut mittarin näytön lukemaa hieman alaspäin, saaden kalibrointikorjauksen kautta tuloksia hieman testikappaleen kovuuden alapuolelta. Saman vaikutuksen mittarin näytön lukemaan on aiheuttanut myös kalibrointi 239,3 HV5, jonka mittaustulokset jäävät niin mittarin näytöltä luettuina kuin kalibrointikorjattuinaakin kappaleen kovuuden yläpuolelle.

Taulukko 18. Mittarin antama ja kalibrointikorjattu keskiarvo sekä keskihajonta. Anturi 2; poikkileikkaus.

Anturi 2

Poikkileikkaus

233,4 HV10

Kalibrointi

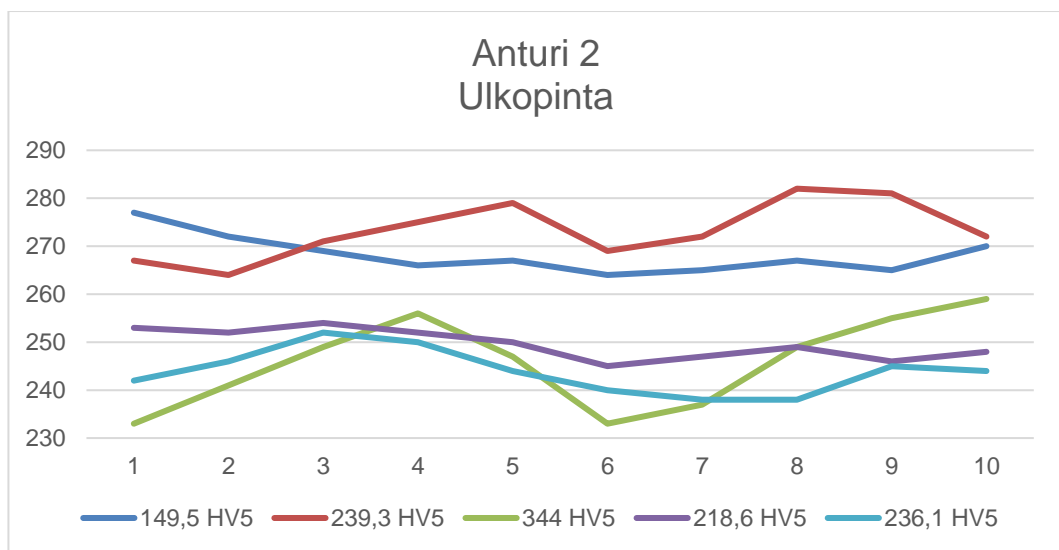
Mittaus	Kalibrointi-	Kalibrointi-	Kalibrointi-	Vertailupala	Vertailupala
	pala	pala	pala	3	2
	149,5 HV5	239,3 HV5	344 HV5	219 HV5	236 HV5
1.-5.	Mittarin ka. 254 HV10	253 HV10	232 HV10	228 HV10	229 HV10
	Korjattu ka. 262 HV10	249 HV10	240 HV10	223 HV10	230 HV10
	SD (± 5,5)	(±4,2)	(±3,0)	(±3,2)	(±5,3)
6.-10.	Mittarin ka. 245 HV10	254 HV10	233 HV10	229 HV10	230 HV10
	Korjattu ka. 252 HV10	250 HV10	241 HV10	224 HV10	232 HV10
	SD (±3,9)	(±4,9)	(±1,8)	(±3,0)	(±3,5)

Suuremmalla testivoimalla, HV10:llä saatu keskiarvoinen pöytäkovuusarvo kappaleen poikkipinnalle oli 233,4 HV10. Lähimmäksi tätä on päästy vertailupalalla 2, jonka keskiarvolliset tulokset ovat lähes kappaleen kovuisia. Myös korjausta arvoon ei ole vertailupalan 2 kohdalla juuri tarvinnut tehdä. Kalibrointipalan 149,5 HV5 ja 239,3 HV5 kohdalla korjatut arvot ovat jääneet selkeästi liian suuriksi, vaikkakin kalibrointipalan 239,3 HV5 on lähellä testattavan kappaleen kovuutta, eikä suurta kalibrointikorjausta ole tarvinnut tehdä. Kalibrointipalan 344 HV5 kohdalla keskiarvoksi on saatu hieman pöytäkovuutta suurempia kalibrointikorjattuja keskiarvoja. Vertailupalan 3 mittaustulokset ovat puolestaan mittarin näytöltä luettuna saanut arvoja lähes kappaleen kovuuden luokasta, kun taas kalibrointikorjattu arvo on laskenut hieman testipinnan kovuuden alapuolelle.

Tarkimmat tuloksen anturilla 2 saatiin kalibroitaessa mittausväline vertailupalalla 2, jolla korjausta arvoon ei ole tarvinnut tehdä, ja jonka keskiarvolliset tulokset ovat lähellä oikeaa kovuusarvoa. Vertailupala 3 ja kalibrointipala 344 HV5 korjaavat mittaustulostaan

kalibrointien kautta lähes yhtä paljon, vertailupalan keskiarvot laskevat, kun puolestaan kalibrointipalan arvot nousevat. Kaksi pehmeintä kalibrointipalaa, 1495 HV5 ja 239,3 HV5 eivät anturin 2 mittauksissa tuottaneet luotettavia tuloksia.

Pöytäkovuusmittaustulokset puolestaan kappaleen ulkopinnalta suuremmalla koevoimalla saivat pyöristettyinä arvoja väliltä 223 - 232 HV10, keskiarvon ollessa 227,8 HV10. Kuvan 23 käyrät havainnollistavat anturin mittauksia ja ovat mittarin näytöltä luettuja arvoja. Mittausten hajonnat myös putken ulkopinnalta ovat suhteellisen matalat, pois lukien kalibrointipalan 344 HV5. Mittausten keskiarvot ja kalibrointikorjatut arvot ovat nähtävillä taulukossa 19.



Kuva 23. Mittaukset X10CrMoVNb9-1, 227,8 HV10; anturi 2.

Mittarin näytöltä luetut keskiarvot vaihtelivat mittausten kesken arvojen 241 - 280 HV10 välillä, kun korjattujen arvojen keskiarvot olivat väliltä 253 - 279 HV10. Mittarin antaman arvon ja kalibrointikorjatun arvon välillä ero on pienin kalibrointipalalla 344 HV5, vain muutaman yksikön luokkaa. Muiden kalibrointien korjatun arvon ja mittarin lukeman välille tulee 8 HV10:stä eroa ylöspäin. Arvojen välinen erotus ei ole riippuvaista mittarin soveltumattomuudesta kyseisiin mittauksiin, vaan mittaajan kokemattomuuden tulosta, joka aiheuttaa epävarmuutta mittaushetkellä mittaustilanteeseen.

Keskiarvollinen kovuus pöytäkovuusmittarilla kappaleelle oli 227,8 HV10. Kalibrointikorjattuja arvoja tarkastellessa kaikkien mittaustulosten keskiarvo on selkeästi tämän saadun kovuuden päälle. Lähimmäksi on päästy kalibrointipalalla 344 HV5, jonka mittaustulokset poikkeavat keskiarvosta noin 25 HV10. Toinen mittaussarja vertailupalalla 2 ylittää myös samaiseen eroavaisuuteen. Muiden mittausten keskiarvot nousevat lähes aina selkeästi tämän päälle.

Taulukko 19. Mittarin antama ja kalibrointikorjattu keskiarvo sekä keskihajonta. Anturi 2; ulkopinta..

