

KERTAMUOVIPINNOITTEIDEN KOVUUDEN MITTAUS

Joonas Kakkonen

Opinnäytetyö
Syyskuu 2013

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Tekniikan ja liikenteen ala





| | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|
| Tekijä(t) KAKKONEN, Joonas | Julkaisun laji Opinnäytetyö | Päivämäärä 26.08.2013 |
| | Sivumäärä 97 | Julkaisun kieli Suomi |
| | | Verkojulkaisulupa myönnetty (X) |
| Työn nimi KERTAMUOVIPINNOITTEIDEN KOVUUDEN MITTAUS | | |
| Koulutusohjelma Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma | | |
| Työn ohjaaja(t) PARVIAINEN, Miikka HIITELÄ, Erja | | |
| Toimeksiantaja(t) Metso Paper Oy | | |
| Tiivistelmä <p>Opinnäytetyön toimeksiantaja oli Metso Paper Oyj:n Jyväskylän huoltokeskuksen telahuoltopalvelut. Opinnäytetyössä tutkittiin komposiittipinnoitettujen kalanteritelojen kovuuden mittausta ja mittauksiin vaikuttavia tekijöitä sekä tutkittiin mistä olemassa oleva mittausepävarmuus ja tulosten hajonta muodostuu. Työn tavoitteena oli koostaa polyuretaani- ja komposiittipinnoitettujen telojen kovuuden mittauksesta käsikirja, jota suunnittelu, valmistus ja laadunvalvonta voivat hyödyntää.</p> <p>Opinnäytetyö toteutettiin tutustumalla teoria-aineiston pohjalta polymeerimateriaalien kovuuden mittaukseen, tyypillisimpiin mittaamenetelmiin ja mittauksiin vaikuttaviin tekijöihin. Opinnäytetyön kokeellisessa osassa pyrittiin selvittämään Gage R&R -testin avulla mittausmenetelmän mittausepävarmuutta ja tulosten hajontaa. R&R-testin lisäksi työssä tutkittiin DOE Taguchi -koesuunnittelumenetelmän avulla eri tekijöiden vaikutusta mittaustuloksiin ja niiden hajontaan. Testitulosten analysointiin käytettiin Minitab 16 -ohjelmistoa.</p> <p>Opinnäytetyön tuloksena syntyi käsikirjan omainen ohjeistus polyuretaani- ja komposiittipinnoitettujen telojen kovuuden mittauksesta. Ohjeistuksessa tuodaan esiin merkittävimpiä tuloksiin ja tulosten hajontaan vaikuttavia tekijöitä, keinoja, kuinka hajontaa voidaan vähentää sekä sitä kuinka mittaukset tulisi suorittaa. Käsikirjan lisäksi työn aikana suunniteltiin ja valmistettiin testijalusta käytössä olevalle kovuusmittarille. Testijalustan avulla telanpinnalta suoritettavat mittaukset voidaan jatkossa mitata toistettavammin ja näin aikaan saada luotettavampia tuloksia.</p> <p>Opinnäytetyössä suoritettujen testien perusteella havaittiin, ettei käytössä oleva mittausmenetelmä ole suorituskykyinen mittaamaan kovuuksia tarpeeksi luotettavasti asetettuihin toleransseihin nähden. Mittaustapahtumaa vakioimalla ja yhtenäistämällä käytettäviä mittalaitteita tulosten hajontaa voidaan kuitenkin vähentää.</p> | | |
| Avainsanat (asiasanat) paperikonetela, kertamuovipinnoite, komposiitti, kovuuden mittaaminen, Gage R&R | | |
| Muut tiedot | | |



| | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Author(s) KAKKONEN, Joonas | Type of publication Bachelor´s Thesis | Date 26082013 |
| | Pages 97 | Language Finnish |
| | | Permission for web publication (X) |
| Title HARDNESS MEASUREMENT OF THERMOSET COATINGS | | |
| Degree Programme Mechanical and Production Engineering | | |
| Tutor(s) PARVIAINEN, Miikka HIITELÄ, Erja | | |
| Assigned by Metso Paper Oy | | |
| Abstract <p>The client of this thesis was Metso Paper Corporation's Jyväskylä Service center roll maintenance services. The aim was to study the hardness measurement of composite covered calender rolls, to study which factors affect the results and where the existing measurement uncertainty and variation of results come from. The goal of the thesis was to create a manual or guidelines for the hardness measurement of polyurethane and composite covered rolls.</p> <p>The thesis was carried out by getting familiar with the theory of the hardness measurement of polymer materials, explore the most typical measurement methods and sort out the factors which affect the measurement. In the experimental part of the thesis the aim was to sort out measurement uncertainty and the variation of the results by using the Gage R&R test. In addition the R&R test another aim was to study how several different factors affect the measurement results and the variation of results by using DOE-Taguchi design of the experimental method. The analysis of the tests was carried out by using Minitab 16 software.</p> <p>The thesis resulted in a manual for hardness measurement of polyurethane and composite covered rolls. The manual highlights the most important factors which affect the results and variation of the results. The manual also gives instructions of how the variation can be reduced and how to perform measurements correctly. During the thesis project a test stand for the existing hardness tester was planned and produced. Using the test stand on the roll surface, measurements can be measured more reproducibly and more reliable results can be achieved.</p> <p>On the basis of the thesis it was found that the use of the existing measurement method is not efficient to measure the hardness reliably in relation to the tolerance. Standardizing the measurement process and measuring devices the existing measurement variation can be reduced.</p> | | |
| Keywords paper machine roll, thermoset coatings, composite, hardness measurement, Gage R&R | | |
| Miscellaneous | | |

Sisältö

| | | |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | Johdanto | 5 |
| 2 | Metso Paper Oy Rautpohja | 6 |
| 3 | Telapinnoitteet | 7 |
| 3.1 | Telapinnoitteet paperinvalmistuksessa..... | 7 |
| 3.2 | Polymeeritelan rakenne..... | 8 |
| 3.3 | Polymeerit..... | 8 |
| 3.4 | Pinnoitemateriaalit eri telasovelluksissa..... | 9 |
| 4 | Kovuus | 11 |
| 4.1 | Kovuuden mittaus..... | 11 |
| 4.2 | Mittausmenetelmien käyttö ja jaottelu..... | 12 |
| 4.3 | Korrelaatio suhde kovuuden sekä muiden mekaanisten ominaisuuksien välillä..... | 13 |
| 5 | Polymeerimateriaalien kovuuden mittaus | 15 |
| 5.1 | Muodonmuutokset..... | 15 |
| 5.2 | Tavanomaiset mittausmenetelmät..... | 17 |
| 5.3 | Kannettavat mittalaitteet..... | 19 |
| 6 | Komposiittipinnoitteiden kovuuden mittausmenetelmät | 21 |
| 6.1 | Shore-durometri..... | 21 |
| 6.2 | Barcol-kovuus..... | 25 |
| 7 | Mittausmenetelmän valinta | 28 |
| 8 | Mittausepävarmuus | 30 |
| 8.1 | Mittausepävarmuus kovuuden mittauksessa..... | 30 |
| 8.2 | Ongelmat Shore kovuuden mittauksessa..... | 32 |
| 8.3 | Ongelmat komposiittipinnoitettujen telojen kovuuden mittauksessa..... | 34 |
| 9 | SPC - Tilastollinen prosessin valvonta | 35 |
| 9.1 | SPC:een perusajatus..... | 35 |
| 9.2 | Gage R&R -testi..... | 36 |
| 10 | Teollinen koesuunnittelu | 39 |
| 10.1 | Taguchi-menetelmä..... | 39 |
| 10.2 | Parametrisuunnittelu..... | 40 |
| 10.3 | Ortogonaalimatriisi..... | 41 |
| 10.4 | Tulosten analysointi ja tarkastelu..... | 42 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 11 Koemittaukset | 42 |
| 11.1 Mittausten toteuttaminen | 42 |
| 11.2 R&R-testi | 43 |
| 11.2.1 Käsinmittaus, maksimiarvo..... | 45 |
| 11.2.2 Käsinmittaus, lukemahetki 1 sekuntia | 51 |
| 11.2.3 Testijalusta, maksimiarvo | 53 |
| 11.2.4 Testijalusta, lukemahetki 1 sekuntia..... | 55 |
| 11.2.5 Testijalusta lukemahetki 15 sekuntia..... | 56 |
| 11.3 DOE- Taguchi -testi | 59 |
| 11.3.1 Mittari 1, CV-viisariduroometri..... | 60 |
| 11.3.2 Mittari 2, CV-durometri testijalustalla | 62 |
| 11.3.3 Mittari 3, Gibitre | 63 |
| 11.3.4 Mittari 4, Barcol | 65 |
| 12 Tulokset | 66 |
| 12.1 R&R-testi | 66 |
| 12.2 DOE- Taguchi -testi | 70 |
| 12.3 Testijalusta Shore -durometrille..... | 72 |
| 12.4 Käsikirja kertamuovien kovuudenmittaukseen..... | 73 |
| 13 Pohdinta | 73 |
| Lähteet | 78 |
| Liitteet | 82 |
| Liite 1. R&R testipaikka ja testijalusta | 82 |
| Liite 2. DOE- Taguchi testipaikka ja suunniteltu testijalusta..... | 82 |
| Liite 3. Päättämittauslaite..... | 83 |
| Liite 4. Keskiarvon käyttö kovuuden määrittämisessä..... | 84 |
| Liite 5. Käsikirja, Kertamuovipinnoitteiden kovuudenmittaus Rautpohjan telatuotannossa .. | 84 |