Anturi 2

Ulkopinta 227,8 HV10		Kalibrointi				
		Kalibrointi- pala	Kalibrointi- pala	Kalibrointi- pala	Vertailu- pala 3.	Vertailupala 2.
Mit- taus		149,5 HV5	239,3 HV5	344 HV5	219 HV5	236 HV5
1.-5.	Mittarin ka.	270 HV10	279 HV10	245 HV10	252 HV10	247 HV10
	Korjattu ka.	279 HV10	276 HV10	253 HV10	266 HV10	264 HV10
	SD	(±4,0)	(±4,8)	(±7,8)	(±1,3)	(±3,7)
6.-10.	Mittarin ka.	266 HV10	280 HV10	247 HV10	247 HV10	241 HV10
	Korjattu ka.	275 HV10	277 HV10	254 HV10	256 HV10	253 HV10
	SD	(±2,1)	(±4,2)	(±10,1)	(±1,4)	(±3,0)

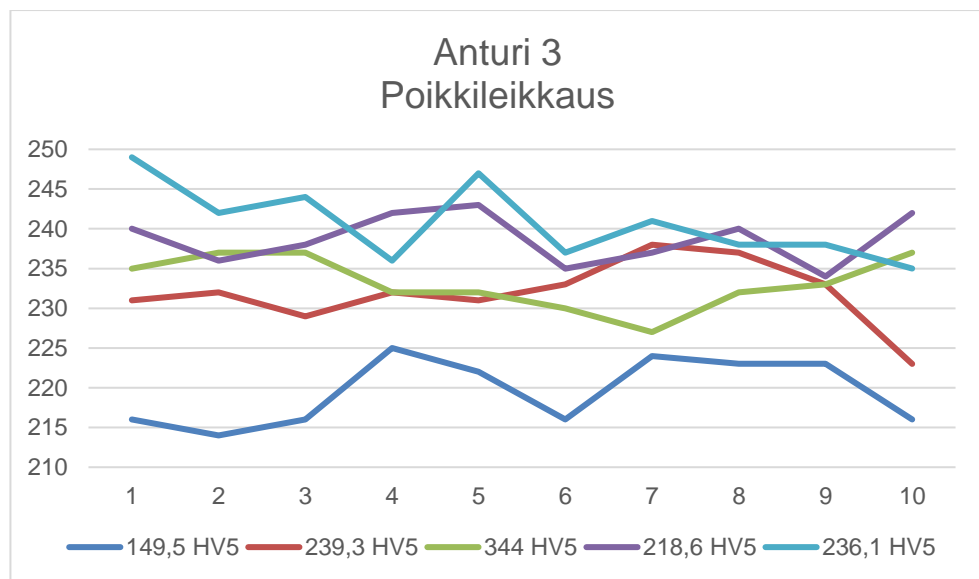
Ulkopinnan mittauksessa testikappaleen kovuutta lähimmäksi on päästy kalibroinnilla 344 HV5, jonka keskiarvollinen tulos on lähimpänä kappaleen pöytäkovuutta sekä korjatun arvon ero mittarin näyttämään on pienin. Selkeästi poikkeavimmat tulokset on saatu kahdella pehmeämmällä kalibrointipalalla 149,5 HV5 ja 239,3 HV5. Sama vaikutus oli nähtävissä myös poikkileikkauspinnan mittauksissa. Anturilla 2 saadut mittaustulokset kappaleen ulkopinnalta poikkeavat selkeästi testikappaleen pöytäkovuudesta, joten tulosten tarkempaa tarkastelua ei kannata suorittaa.

Luotettavampia tuloksia halutessa, olisi kalibrointipalojen oltava myös kalibroitu asteikolla HV10, kun mittauksen suoritetaan 98N:n anturilla. Suuri testivoima aiheuttaa kappaleeseen mittauksen suuntaan kohdistuvan voiman, joka voi pienellä kappaleella aiheuttaa kappaleen liikettä mittauksen aikana.

Selkeitä eroja ei ole anturilla 2 nähtävissä kalibroinneissa, ja kuitenkin ulkopinnalta saadut mittaustulokset heittävät pöytäkoneella saadusta arvosta lähes kaikilla kalibroinneilla. Anturilla 2 mittaaminen on selkeästi raskaampaa, ja pientä kappaletta sekä kaarevaa pintaa mitatessa on kokemattoman mittajaan epätasainen voimallisäys mittauksen aikana vaikuttanut tulokseen raskaammalla anturilla. Mittausjärjestystä ei kirjattu ylös, mutta käden väsyminen mitatessa vaikeuttaa anturilla mittaamista huomattavasti.

11.2.3 Anturi 3

Kuvan 24 käyrät havainnollistavat mittaustuloksia anturilla 3 putken poikkileikkauspinnalta. Käyrät pohjautuvat mittarin näyttämään. Mittausten mittarin näyttämän keskiarvot sekä kalibrintikorjatut keskiarvot ovat nähtävillä taulukosta 20. Anturin 3 kohdalla putken kovuuksia tarkastellaan taas pienemmällä koevoimalla. Anturin 3 kalibrointi ja kalibrintivertailutulokset ovat liitteessä 13 ja mittaustulokset ovat nähtävillä liitteessä 14.



Kuva 24. Mittaukset X10CrMoVNb9-1, 236,2 HV5; anturi 3.

Pöytäkovuusmittauksissa poikkileikkauksen kovuudeksi saatiin keskiarvallisesti 236,2 HV5, mittaustulosten vaihdellessa välillä 233 - 239 HV5. Mittaukset ovat onnistuneet, ja kaikkien mittausten hajonta on jäänyt matalaksi, alle ± 5 HV5. Mittarin näytöltä anturilla 3 on saatu mittaustuloksia kalibrointien välillä arvosta 219 HV5 arvoon 244 HV5. Korjatut arvot puolestaan vaihtelevat kalibrointien kesken välillä 231 - 248 HV5.

Mittarin näyttämän ja korjatun arvon erotus oli alle viisi yksikköä suuntaansa kaikilla muilla vertailtavista kalibrointipaloista, paitsi kalibrointipalalla 149,5 HV5. Kalibrointipalojen 239,3 HV5 ja 344 HV5 kohdalla erotus on pienin, vain muutaman yksikön. Kalibrointimateriaalin ollessa pehmeämpi kuin itse mitattava kohde (149,5HV5), on tulosten perusteella aiheutunut suurempi korjaus korjattuun arvoon kuin muilla kalibroinneilla. Näin kuuluukin olla kalibrointipalan 149,5 HV5 kohdalla, koska kalibrointimateriaalin kovuus eroaa selkeästi testikappaleen kovuudesta.

Taulukko 20. Mittarin antama ja kalibrointikorjattu keskiarvo sekä keskihajonta. Anturi 3; poikkileikkaus.

Anturi 3

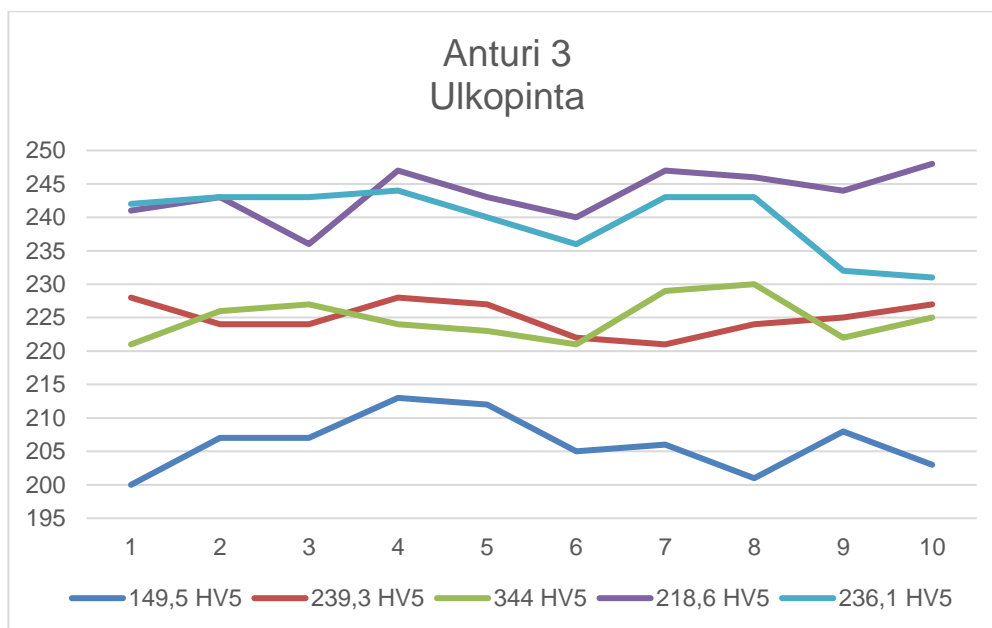
Poikkileikkaus 236,2 HV5		Kalibrointi				
		Kalibrointi- pala 149,5 HV5	Kalibrointi- pala 239,3 HV5	Kalibrointi- pala 344 HV5	Vertailupala 3 219 HV5	Vertailupala 2 236 HV5
1.-5.	Mittarin ka.	219 HV5	231 HV5	235 HV5	240 HV5	244 HV5
	Korjattu ka.	232 HV5	233 HV5	234 HV5	236 HV5	248 HV5
	SD	(± 4,2)	(± 1,1)	(± 2,2)	(± 2,6)	(± 4,5)
6.-10.	Mittarin ka.	220 HV5	233 HV5	232 HV5	238 HV5	238 HV5
	Korjattu ka.	234 HV5	236 HV5	231 HV5	235 HV5	240 HV5
	SD	(± 3,6)	(± 5,3)	(± 3,3)	(± 3,0)	(± 1,9)