Kuviot

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Kuvio 1. Kovuuden ja myötölujuuden korrelaatio | 14 |
| Kuvio 2. Kimmomoduulin ja kovuuden korrelaatio | 14 |
| Kuvio 3. Materiaalin käyttäytymisen ja painauman yhteys | 16 |
| Kuvio 4. Viskoelastinen muodonmuutos..... | 17 |
| Kuvio 5. P&J-mittalaite | 19 |
| Kuvio 6. Ruben-mittalaite..... | 19 |
| Kuvio 7. Mekaaninen Shore-durometri ja mittapenkki | 22 |
| Kuvio 8. Shore A- ja D -mittapääät..... | 22 |
| Kuvio 9. Digitaalinen Shore D -durometri | 23 |
| Kuvio 10. Shore A/D -vastaavuustaulukko | 24 |
| Kuvio 11. Korrelaatio eri polymeerimateriaalien välillä..... | 25 |
| Kuvio 12. Mekaaninen Barcol-mittalaite..... | 26 |
| Kuvio 13. Digitaalinen Barcol-mittalaite | 27 |
| Kuvio 14. Mittavaihteluun vaikuttavat tekijät..... | 30 |
| Kuvio 15. Prosessin vaihtelu | 37 |
| Kuvio 16. Gibitre Shore D -mittari | 44 |
| Kuvio 17. CV Instruments Shore D -mittari | 44 |
| Kuvio 18. Käsinnmittaus, maksimiarvo | 46 |
| Kuvio 19. Components of Variation, käsinnmittaus | 46 |
| Kuvio 20. Käsinnmittaus, vaihtelutekijät ja session-data..... | 47 |
| Kuvio 21. R- ja Xbar -kuvaajat käsinnmittauksessa..... | 48 |
| Kuvio 22. Mittaustulosten ja mittaajien vaikutuksen analysointikuvaajat käsinnmittauksessa | 49 |
| Kuvio 23. Käsinnmittaus, lukemahetki 1 s..... | 52 |
| Kuvio 24. Käsinnmittaus, lukemahetki 1 s, session-data | 52 |
| Kuvio 25. Testijalusta, maksimiarvo..... | 53 |
| Kuvio 26. Testijalusta, maksimiarvo, session-data | 54 |
| Kuvio 27. Testijalusta, lukemahetki 1 s. | 56 |
| Kuvio 28. Testijalusta, lukemahetki 1 s, session-data..... | 56 |
| Kuvio 29. Testijalusta, lukemahetki 15 s | 58 |

| | |
|-------------------------------------------------------------|----|
| Kuvio 30. Testijalusta, lukemahetki 15 s, session-data..... | 58 |
| Kuvio 31. Vastetaulukko, CV-durometri..... | 61 |
| Kuvio 32. S/N-käyrä, CV-durometri..... | 62 |
| Kuvio 33. Keskiarvo-käyrä, CV-durometri | 62 |
| Kuvio 34. Vastetaulukko, CV-durometri testijalustalla | 63 |
| Kuvio 35. Vastetaulukko, Gibitre, maksimiarvo..... | 64 |
| Kuvio 36. Vastetaulukko, Gibitre, lukemahetki 1 s. | 64 |
| Kuvio 37. Vastetaulukko, Barcol | 65 |
| Kuvio 38 R&R-testin tulokset..... | 67 |
| Kuvio 39. Näytekappaleen ja mittakärjen asemointi..... | 69 |

Taulukot

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Taulukko 1. Suositeltavien mittausten lukumäärä Barcol-kovuutta määritettäessä .. | 27 |
| Taulukko 2. Klassinen koemenetelmä..... | 41 |
| Taulukko 3. Ortogonaalimatriisi | 41 |
| Taulukko 4. L8-Ortogonaalimatriisi..... | 59 |
| Taulukko 5. L4-Ortogonaalimatriisi..... | 60 |

1 Johdanto

Kiristynyt globaali taloustilanne ja kustannuspaineet vaativat tuotantoprosesseilta entistä enemmän tuotantotehokkuutta ja taloudellisuutta. Paperikoneen eri telapinnoitteiden avulla pyritään parantamaan paperintuotantolaitosten tehokkuutta sekä taloudellisuutta.

Metso Paper on yksi maailman johtavista paperikoneiden laite- ja palvelutoimittajista. Jyväskylän Rautpohjassa sijaitsevan paperikonetehtaan yhteydessä toimii huoltokeskus, joka on osa Metson maailmanlaajuista Service-osastoa, jonka tarkoituksena on toimia asiakkaiden tukena koko tuotantolinjan elinkaaren ajan. Huoltokeskuksen telapalvelut -osaston tehtävänä on suorittaa telojen mekaanisia huoltoja, kunnostuksia ja modernisointeja sekä uusia ja korjata asiakkaiden telapinnoitteita.

Polymeeripinnoitteiden avulla pyritään parantamaan eri paperinvalmistussovelluksien taloudellisuutta ja luotettavuutta ja vähentämään telojen kunnossapidon tarvetta. Valtaosassa telapinnoitteiden käyttökohteissa oleellista on sopivan puristuspaineen saavuttaminen telanipissä. Koneteknisten mitoitusohjelmien ohella nipitapahtumaa säädetään pinnoitteen kovuudella. Pinnoitteen kovuus toimii yhtenä merkittävänä spesifikaationa asiakkaiden valitessa pinnoitettuja teloja eri paperinvalmistussovelluksia varten.

Kovuuden mittaukseen, kuten kaikkiin mittauksiin, liittyy mittausepävarmuutta. Polymeeripinnoitteisten telojen ja etenkin komposiittipinnoitettujen kalanteritelojen kohdalla mittausepävarmuus on käytävissä olevilla mittausmenetelmillä suuri. Opinnäytetyön tavoitteena oli polymeerimateriaalien kovuudenmittauksen teorian selvittäminen sekä tutkia, mistä mittausepävarmuus ja mittaustulosten hajonta johtuu. Lopputuloksena tavoitteena oli koostaa ns. pehmeiden telapinnoitteiden kovuudenmittaukseen käsikirjan omainen ohjeistus, jota suunnittelu, valmistus ja laadunvalvonta voivat hyödyntää.

Raportissa käsitellään kirjallisuuden pohjalta kovuuden mittausta yleisesti, mitä tekijöitä polymeerimateriaalin kovuuden mittauksessa tulee huomioida, mitkä ovat tyypillisimpiä käytössä olevat mittausmenetelmät, sekä tarkastellaan, mistä mittausepä-

varmuus muodostuu. Työn alku sisältää siis osittain kvalitatiivista tutkimusta, jonka avulla pyritään saamaan kokonaisvaltainen kuva polymeerimateriaalien ominaisuuksista ja kovuuden mittauksesta. Kokeellisessa osassa sen sijaan hyödynnetään kvantitatiiviselle tutkimukselle ominaisia tilastollisia analyysimenetelmiä kuten tilastollista prosessinvalvontaa, Gage R&R -testiä ja DOE- Taguchi -testiä. Testien avulla pyrittiin selvittämään käytössä olevan komposiittipinnoitettujen kalanteritelojen mittausmenetelmän epävarmuutta sekä eri ulkoisten tekijöiden vaikutusta mittaustuloksiin.

2 Metso Paper Oy Rautpohja

Metson Paperin Rautpohjan yksikkö toimitti ensimmäiset paperikoneensa vuonna 1953 ja tähän päivään tultaessa yksikön paperikoneita tai niiden uusintoja on käytössä kaikissa maanosissa. Rautpohja työllistää 50 hehtaarin alueella noin 1700 työntekijää, joista noin 400 työskentelee tuotannossa. Rautpohjan alueella sijaitsevat paperi- ja kartonkikonetehtaan lisäksi teknologiakeskus, paperikoneiden huoltokeskus sekä rautavalimo. Vuosittain Rautpohjassa viedään läpi noin 20–30 paperikone- ja uusintaprojektia sekä satoja pienempiä komponentti- ja varaosatoimituksia. (Metso Paper perehdyttämispöytäkirja 2012, 3.)