Lähimmäksi pöytäkovuusmittarilla saatua kovuutta 236,2 HV5 on päästy suhteellisen tasaisesti kalibrointipaloilla 239,3 HV5 ja 344 HV5 sekä vertailupalalla 3, joiden tulokset eroavat vain hieman saadusta pöytäkovuudesta. Vertailupalalla 2 saadut mittaustulokset ovat hieman kovuudellisesti yläkanttiin, kun suuren korjauksen kautta kalibroinnilla 149,5 HV5 on päästy muutaman yksikön alle kappaleen saatua keskiarvollista kovuutta.

Anturilla 3 voisi todeta, että tarkin kalibrointi kyseiseen mittaukseen olisi kalibroida mittarit joko lähes samalla kovuudella kuin itse testattava kappale, tai testattavaa kappaletta kovemmalla kalibrointipalalla. Kalibrointimateriaalin vaikutuksesta ei ole näyttöä, vaan tulokset ovat tasaiset verrattaessa vertailupaloja kalibrointipalojen 239,3 HV5 ja 344 HV5

tuloksiin. Vertailupalloilla 2 ja 3 on saatu hieman keskiarvillisesti korkeampia kalibroitukorjattuja keskiarvoja. Matalampi kalibroitukovuus tuotti keskiarvillisesti hyviä tuloksia, mutta kalibroitien kautta tulokseen pääsy vaati suurta kalibroitukorjausta.

Kuvassa 25 on esillä mittaustulosten hajonta anturilla 3 kappaleen ulkopinnalle suorite-
tuissa mittauksissa. Taulukossa 21 on nähtävillä mittausten mittarin näyttämän keskiar-
vot, kalibroitukorjatut keskiarvot sekä mittausten keskihajonta.



Kuva 25. Mittaukset X10CrMoVNb9-1 230,0, HV5; anturi 3.

Pöytäkovuusmittarilla putken ulkopinnalta saatiin kovuuksia väliltä 227 - 233 HV5. Tulosten hajonnat jatkavat samaa linjaa ja ovat myös näissä mittauksissa pieniä. Mittarin näytöltä tuloksia saatiin väliltä 205 - 245 HV5 kaikkien viiden kalibroitukappaleen kesken. Korjatut arvot puolestaan vaihtelivat 217 - 240 HV5:n välillä anturilla 3 mittausten kesken.

Ulkopinnan keskiarvoinen kovuus pöytäkovuusmittauksessa oli 230,0 HV5. Lähimmäksi tätä pöytäkovuusmittarilla saatua kovuutta keskiarvillisesti on päästy kalibroimalla mittari kalibroitupalalla 239,3 HV5. Lähes yhtä lähelle on päästy vertailupalalla 2 ja kalibroitupalalla 344 HV5. Kovuudellisesti pöytäkovuutta alempia tuloksia on saatu kalibroitupalalla 149,5 HV ja hieman testikappaletta pehmeämmällä kalibroitukappaleella,

vertailupalalla 3 on kalibrointikorjattu tulos noussut hieman kappaleen kovuuden yläpuolelle.

Taulukko 21. Mittarin antama ja kalibrointikorjattu keskiarvo sekä keskihajonta. Anturi 3; ulkopinta.

Anturi 3. Ulkopinta 230,0 HV5		Kalibrointi				
		Kalibrointi- pala	Kalibrointi- pala	Kalibrointi- pala	Vertailupala 3	Vertailupala 2
Mittaus		149,5 HV5	239,3 HV5	344 HV5	219 HV5	236 HV5
1.-5.	Mittarin ka.	208 HV5	226 HV5	224 HV5	242 HV5	229 HV5
	Korjattu ka.	220 HV5	228 HV5	223 HV5	238 HV5	228 HV5
	SD	(± 4,6)	(± 1,8)	(± 2,1)	(± 3,6)	(± 1,9)
6.-10.	Mittarin ka.	205 HV5	224 HV5	225 HV5	245 HV5	225 HV5
	Korjattu ka.	217 HV5	225 HV5	224 HV5	240 HV5	223 HV5
	SD	(± 2,4)	(± 2,1)	(± 3,6)	(± 2,8)	(± 5,5)

Korjatun arvon eroavaisuutta mittarin näyttämään verrattaessa on selvästi suurin arvo pehmeimmällä kalibrointipalalla. Kyseisen kalibroinnin mittaustulokset ovat jääneet myös alakanttiin. Kalibrointikorjausta kuuluukin kalibrointikappaleella tapahtua, koska kalibrointimateriaalin kovuus eroaa testikappaleen kovuudesta. Vertailupalan 3 kohdalla mittarin näyttämää on hieman laskettu kalibrointien kautta, kun puolestaan toisen, vertailupalan 2 kohdalla anturin näyttämä ja korjattu arvo ovat lähes samankaltaiset. Tämä enteilee myös kohtalaisen hyvää kalibrointia, koska vertailupalan 3 ja 2 kovuudet eivät eroa huomattavasti testikappaleen kovuudesta. Vertailtaessa kalibrointeja, anturilla 3 luotettavimpia tuloksia antoi vertailupalan 2 lisäksi kalibrointipalat 239,3 HV5 ja 344 HV5.

12 Pohdinta

Työssä pyrittiin selvittämään kalibrointikovuuden vaikutusta saatuihin mittaustuloksiin vertailupalojen mittausten avulla. Kalibrointikovuuksia vertailupalojen mittauksissa oli 3, joiden mittauksia vertailtiin. Kevyemmällä anturilla, 49 N:lla mitatessa vertailupalaa 2 antureilla 1 ja 3 ei ole havaittavissa selkeitä eroja kalibrointien välillä. Mittaustulosten perusteella on järkevämpi valita kalibrointipalan kovuus läheltä testikappaleen kovuutta tai

testikappaleen kovuuden yläpuolelta. Pehmeämmällä kalibrintimateriaalilla kalibrintikorjaus on suurinta, ja tämä voi vaikuttaa tulosten luotettavuuteen. Anturin 2 kohdalla, 98 N:n testivoimalla on havaittavissa sama vaikutus.

Vertailupalan 3 kohdalla ei kalibrintien kautta saatujen tulosten välillä ole suuria eroja. Kaikki kalibrintipalat ovat tuottaneet lähes samankaltaisia tuloksia vertailupalan 3 kohdalla, kun verrataan yhtä anturia ja tämän kalibrointeja. Anturilla 2 on huomattavissa kuitenkin selkeästi korkeammat kalibrintikorjatut kovuusarvot kuin kevyemmällä testivoimalla, antureilla 1 ja 3.

Vertailupaloja tarkasteltiin mittauksien aikana myös siltä näkökannalta, voisiko vertailupalasarja toimia kalibroinnissa kalibrintikappaleina. Vertailupalasarjan kappaleista yksi, vertailupala 1 jätettiin kenttäkovuusmittausten perusteella saatujen suurien keskihajontojen takia pois kalibrintikappaleiden listalta. Suuren keskihajonnan, sekä suurten mitaustulosten vaihteluiden takia voidaan todeta, ettei vertailupalalla 1 voi kalibroida kenttäkovuusmittareita luotettavasti. Pöytäkovuusmittarilla saatujen kovuusarvojen perusteella vertailupalojen 2 ja 3 tulosten minimi- ja maksimiarvot antavat kappaleelle liian suuren kovuudellisen erotuksen, joten luotettavaa kalibrintipalaa ei vertailupalasarjasta ole mahdollista saada. X10CrMoVNb9-1-putken mittauksissa kalibrinti tehtiin sertifioidujen kalibrintipalojen lisäksi myös aiemmin mittauksen kohteena olleilla vertailupalasarjan kappaleilla.

Anturilla 1 ei ole selkeitä eroja havaittavissa kalibrintien välillä poikkileikkauspinnalta, mutta kappaleen ulkopinnalta saatujen mittauksien perusteella kalibrintipalalla 149,5 HV5 on saatu tuloksista liian pieniä, kun taas vertailupalan 3 kohdalla tuloksia ei kannata lähteä tulkitsemaan. Anturilla 2 on tulosten perusteella poikkileikkauksesta epätarkimmat tulokset saatu kalibrintipaloilla 149,5 HV5 ja 239,3 HV5. Kun kalibrintimateriaali on samaa kuin itse testattava materiaali, eli kalibroinneilla vertailupala 2 ja 3 ovat tulokset osuneet lähes kappaleen oikeaan kovuuteen. Myös kalibrintipalan 344 HV5 kohdalla tulokset osuvat lähelle kappaleen pöytäkovuutta. Anturin 2 ulkopinnalta saatuja mittaus tuloksia on vaikea tulkita, koska kaareva pinta ja suuri testivoima on aiheuttanut kokeemattoman mittaajan käsissä liian suuri tuloksia.

Anturin 3 kohdalla on samoja havaintoja tehtävissä kuin anturilla 1. Liian pehmeä, 149,5 HV5:n kalibrintimateriaali aiheuttaa tuloksiin suuremman kalibrintikorjauksen ja tulosten jäämisen alakanttiin. Muiden neljän kalibroinnin kohdalla selkeitä eroja mittaustulosten keskiarvoissa ei ole havaittavissa.

Mittausten aikana ensimmäiseen ongelmaan törmättiin jo työn alussa, kun mittauksen kohteena oli vertailupala 1 kovuudella 404,7 HV5, joka oli kauttaaltaan vaihtelevan kovuinen. Kappaleen ulkokehällä oli selkeästi kovempaa kuin kappaleen keskellä. Myös alueellisia kovuseroja on selkeästi havaittavissa pitkin kiekkoa. Tämä kappale on todennäköisesti epäonnistuneesta lämpökäsittelyerästä.

Kaiken kaikkiaan on huomioitava kokemattoman mittaajan vaikutus mittaustuloksissa. Rutiinia mittauksen suorittamiseen ei löydy, vaan jokainen mittaus oli lisäharjoitusta mittausten tekemiselle kenttäkovuusmittareilla. Kenttäkovuusmittareilla mittaaminen ei saa ylittää ± 5 astetta suorastakulmasta kappaleen pintaan nähden, mikä kokemattomalla mittaajalla voi olla alussa haastavaa havaita. Osassa mittauksista on havaittavissa selkeitä keskihajonnan muutoksia, jotka eivät ole riippuvaisia itse testikappaleesta, vaan mittaajan kädenjälki ei ole harjaantunut mittausten ja harjoitusten aikana tarpeeksi. Lisäksi useat mittaukset päivässä voivat vaikuttaa kenttäkovuusmittareilla saatuihin tuloksiin. 49 N:n ja 98 N:n antureilla useita mittauksia suoritettuaan alkaa väsyminen vaikuttaa mittausten suoritukseen. Pienemmällä testivoimalla tämä ei ole niin selkeästi havaittavissa, mutta suuremmalla testivoimalla oli vaikea mitata pidempiä sarjoja, vartalolla oli pakko tukea mittausta, jolloin mittaus hieman kevenee.

Lähteet

- 1 Kiwa, Shield Group and Inspecta united in the worldwide TIC market. 2015. Verkkoaineisto. NPM Capital. <<https://www.npm-capital.com/en/news/kiwa-shield-group-and-inspecta-united-worldwide-tic-market>>. Luettu 10.12.2018.
- 2 Valtion laitoksesta kansainväliseksi moniosaajaksi – Inspectasta tulee tänään Kiwa Inspecta. Verkkoaineisto. 2017. <<http://www.projektiiutiset.fi/valtioon-laitoksesta-kansainvaliseksi-moniosaajaksi-inspectasta-tulee-tanaan-kiwa-inspecta/>>. Luettu 29.11.2018.
- 3 Historia. Verkkoaineisto. Kiwa Inspecta. <<https://www.inspecta.fi/Yritys/Historia>>. Luettu 16.2.2019.
- 4 Kansainvälistyvistä Inspectasta Kiwa Inspecta. 2017. Verkkoaineisto. Promaint. <<https://promaintlehti.fi/Turvallisuus-ja-ymparisto/Kansainvalistyvasta-Inspectasta-Kiwa-Inspecta>>. 7.9.2017. Luettu 25.2.2019.
- 5 Kuva 1: Kiwa-logo <https://promaintlehti.fi/var/ezwebin_site/storage/images/media/images/kiwa-logo/24663-1-fin-FI/kiwa-logo_contentwidth.png> 25.02.2019
- 6 Kuva 1: Inspecta logo <https://www.inspecta.com/> 25.2.2019
- 7 Visio, strategia ja arvot. Verkkoaineisto. Kiwa Inspecta. <<https://www.inspecta.fi/Yritys/Visio-ja-strategia/>> Luettu 8.4.2019.
- 8 Tarkastus ja varmennus. Verkkoaineisto. Kiwa Inspecta <<https://www.inspecta.fi/Palvelut/Tarkastus-varmennus/>> 8.4.2019.
- 9 NDT-tarkastus. Verkkoaineisto. Kiwa Inspecta <<https://www.inspecta.fi/Palvelut/ndt-tarkastus/NDT-sovelluskuvaukset/>>. Luettu 8.4.2019.
- 10 Teknologiapalvelut. Verkkoaineisto. Kiwa Inspecta. <<https://www.inspecta.fi/Palvelut/Teknologiapalvelut/>>. Luettu 8.4.2019.
- 11 Kiinteistö- ja taitorakennetutkimukset, suunnittelu ja rakennuttaminen. Verkkoaineisto. Kiwa Inspecta <<https://www.inspecta.fi/Palvelut/Kiinteisto-taitorakennetutkimukset-suunnittelu-rakennuttaminen/>> Luettu 8.4.2019.
- 12 Inspecta yhdistyy ACTA*n kanssa. 2015. Verkkoaineisto. Kiwa Inspecta. <<https://www.inspecta.fi/Tiedotus/Uutishuone/uutiset/2015/inspecta-yhdistyy-acta-n-kanssa/>>. Luettu 29.12.2018.