Metso Paper Oy on osa kansainvälistä teknologia- ja palvelutoimittaja Metsoa, jonka liikevaihto vuonna 2012 oli 7 504 milj. euroa, josta noin 44 prosenttia muodostuu palveluliiketoiminnasta. Metso työllistää maailmanlaajuisesti noin 30 000 osaajaa yli 300 yksikössä, yli 50 maassa. Metso Paper on osa Metson toiseksi suurinta liiketoimintasegmenttiä; massa, paperi ja voimantuotanto segmenttiä. Segmentti koostuu paperiteollisuus-, kuidut-, voimantuotanto- ja palveluliiketoimintalinjoista. Paperiteollisuus tuottaa suurimman osan segmentin liikevaihdosta noin 48 %. Segmentin kokonaisliikevaihdosta noin reilu kolmannes koostuu palveluliiketoiminnasta. Segmentin tuotteet ja palvelut keskittyvät massa- ja paperiteollisuuden tuotantolinjojen, koneiden ja modernisointien tuottamiseen sekä huolto-, varaosa- ja asiantuntijapalveluiden tarjoamiseen. (Metso Annual Report, 2012)

Huoltokeskus – telapalvelu

Rautpohjan huoltokeskus on osa Metso Paperin maailmanlaajuista Service toimintoa, jonka tehtävänä on tarjota kattavia huoltopalveluita kaikille paperi- ja kartonkikoneille Suomessa ja Venäjällä sekä tukea muiden palvelukeskusten toimintaa ympäri maailmaa. Telapalvelut -osasto tarjoaa asiakkaille telojen mekaanisia huoltoja, kunnostuksia ja modernisointeja mm. imuteloille sekä taipumakompensoiduille teloille. Mekaanisen huollon lisäksi telapalvelut tarjoavat asiakkaiden telojen uudelleen pinnoituksia ja vedenpoistoelementtejä. Telapinnoitteiden tuotevalikoima koostuu polyuretaani-, komposiitti ja kovapinnoitteista. Telapalvelut työllistävät noin 70 henkeä, joista reilu 10 on toimihenkilöitä. (Jyväskylän huoltoteknologiakeskus 2013.)

3 Telapinnoitteet

3.1 Telapinnoitteet paperinvalmistuksessa

Paperin valmistus perustuu useiden erityyppisten telojen käyttöön. Erilaisten telapinnoitteiden avulla pyritään takaamaan paras mahdollinen tulos paperinvalmistusprosessin eri sovelluksissa. Paperivalmistussovelluksissa tärkeimmät huomioonotettavat tekijät, kosteus, lämpötila, mekaaninen kuorma ja kemiallinen ympäristö, asettavat pinnoitemateriaaleille useita haasteita. Paperikoneen eri sovellukset vaativat erilaisia ominaisuuksia teloilta, joita pyritään parantamaan erilaisten telapinnoitteiden avulla. Kuluminen on yleisimpiä pinnoitemateriaalien ongelmia, joita kohdataan paperinvalmistusprosessissa. Kulumista aiheuttaa mm. huopakontakti, paperirata, täyteaineiden ulkoiset hiukkaset, leikkausvoimat ja altistuminen kemikaaleille. Telapinnoitteiden kehitystyön yksi merkittävistä haasteista onkin löytää kulutuskestäviä pinnoitemateriaaleja, jotka eivät kerää likaa paperinvalmistusprosessissa. (Kettunen 2011, 10–12.)

Opinnäytetyössä keskityttiin kalanteroinnissa käytettävien komposiittipinnoitteisten telojen kovuuden mittaukseen. Kalanterointi on paperinvalmistusprosessin viimeinen

vaihe, jossa voidaan vaikuttaa vielä paperin ominaisuuksiin. Kalanteroinnin tavoite on viimeistellä paperin pintaominaisuuksia ja parantaa paperin painettavuutta. Kalanteroimaton paperi on huokoista ja epätasaista ja sen paksuus vaihtelee, mikä lisää painoväriin kulutusta sekä heikentää painojälkeä. Painettavuuden parantamiseksi paperi kalanteroidaan eli puristetaan kahden yhdensuuntaisen telan kosketuskohdassa eli nipissä. Paperi kulkee telojen välistä, ja telojen puristuksen ja lämmön vaikutuksesta paperi silottuu ja kiillottuu. Nippien lukumäärä ja polymeeripinnoitettujen telojen lukumäärä määräytyy kalanterityypin ja paperilajin mukaan. (Jokio 1999, 14.)

3.2 Polymeeritelan rakenne

Polymeeritelat koostuvat pääasiassa kahdesta eri pinnoitekerroksesta sekä rungosta. Päällimmäistä kerrosta kutsutaan pintakerrokseksi, joka määrittelee, onko kyseessä komposiitti-, polyuretaani- vai kumipinnoitettu tela. Kalanteroinnissa käytetyt telat ovat pääasiassa komposiitti- tai kovapinnoiteteloja. Pintakerroksen tehtävänä on kalanteroida paperi, mikä asettaa pinnoitteelle tiettyjä vaatimuksia, kuten tasainen pinnanlaatu, jäykkyys, kulutuskestävyys ja matala lämmöntuottokerroin. Telan runkona toimii yleisesti teräs- tai valurautavaippa, jonka päällä on alin pinnoitekerros eli pohjakerros. Pohjakerros toimii rungon ja pintakerroksen yhdistäjänä, tasoittaen rungon ja pinnoitteen materiaaliominaisuuksien välisiä eroja. (Jokio 1999, 90.)