- 13 Tietoa Kiwasta. Verkkoaineisto. Kiwa Inspecta. <<https://www.kiwa.com/fi/fi/tietoa-kiwasta/>> Luettu 12.1.2019
- 14 Kovuusmittaus. Verkkoaineisto. Materiaalitutkimuskeskus. <<https://www.materia-keskus.fi/tutkimuspalvelut/metallit/menetelmat/kovuusmittaus/>>. Luettu 14.1.2019.
- 15 Frank, Stefan. Portable hardness testing – Principles and applications. 2002. Verkkoaineisto. <<https://www.ndt.net/article/ecndt02/109/109.htm>>. Lokakuu 2002. Luettu 14.1.2019.
- 16 Boyer, Howard E. 1987. Hardness Testing. Yhdysvallat: ASM International. s.3
- 17 Frank, Stefan. 2001. Kääntäjä Packalen, Tapani. 2001 Kannettavat Kovuusmittarit, Krautkramer sovellusohje. Sonar Oy.
- 18 Sorsa, Jouni. 2015. Materiaalitekniikka. Helsinki: Sanoma Pro Oy. s.56-57
- 19 Jiles, David C. 2008. Principles of Materials Evaluation. Yhdysvallat: CRC Press. s.23, s.54
- 20 Chandler, Harry. 1999. Hardness Testing Second Edition. Yhdysvallat: ASM International. s.2-3
- 21 Chandler, Harry. 1998. Metallurgy for the Non-Metallurgist. Yhdysvallat: ASM International. s. 37, s. 156
- 22 Materials and Hardness Testing – The Importance of its Applications. 2018. Verkkoaineisto. Buehler. <<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=15122>> Luettu 11.12.2018. s. 1-2
- 23 Czarski A. 2009. Comparative analysis of methods of hardness assessment. Archives of Materials Science and Engineering. Archives of Materials Science and Engineering. (Volume 40, Issue 2) 01.12.2009. s.94-97.
- 24 SFS-EN ISO 18265. Metallien kovuusarvojen muuntaminen. 2014. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.
- 25 Hardness Test. Verkkoaineisto. <<http://me.aut.ac.ir/staff/solidmechanics/alizadeh/Hardness%20Test.htm>>. Luettu 8.3.2019.

- 26 An Informed Perspective on the Use of Hardness Testing in an Integrated Approach to the Life Management of Grade 91 Steel Components. 2016. Verkkoaineisto. EPRI <<https://www.epri.com/#/pages/product/3002007320/?lang=en-US>> Luettu 18.2.2019. s.2-3
- 27 Frehner, C ym. 2017. Advancements of ultrasonic contact impedance (UCI) hardness testing based on continuous load monitoring during the indentation process, and practical benefits. Verkkoaineisto. <https://www.ndt.net/events/APCNDT2017/app/content/Paper/272_Frehner.pdf>. Luettu 7.1.2019
- 28 Frank, Stefan. Mobile Hardness, Application Guide for Hardness Testers. GE Inspection Technologies.
- 29 FAQ's – Hardness Testing. Verkkoaineisto. Instrumart. <<https://www.instrumart.com/assets/GEIT-HardnessTesterFAQ.pdf>>. Luettu 17.2.2019.
- 30 Kuva 3: Mittakärkien painaumat. <<https://www.bergeng.com/mm5/downloads/kb/hardnessappguide.pdf>> 25.3.2019
- 31 Kuva 4: Vickers-mittakärjen painaumat. <<http://me.aut.ac.ir/staff/solidmechanics/alizadeh/Hardness%20Test.htm>> 25.2.19
- 32 Yovanovich, M. 2006. Micro and Macro Hardness Measurements, Correlations, and Contact Models. <https://www.researchgate.net/publication/239767004_Micro_and_Macro_Hardness_Measurements_Correlations_and_Contact_Models>. Luettu 19.3.2019.
- 33 Mihalikoivá ym. 2011. Using the videoextensometry and UCI-hardness for monitoring of automotive steel sheets. Verkkoaineisto. <<http://fstroj.uniza.sk/journal-mi/PDF/2011/16-2011.pdf>>. 1.9.2011. Luettu 14.12.2018
- 34 Kuva 6: UCI-mittakärki. <<https://www.slideshare.net/Proceq/advancements-of-ultrasonic-contact-impedance-uci-hardness-testing-based-on-continuous-load-monitoring-during-the-indentation-process-and-practical-benefits>> 25.2.2019
- 35 Kuva 6: Taajuuden muutos mittauksen aikana. <<https://www.slideshare.net/Proceq/advancements-of-ultrasonic-contact-impedance-uci-hardness-testing-based-on-continuous-load-monitoring-during-the-indentation-process-and-practical-benefits>> 25.2.2019
- 36 Tekniikan taulukkokirja. Verkkolähde. <https://www.genesiskirjat.fi/userData/genesis-kirjat-sa15/pdf-ttk/TTK_fysiikka_taulukko.pdf>. Luettu 30.1.2019.

- 37 Oliver, W.C, Pharr, G.M. 2003. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology. Journal of Material Research. Volume 19 Issue 1. 01/2004. s. 3-20.
- 38 Guidelines on the Estimation of Uncertainty in Hardness Measurements, EURAMET cg-16. 2011. European Association of National Metrology Institutes. Kalibrointi ohje. Versio 2. 03/2011.
- 39 Krautkramer MIC 10. GE Inspection Technologies. Käyttöohje.
- 40 A1038 – 05. Standard Practice for Portable Hardness Testing by the Ultrasonic Contact Impedance Method. 2005. Yhdysvallat: ASTM International.
- 41 Portable Hardness Testing Leeb, Portable Rockwell and UCI. Proceq. Käyttöohje.
- 42 SonoDur2. NewSonic. Käyttöohje.
- 43 Acuren. Verkkolähde. Hardness testing..<<https://www.acuren.com/engineering/field-engineering/hardness-testing/>> Luettu 22.3.2019.
- 44 Morris, A. ym. 2018. The role of hardness on condition monitoring and lifing for high temperature power plant structural risk management. Measurement. Volume 131. 01/2019. s.501 - 512.
- 45 Łomozika, M. 2015. Effect of welding thermal cycles on the structure and properties of simulated heat-affected zone areas in X10CrMoVNb9-1 (T91) steel at a state after 100,000 h of operation. Material Science & Engineering: A. Volume 637. 06/2015. s.82-88.
- 46 Santaa, J. 2002. Kaikki mittauslaitteet mittaavat väärin, kalibrointi. Maankäyttö 01/2002. s.21-25.
- 47 Mitä on kalibrointi. 05/2019 Kiwa Inspecta. Youtube-video. <<https://www.youtube.com/watch?v=AqOIScnSJ-8>>
- 48 Kärhä P. 2004. Mittausjärjestelmän kalibrointi ja mittausepävarmuus. Luento 7. <<https://docplayer.fi/18754337-Mittausjarjestelman-kalibrointi-ja-mittausepavarmuus.html>> 9.3.2019
- 49 Miksi kalibrointia tehdään. 05/2019. Kiwa Inspecta. Youtube-video. <<https://www.youtube.com/watch?v=uV47odrZLFo>> 5.7.2019

- 50 Sanders, W. 10/2017. What is Optical Emission Spectroscopy (OES). Hitachi High-Tech Analytical Science. Verkkoaineisto <[https://hha.hitachi-hightech.com/en/blogs-events/blogs/2017/10/25/optical-emission-spectroscopy-\(oes\)/](https://hha.hitachi-hightech.com/en/blogs-events/blogs/2017/10/25/optical-emission-spectroscopy-(oes)/)> Luettu 2.2.2019
- 51 SFS-EN ISO 4957, Työkaluteräkset. 2018. 2. painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.
- 52 D. Jablons, J. 04/2016. What is Lapping? Metal Cutting Corporation. Verkkoaineisto. <<https://metalcutting.com/what-is-lapping/>> Luettu 21.03.2019
- 53 Lehtinen, Tiia. 2012. Kenttäkovuusmittauksen kalibrointipalasarja. Insinööriyö. Mikkelin Ammattikorkeakoulu.

Käytettävät laitteet

Liitteessä 1. on esillä tarkemmat tiedot käytetyistä laitteista.