3.3 Polymeerit

Polymeeripinnoitteista puhuttaessa, pinnoitteiksi luetaan kumi-, polyuretaani, ja komposiittipinnoitteet. Polymeerit voidaan jakaa niiden muovattavuusominaisuuksiin mukaan kolmeen ryhmään: kesto- ja kertamuoveihin sekä elastomeereihin eli kumeihin. Kestomuoveiksi kutsutaan muoveja, joita voidaan lämmön avulla muovata uudelleen muovin rakenteen muuttumatta. Kestomuovien molekyylit ovat pitkiä polymeeriketjuja, joiden välillä ei ole kemiallisia sidoksia, vaan molekyyliden väliset voimat pitävät rakennetta kasassa. Molekyylejä yhdessä pitävät voimat heikkenevät

muovia lämmitettäessä ja vahvistuvat jäädytettäessä, mikä mahdollistaa muovin muokkaamisen. (Seppälä 1997, 11–12.)

Kertamuovit muodostuvat muovin perusraaka-aineen hartsin kovettumis- eli silloittumisreaktion seurauksena. Kovettumisreaktiossa hartsin polymeeriketjut kytkeytyvät kemiallisin sidoksin toisiinsa verkkomaiseksi rakenteeksi. Kertamuoveja ei voida kestopuovien tapaan muovata lämmön avulla uudelleen, sillä lämmön ja paineen vaikutuksesta molekyyli-rakennetta koossa pitävät sidokset katkeavat. (Seppälä 1997, 11–12.)

Elastomeerit eli kumit ovat kerta- ja kestopuovien välimuoto. Polymeeriketjut ovat sitoutuneet toisiinsa kemiallisesti tai molekyylien välillä vaikuttavien voimien eli sekundaarisidosten avulla. Kumille on ominaista se, että se palautuu nopeasti lähes alkuperäisiin mittoihin ja muotoon jännityksen vapautumisen jälkeen. Kumit eivät myöskään liukene orgaanisiin liuottimiin, eikä niitä voida muovata uudestaan. (Seppälä 1997, 11–12.)

Kertamuovien paremmat virumis-, korroosiokestävyys- ja lämpötilaominaisuudet soveltuvat kestopuoveja paremmin paperinvalmistusprosessin asettamille vaatimuksille. Paperikonesovelluksissa käytetään pääasiassa kertamuoveja ja eri kumiseoksia.

3.4 Pinnoitemateriaalit eri telasovelluksissa

Kumipinnoitteet

Kumipinnoitteiden tyypillisimmät käyttökohteet ovat erilaisten kudosten ja paperiradan ohjaustelat, liimauspuristimen telat, vastatelat sekä rullaussylinterit. Kumin korkea lämmöntuottokerroin rajoittaa sen käyttösovelluskohteissa, joissa mekaaninen kuorma on vähäinen tai kone on hidas. Nykyaikaiset kumipinnoitteet perustuvat syntetettiin kumiseoksiin, joiden paksuus on 10–50 mm, kovuus 2–200 P&J-yksikköä ja maksimikäyttölämpötila noin 90 °C. (Kettunen 2011, 11.)

Polyuretaanipinnoitteet

Polyuretaani muodostuu isosyaniittiryhmän ja alkoholin hydroksyyliiryhmän reaktion seurauksesta. Käytettävät lähtöaineet, niiden laatu, määrä ja lisäaineet vaikuttavat saadaanko lopulliseksi tuotteeksi elastomeerejä, vai kerta- tai kestopuoveja. Polyuretaanipinnoitteet on kehitetty pääosin samoihin sovelluskohteisiin kuin kumipinnoitteet, mutta niiden etuna kumipinnoitteisiin on vähäisempi lämmöntuotto ja parempi kulutuskestävyys. Polyuretaanipinnoitteiden raaka-aineet ovat kumiyhdisteitä kalliimpia mutta niiden valmistuskustannukset ovat alhaisempia. (Kettunen 2011, 11; Seppälä 1991, 123.)