Laboratorio- kovuusmittari		OES		Anturi 1 ja anturi 2		Anturi 3	
Valmistaja:	Struers	Valmistaja:	Hitachi	Valmistaja:	GE Inspection Technologies	Valmistaja:	NewSonic
Malli:	Dura-Scan	Malli:	Foundry-Master Optimum	Malli:	Krautkramer MIC 10	Malli:	SonoDur 2
Tod. nro:	VTT-K-00067-18	Tod. nro:		Edellinen kalibrointi:		Edellinen kalibrointi:	
Edellinen kalibrointi:	9.2.2018	Edellinen kalibrointi:	Kesäkuu 2018 *	Käytetty mittapää:	49 N, 98 N	Käytetty mittapää:	49 N
Sopivuus:	HV1, HV5, HV10 HBW 2,5/62,5	Kunnossapito:	Kesäkuu 2018 **	Mittauslämpötila:	-15 °C - + 55 °C *** 0 °C - + 40 °C ****	Mittauslämpötila:	-10 °C - + 50 °C *** 0 °C - + 50 °C ****
Kalibrointikiekot:	HV10 133 HV10 424,8			Mittausalue:	20 - 1740 HV	Mittausalue:	

* Kalibrointi DIN 10012 mukaan

** Kunnossapito DIN 31051 mukaan

*** Mittari

**** Mittari ja anturi

Mittauksissa käytettävät kalibrointikovuudet

Liitteessä 2. on esillä kalibroinneissa käytettävät kalibrointikovuudet. Kalibrointipaloilla 149,5 HV5, 239,3 HV5 ja 344 HV5 on taulukon arvot saatu kalibrointipalan kalibrointitodistuksesta. Vertailupalojen 218,6 HV5 ja 236,1 HV5 kohdalla minimi ja maksimiarvot sekä keskihajonta saatu validoinnin kautta.

Taulukko 22. Kalibroinneissa käytettävien kappaleiden tiedot.

	Kalibrointipala				
	149,5 HV5	239,3 HV5	344 HV5	218,6 HV5	236,1 HV5
Keskiarvo					
Keskihajonta	± 0,75 HV5	± 1,20 HV5	± 1,72 HV5	± 2,4 HV5	± 3,3 HV5
Minimiarvo	148,0 HV5	238,4 HV5	343,1 HV5	214 HV5	229 HV5
Maksimiarvo	150,8 HV5	240,9 HV5	346,3 HV5	223 HV5	243 HV5
Kalibrointi/validointi päivä	24.8.2017	31.3.2017	6.7.2017	1.3.2019	1.3.2019

Eri ferriittiset teräkset. Kalibrointipala 149,5 HV5; kalibrointi

Liitteessä 3. on nähtävillä kalibrointi-arvot, vertailumittausarvot ja mittaustulokset, kun kenttäkovuusmittarit on kalibroitu kalibrointipalalla 149,5 HV5. Liitteissä näkyvä, tuloksissa esiintyvä korjattu arvo on saatu kalibroimalla mittari kalibrointipalalla, jonka jälkeen varsinaiset mittaukset on suoritettu. Tämän jälkeen kenttäkovuusmittarilla mitataan vertailuksi vielä toista kalibrointipalaa ilman, että mittariin tehdään muutoksia. Tämän jälkeen kalibrointitulokset ja vertailukappaleen tulokset on laitettu kenttäkovuusmittauspöytäkirjaan, joka tulosten perusteella laskee ”korjauskäyrän”, joka ottaa huomioon kalibroinnissa aiheutuneet heitot sekä vertailukappaleen mittausten heitot. Kalibroinnin ja vertailumittauksen avulla saadaan mittaustuloksille ns. korjattu arvo.

Taulukko 23. Kalibrointi-arvot

Mittari ja anturi	Kalibrointitulokset	Keskiarvo	Hajonta	Cal.nro
Anturi 1.	148, 152, 152, 155, 155	152	2,6	492
Anturi 2.	148, 150, 150, 151, 148	149	1,2	401
Anturi 3.	146, 155, 149, 151, 149	150	3,0	-33

Taulukko 24. Vertailumittausarvot

Mittari ja anturi	Vertailutulokset	Keskiarvo	Hajonta	Millä mitattu
Anturi 1.	231, 232, 236, 230, 236	233	2,5	239,3
Anturi 2.	226, 230, 234, 239, 239, 233	234	4,6	239,3
Anturi 3.	228, 224, 225, 230, 227, 223	226	2,4	239,3

Eri ferriittiset teräkset. Kalibrointipala 149,5 HV5; mittaukset

Liitteessä 4. on nähtävillä mittarin näytöltä luetut mittaustulokset, keskiarvo, mittausten hajonta sekä mittausten korjattu keskiarvo.

Taulukko 25. Mittaustulokset

Mittari ja anturi	Mitattu kappale	Mittaus	Mittaustulokset	Keskiarvo	Hajonta	Korjattu arvo
Anturi 1.	X10CrMoVNb9-1 219 HV5	1.	209, 216, 220, 218, 223	217	4,7	222
		2.	219, 215, 215, 218, 226	219	4,0	223
	X10CrMoVNb9-1 236 HV5	1.	237, 231, 234, 230, 225	231	4,0	238
		2.	232, 234, 230, 233, 226	231	2,8	237
	X10CrMoVNb9-1 405 HV5	1.	379, 394, 432, 432, 423	412	21,6	439
		2.	406, 407, 420, 426, 420	416	7,9	443
Anturi 2.	X10CrMoVNb9-1 219 HV5	1.	225, 224, 231, 236, 236	230	5,2	236
		2.	220, 224, 225, 231, 233	227	4,8	232
	X10CrMoVNb9-1 236 HV5	1.	235, 230, 237, 242, 244	239	3,3	245
		2.	242, 250, 248, 242, 235	243	5,3	250
	X10CrMoVNb9-1 405 HV5	1.	391, 417, 437, 445, 456	429	23,0	448
		2.	402, 411, 439, 447, 450	430	19,6	449
Anturi 3.	X10CrMoVNb9-1 219 HV5	1.	195, 205, 210, 207, 209	205	5,4	215
		2.	200, 210, 206, 201, 189	201	7,1	210
	X10CrMoVNb9-1 236 HV5	1.	208, 215, 215, 221, 223	216	5,3	228
		2.	219, 222, 224, 214, 228	221	4,7	234
	X10CrMoVNb9-1 405 HV5	1.	316, 359, 365, 377, 372	358	21,8	394
		2.	353, 365, 356, 349, 356	356	5,3	392

Eri ferriittiset teräkset. Kalibrointipala 239,3 HV5; kalibrointi

Liitteessä 5. on nähtävillä kalibrointiarvot, vertailumittausarvot ja mittaustulokset, kun kenttäkovuusmittarit on kalibroitu kalibrointipalalla 239,3 HV5.

Taulukko 26. Kalibrointiarvot

Mittari ja anturi	Kalibrointitulokset	Keskiarvo	Hajonta	Cal.nro
Anturi 1.	232, 240, 242, 245, 249	242	5,7	586
Anturi 2.	228, 235, 240, 241, 239	237	4,8	479
Anturi 3.	229, 226, 234, 224, 224	227	3,8	296

Taulukko 27. Vertailumittausarvot

Mittari ja anturi	Vertailutulokset	Keskiarvo	Hajonta	Millä mitattu
Anturi 1.	153, 158, 166, 160, 162	160	4,3	149,5
Anturi 2.	147, 154, 156, 156, 156, 147	153	4,1	149,5
Anturi 3.	159, 161, 161, 162, 165, 156	161	2,7	149,5

Eri ferriittiset teräkset. Kalibrointipala 239,3 HV5; mittaukset

Liitteessä 6. on nähtävillä mittarin näytöltä luetut mittaustulokset, keskiarvo, mittausten hajonta sekä mittausten korjattu keskiarvo.