Komposiittipinnoitteet

Komposiitti on yleisnimi kaikille kahden tai useamman materiaalin yhdistelmille, joissa materiaalit toimivat yhdessä, mutta eivät ole lienneet tai sulautuneet toisiinsa. Materiaaliyhdistelmän kokonaisuudeksi sitovaa ainesosaa kutsutaan matriisiksi. Muovikomposiitit ovat yksi komposiittien alaryhmistä, jossa muoviaiine toimii matriisina. Matriisiin sitovat ainesosat voivat olla esimerkiksi hienojakoisia partikkeleita tai kuituja. Rakenteellisesti parhaat muovikomposiitit saadaan lujittamalla matriisimuovins. lujitekuiduilla. Tunnetuimpia lujitekuituja ovat lasikuidut, hiilikuidut ja aramidikuidut. Matriisiaineena, perusraaka-aineena käytetään valtaosin kertamuoveihin lukeutuvia polyestereitä, vinyylistereitä ja epokseja. Perushartsiin lisätään usein seos- ja apuaineita parantamaan tiettyjä materiaalinominaisuuksia kuten iskunkestävyyttä ja paloturvallisuutta. (Airasmaa 1991, 17–20.)

Komposiittipinnoitteiden yleisin käyttökohde paperikoneessa on kalanterisovelluksissa. Muita sovelluskohteita ovat erilaiset ohjaus-, vasta-, levitys- ja puristintelat. Komposiittipinnoitteet ovat kovempia kuin kumi- ja polyuretaanipinnoitteet, ja näin ollen kestävät kulutusta paremmin. Komposiittipinnoitteet koostuvat matriisimateriaalista pääosin epoksihartseista, täyteaineista ja lujitekuiduista. Komposiittipinnoite valmistetaan normaalisti kuitukelaamalla, jossa lujitekuitu ikään kuin rullataan telarungon päälle. Rullauksen aikana kuitukangas kastetaan matriisiaineeseen tai matriisiaine

ruiskutetaan telarungon ja lujitekuidun päälle. Komposiittipinnoitteiden maksimikäyttölämpötila on jopa 100 °C ja kovuudet vaihtelevat noin 85 - 95 Shore D -kovuuden välillä. (Kettunen 2012, 11–12.)

Kovapinnoitteet

Kovapinnoitteet voidaan jakaa karbidi- ja keraamipinnoitteisiin sekä kromaukseen. Tavoitteena ohuella ja kovalla suojakerroksella on lisätä telan kulutuskestävyyttä. Tyypillisiä sovelluskohteita ovat keskitelat, kuivatussylinterit, termotelat ja ohjaustelat. Karbidi- ja keraamipinnoitteiden kovuudet vaihtelevat 1000 Vickersin ($HV_{0,3}$) molemmin puolin. (Kettunen 2012, 12.)

4 Kovuus

4.1 Kovuuden mittaus

Kovuuden mittaus on yksi käytetyimmistä menetelmistä, kun halutaan arvioida materiaalin mekaanisia ominaisuuksia. Mittaukset voidaan suorittaa suhteellisen yksinkertaisesti, nopeasti ja kustannustehokkaasti ja sitä voidaan soveltaa lähes kaikille materiaaleille. Kovuuden mittausmenetelmät ovat lähes ainetta rikkomattomia menetelmiä, mikä mahdollistaa myös hyvin pienien ja ohuiden kappaleiden mittauksen. Teoreettisten ja empiiristen tutkimusten avulla on voitu osoittaa melko tarkasti, että materiaalin kovuudella sekä materiaalin muilla mekaanisilla ominaisuuksilla, kuten esimerkiksi veto- ja myötölujuudella, väsymislujuudella ja virumisella, on yhteys. Näiden korrelaatioita vertaamalla voidaan selvittää ja arvioida eri materiaalien mekaanisia ominaisuuksia. (Grellmann 2007, 183; Kuhn 2000, 416.)

Metallurgisesti kovuus on aineen kyky vastustaa siihen tunkeutuvaa esinettä. Kovuus ei ole varsinaisesti materiaalin perusominaisuus, vaan se on riippuvainen eri tekijöistä, kuten vetomurtolujuudesta, sitkeydestä sekä materiaalin kimmoisista ominai-

suuksista. Kovuus ei ole materiaalin perusominaisuus, mutta toistettavuudeltaan kovuuden mittausta on erinomainen testausmenetelmä. Yleisesti kovuusarvo on mieltävaltainen eikä absoluuttista kovuusstandardia ole olemassa. Kovuudella ei ole tiettyä numeroarvoa tai perusyksikköä, kuten painolla, pituudella tai ajalla, mutta käyttämällä ennalta sovittua voimaa, toistettavaa tapaa ja sovittua kaavaa, saadaan kovuudelle määritettyä tietty numeroarvo. Kovuus on näin ollen siis määritellyn mittausmenetelmän tulos. (Kovuusmittauksen perusteita n.d; Kaufmann 2003, 316.)