Taulukko 28. Mittaustulokset

Mittari ja anturi	Mitattu kappale	Mittaus	Mittaustulokset	Keskiarvo	Hajonta	Korjattu arvo
Anturi 1.	X10CrMoVNb9-1	1.	208, 218, 220, 222, 229	219	6,8	215
	219 HV5	2.	216, 216, 223, 225, 221	220	3,7	216
	X10CrMoVNb9-1	1.	235, 237, 243, 247, 241	241	4,3	238
	236 HV5	2.	241, 244, 242, 242, 235	241	3,1	238
	X10CrMoVNb9-1	1.	426, 396, 396, 412, 419	410	12,1	424
	405 HV5	2.	299, 411, 429, 428, 415	416	11,2	431
Anturi 2.	X10CrMoVNb9-1	1.	210, 218, 224, 233, 232	223	8,7	225
	219 HV5	2.	218, 230, 235, 241, 236	232	7,8	234
	X10CrMoVNb9-1	1.	219, 234, 243, 245, 247	238	10,3	240
	236 HV5	2.	242, 249, 250, 242, 243	245	3,5	249
	X10CrMoVNb9-1	1.	397, 399, 407, 420, 421	409	10,1	424
	405 HV5	2.	397, 398, 409, 423, 437	413	15,3	428
Anturi 3.	X10CrMoVNb9-1	1.	215, 214, 223, 219, 213	217	3,7	225
	219 HV5	2.	222, 213, 212, 219, 220	217	4,0	226
	X10CrMoVNb9-1	1.	241, 234, 240, 242, 245	240	3,6	257
	236 HV5	2.	239, 237, 239, 236, 233	237	2,2	252
	X10CrMoVNb9-1	1.	380, 388, 397, 400, 407	394	9,4	464
	405 HV5	2.	417, 401, 388, 387, 417	402	13,2	474

Eri ferriittiset teräkset. Kalibrointipala 344 HV5; kalibrointi.

Liitteessä 7. on nähtävillä kalibrointi-arvot, vertailumittausarvot ja mittaustulokset, kun kenttäkovuusmittarit on kalibroitu kalibrointipalalla 344HV5.

Taulukko 29. Kalibrointi-arvot

Mittari ja anturi	Kalibrointitulokset	Keskiarvo	Hajonta	Cal.nro
Anturi 1.	334, 349, 354, 351, 349	347	6,9	584
Anturi 2.	330, 345, 341, 343, 341	340	5,2	413
Anturi 3.	344, 349, 343, 340, 347	349	3,1	296

Taulukko 30. Vertailumittausarvot

Mittari ja anturi	Vertailutulokset	Keskiarvo	Hajonta	Millä mitattu
Anturi 1.	232, 238, 235, 243, 231	236	4,4	239,3
Anturi 2.	230, 23, 236, 234, 237	235	3,1	239,3
Anturi 3.	237, 232, 239, 236, 236, 236	236	2,1	239,3

Eri ferriittiset teräkset. Kalibrointipala 344 HV5; mittaukset

Liitteessä 8. on nähtävillä mittarin näytöltä luetut mittaustulokset, keskiarvo, mittausten hajonta sekä mittausten korjattu keskiarvo.

Taulukko 31. Mittaustulokset

Mittari ja anturi	Mitattu kappale	Mittaus	Mittaustulokset	Keskiarvo	Hajonta	Korjattu arvo
Anturi 1.	X10CrMoVNb9-1 219 HV5	1.	214, 217, 221, 219, 223	219	3,1	223
		2.	217, 215, 220, 221, 222	219	2,6	224
	X10CrMoVNb9-1 236 HV5	1.	232, 235, 241, 242, 247	239	5,3	243
		2.	233, 239, 231, 236, 245	237	4,9	240
	X10CrMoVNb9-1 405 HV5	1.	391, 404, 433, 451, 453	426	24,9	418
		2.	383, 395, 384, 384, 406	390	9,0	384
Anturi 2.	X10CrMoVNb9-1 219 HV5	1.	204, 212, 214, 214, 217	212	4,4	216
		2.	222, 226, 229, 234, 235	229	4,9	233
	X10CrMoVNb9-1 236 HV5	1.	218, 231, 230, 236, 240	231	7,4	235
		2.	244, 240, 237, 241, 240	240	2,2	244
	X10CrMoVNb9-1 405 HV5	1.	378, 398, 409, 419, 437	408	19,7	412
		2.	431, 424, 424, 416, 418	423	5,3	427
Anturi 3.	X10CrMoVNb9-1 219 HV5	1.	212, 224, 220, 227, 217	220	5,3	224
		2.	212, 215, 211, 215, 212	213	1,7	217
	X10CrMoVNb9-1 236 HV5	1.	236, 231, 244, 237, 230	236	5	239
		2.	230, 235, 233, 235, 234	233	1,9	237
	X10CrMoVNb9-1 405 HV5	1.	405, 383, 388, 399, 404	396	8,8	393
		2.	396, 392, 395, 395, 405	397	4,4	394

X10CrMoVNb9-1 -putki. Anturi 1; kalibrointi

Liitteessä 9. on kalibrointiarvot ja vertailuarvot mitattaessa X10CrMoVNb9-1 -putkea.

Taulukko 32. Kalibrointiarvot: MIC10;49 N.

Mittari ja anturi	Kalibrointikappale	HV	Kalibrointitulokset	Keskiarvo	Hajonta	Cal.nro
Anturi 1.	Struers	149,5 HV5	151, 146, 148, 149, 153	149	2,4	550
	Struers	239,3 HV5	236, 243, 241, 240, 136	239	2,8	550
	Struers	344 HV5	342, 353, 349, 345, 349, 345	347	3,8	453
	X10CrMoVNb9-1	218,6 HV5	209, 212, 220, 218, 215	215	4,0	674
	X10CrMoVNb9-1	236,1 HV5	231, 237, 235, 236, 242	236	3,5	674

Taulukko 33. Vertailumittausarvot: MIC10; 49 N.

Vertailupala	Vertailutulokset	Keskiarvo	Hajonta	Kalibrointipala
239,3 HV5	237, 235, 235, 236, 238	236	1,2	149,5 HV5
149,5 HV5	146, 146, 147, 143, 148	146	1,7	239,3 HV5
239,3 HV5	224, 222, 229, 226, 229, 227	226	2,5	344 HV5
236,1 HV5	233, 232, 229, 231, 232	231	1,4	218,6 HV5
218,6 HV5	217, 219, 220, 218, 215	218	1,7	236,1 HV5

X10CrMoVNb9-1 -putki. Anturi 1; mittaustulokset

Liitteessä 10. on mittaustulokset X10CrMoVNb9-1 -putken mittauksista anturilla 1.

Taulukko 34. Mittaustulokset

Kalibrointi	Mitattu pinta	Mittaus	Mittaustulokset	Keskiarvo	Hajonta	Korjattu arvo
Struers 149,5 HV5	Poikkileikkaus	1.	227, 225, 233, 233, 228	229	3,2	232
		2.	235, 235, 232, 224, 222	230	5,5	232
	Putken ulkopinta	1.	217, 222, 216, 216, 214	217	2,7	219
		2.	217, 218, 221, 215, 217	218	2,0	220
Struers 239,3 HV5	Poikkileikkaus	1.	235, 234, 230, 236, 237	234	2,4	235
		2.	232, 232, 229, 235, 239	233	3,4	234
	Putken ulkopinta	1.	222, 220, 223, 223, 225	223	1,6	223
		2.	223, 219, 220, 221, 224	221	1,9	222
Struers 344 HV5	Poikkileikkaus	1.	225, 228, 229, 221, 224	225	2,9	239
		2.	228, 225, 224, 229, 226	226	1,9	240
	Putken ulkopinta	1.	222, 217, 216, 223, 225	221	3,5	234
		2.	217, 218, 212, 215, 223	217	3,6	231
X10CrMoVNb9-1 218,6 HV5	Poikkileikkaus	1.	236, 243, 242, 242, 246	242	3,2	247
		2.	239, 229, 243, 241, 239	238	4,8	243
	Putken ulkopinta	1.	265, 269, 268, 268, 266	267	1,5	274
		2.	263, 267, 274, 268, 268	268	3,5	275
X10CrMoVNb9-1 236,1 HV5	Poikkileikkaus	1.	234, 234, 241, 241, 240	238	3,3	238
		2.	242, 245, 245, 245, 241	244	1,7	243
	Putken ulkopinta	1.	242, 243, 243, 244, 240	242	1,4	242
		2.	236, 243, 243, 232, 231	237	5,2	237

X10CrMoVNb9-1 -putki. Anturi 2; kalibrointi.

Liitteessä 11. on kalibrointi-arvot ja vertailuarvot mitattaessa X10CrMoVNb9-1 -putkea.

Taulukko 35. Kalibrointi-arvot: MIC10; 98 N.

Mittari ja anturi	Kalibrointikappale	HV	Kalibrointitulokset	Keskiarvo	Hajonta	Cal.nro
Anturi 2.	Struers	149,5 HV5	150, 156, 157, 155, 154	154	2,4	596
	Struers	239,3 HV5	237, 243, 246, 253, 237, 248	244	5,8	686
	Struers	344 HV5	340, 340, 343, 345, 351	344	4,1	389
	X10CrMoVNb9-1	218,6 HV5	224, 229, 225, 226, 225	226	1,7	255
	X10CrMoVNb9-1	236,1 HV5	232, 231, 233, 233, 232	232	0,7	332

Taulukko 36. Vertailumittausarvot: MIC10; 98N.

Vertailupala	Vertailutulokset	Keskiarvo	Hajonta	Kalibrointipala
239,3 HV5	236, 234, 239, 230, 233	234	3,0	149,5 HV5
149,5 HV5	160, 156, 166, 144, 164	158	8,0	239,3 HV5
239,3 HV5	228, 232, 230, 234, 230	231	2,0	344 HV5
236,1 HV5	235, 235, 236, 236, 236	236	0,5	218,6 HV5
218,6 HV5	219, 220, 226, 226, 225	223	3,1	236,1 HV5

X10CrMoVNb9-1 -putki. Anturi 2; mittaustulokset

Liitteessä 12. on mittaustulokset X10CrMoVNb9-1 -putken mittauksista anturilla 2.

Taulukko 38. Mittaustulokset

Kalibrointi	Mitattu pinta	Mittaus	Mittaustulokset	Keskiarvo	Hajonta	Korjattu arvo
Struers 149,5 HV5	Poikkileikkaus	1.	248, 251, 252, 256, 264	254	5,5	262
		2.	251, 248, 241, 241, 246	245	3,9	252
	Putken ulkopinta	1.	277, 272, 269, 266, 267	270	4,0	279
		2.	264, 265, 267, 265, 270	266	2,1	275
Struers 239,3 HV5	Poikkileikkaus	1.	259, 254, 252, 253, 246	253	4,2	249
		2.	254, 260, 247, 259, 251	254	4,9	250
	Putken ulkopinta	1.	267, 264, 271, 275, 279	271	5,4	268
		2.	269, 272, 282, 281, 272	275	5,3	272
Struers 344 HV5	Poikkileikkaus	1.	228, 237, 233, 232, 230	232	3,0	240
		2.	232, 236, 232, 231, 234	233	1,8	241
	Putken ulkopinta	1.	233, 241, 249, 256, 247	245	7,8	253
		2.	233, 237, 249, 255, 259	247	10,1	254
X10CrMoVNb9-1 218,6 HV5	Poikkileikkaus	1.	224, 225, 232, 231, 228	228	3,2	223
		2.	233, 228, 231, 224, 229	229	3,0	224
	Putken ulkopinta	1.	253, 252, 254, 252, 250	252	1,3	266
		2.	245, 247, 249, 246, 248	247	1,4	256
X10CrMoVNb9-1 236,1 HV5	Poikkileikkaus	1.	222, 225, 232, 230, 237	229	5,3	230
		2.	233, 229, 227, 235, 226	230	3,5	232
	Putken ulkopinta	1.	242, 246, 252, 250, 244	247	3,7	264
		2.	240, 238, 238, 245, 244	241	3,0	253

X10CrMoVNb9-1 -putki. Anturi 3; kalibrointi

Liitteessä 13. on kalibrointi-arvot ja vertailuarvot mitattaessa X10CrMoVNb9-1 -putkea.

Taulukko 39. Kalibrointi-arvot: SonoDur2; 49 N.

Mittari ja anturi	Kalibrointikappale	HV	Kalibrointitulokset	Keskiarvo	Hajonta	Cal.nro
Anturi 3.	Struers	149,5 HV5	144, 146, 149, 145, 140, 143	145	2,8	64
	Struers	239,3 HV5	233, 235, 233, 237, 238, 240	236	2,6	442
	Struers	344 HV5	341, 348, 338, 343, 340, 346	343	3,4	414
	X10CrMoVNb9-1	218,6 HV5	211, 218, 211, 211, 210	212	2,9	484
	X10CrMoVNb9-1	236,1 HV5	234, 234, 239, 235, 233, 235	235	1,9	497

Taulukko 40. Vertailumittausarvot: SonoDur2; 49 N.

Vertailupala	Vertailutulokset	Keskiarvo	Hajonta	Kalibrointipala
239,3 HV5	226, 225, 221, 228, 223, 227	226	2,6	149,5 HV5
149,5 HV5	160, 158, 156, 160, 159	159	1,7	239,3 HV5
239,3 HV5	237, 240, 241, 240, 242	240	1,9	344 HV5
236,1 HV5	242, 246, 237, 238, 235	240	4,4	218,6 HV5
218,6 HV5	224, 224, 219, 218, 224	220	3	236,1 HV5

X10CrMoVNb9-1 -putki. Anturi 3; mittaustulokset

Liitteessä 14. on mittaustulokset X10CrMoVNb9-1 -putken mittauksista anturilla 3.

Taulukko 41. Mittaustulokset

Kalibrointi	Mitattu pinta	Mittaus	Mittaustulokset	Keskiarvo	Hajonta	Korjattu arvo
Struers 149,5 HV5	Poikkileikkaus	1.	216, 214, 216, 225, 222	219	4,2	232
		2.	216, 224, 223, 223, 216	220	3,6	234
	Putken ulkopinta	1.	200, 207, 207, 213, 212	208	4,6	220
		2.	205, 206, 201, 208, 203	205	2,4	217
Struers 239,3 HV5	Poikkileikkaus	1.	231, 232, 229, 232, 231	231	1,1	233
		2.	233, 238, 237, 233, 223	233	5,3	236
	Putken ulkopinta	1.	228, 224, 224, 228, 227	226	1,8	228
		2.	222, 221, 224, 225, 227	224	2,1	225
Struers 344 HV5	Poikkileikkaus	1.	235, 237, 237, 232, 232	235	2,2	234
		2.	230, 227, 232, 233, 237	232	3,3	231
	Putken ulkopinta	1.	221, 226, 227, 224, 223	224	2,1	223
		2.	221, 229, 230, 222, 225	225	3,6	224
X10CrMoVNb9-1 218,6 HV5	Poikkileikkaus	1.	240, 236, 238, 242, 243	240	2,6	236
		2.	235, 237, 240, 234, 242	238	3,0	235
	Putken ulkopinta	1.	241, 243, 236, 247, 243	242	3,6	238
		2.	240, 247, 246, 244, 248	245	2,8	240
X10CrMoVNb9-1 236,1 HV5	Poikkileikkaus	1.	249, 242, 244, 236, 247	244	4,5	248
		2.	237, 241, 238, 238, 235	238	1,9	240
	Putken ulkopinta	1.	242, 243, 243, 244, 240	229	1,9	228
		2.	236, 243, 243, 232, 231	225	5,5	223