4.2 Mittausmenetelmien käyttö ja jaottelu

Kovuuden mittausta voidaan käyttää monissa eri sovellutuksissa, kuten laadunvalvonnassa, materiaalien arvioinnissa ja ominaisuuksien ennustamisessa. Tuotannossa kovuutta testataan pääasiassa kahdesta syystä: uusien materiaalien tutkimus- ja kehitystyössä sekä laadunvalvonnassa. Kovuuden mittauksen avulla arvioidaan materiaalien soveltuvuutta eri sovelluksille tai määrätyille käsittelyille. Kovuuden mittauksen avulla voidaan myös arvioida täyttääkö jokin sovellus sille asetetut vaatimukset. (Frank 2001, 4–5; Kuhn & Medlin 2000, 416.)

Kovuuden mittausmenetelmät voidaan jakaa useita eri kriteerejä käyttäen, mutta karkeasti menetelmät voidaan jakaa kahteen eri tyyppiin, staattisiin mittausmenetelmiin sekä dynaamisiin mittausmenetelmiin. Staattisissa testausmenetelmissä paininta kuormitetaan lähes staattisesti materiaalin pintaan joko pallon, kartion tai pyramidin muotoisella mittapäällä. Riippuvuus voiman ja painaumasyvyyden tai -pinta-alan välillä on kovuusmittauksen tulos. Tavanomaisia staattisia mittausmenetelmiä ovat mm. laajalti käytössä olevat Brinell, Rockwell, Vickers ja Knoop-mittausmenetelmät. Dynaamisissa mittausmenetelmissä (Leeb/Rebound) ns. iskukappale ammutaan jousivoiman avulla tutkittavan kappaleen pintaan. Kappaleen pintaan muodostuneesta painaumasta johtuen, iskukappale menettää osan alkupe- räisestä liike-energiastaan, ja näin ollen kovuus määritetään liike-energian muutoksen ja kimmahduskorkeuden avulla. (Frank 2001, 4–5; Kuhn ym. 2000, 416.)

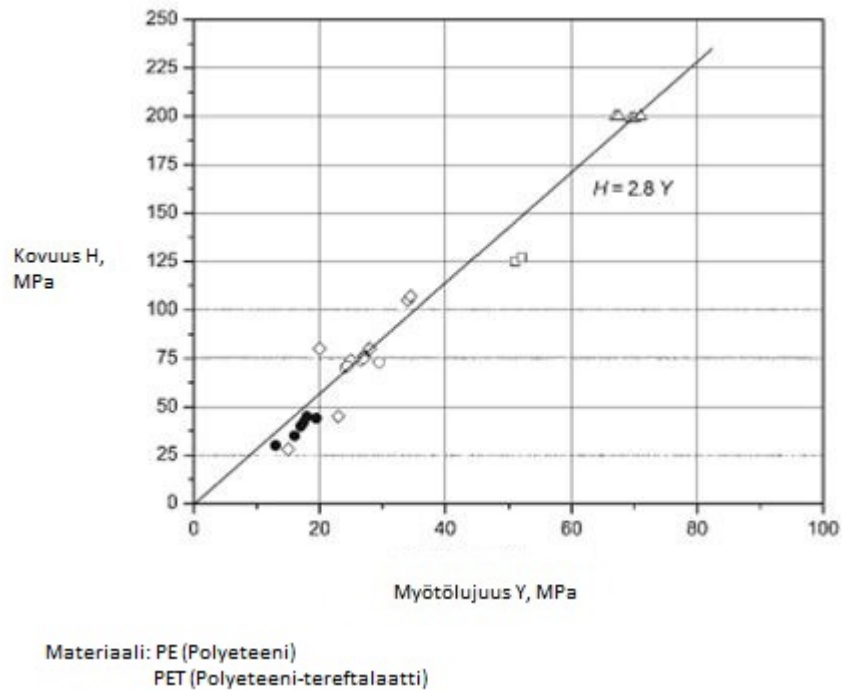
Eri menetelmien väliset eroavaisuudet kuormituksessa sekä erimuotoisten painimien takia, eri menetelmillä saatuja kovuusarvoja ei voida luotettavasti verrata keskenään.

Näin ollen käytössä olevat vastaavuus- ja vertailutaulukot eri mittausten menetelmien välillä ovat enemmänkin likimääräisiä, eikä eri mittausten menetelmillä saatuja tuloksia tulisi suoraan verrata keskenään. (Brown 2002, 85.)

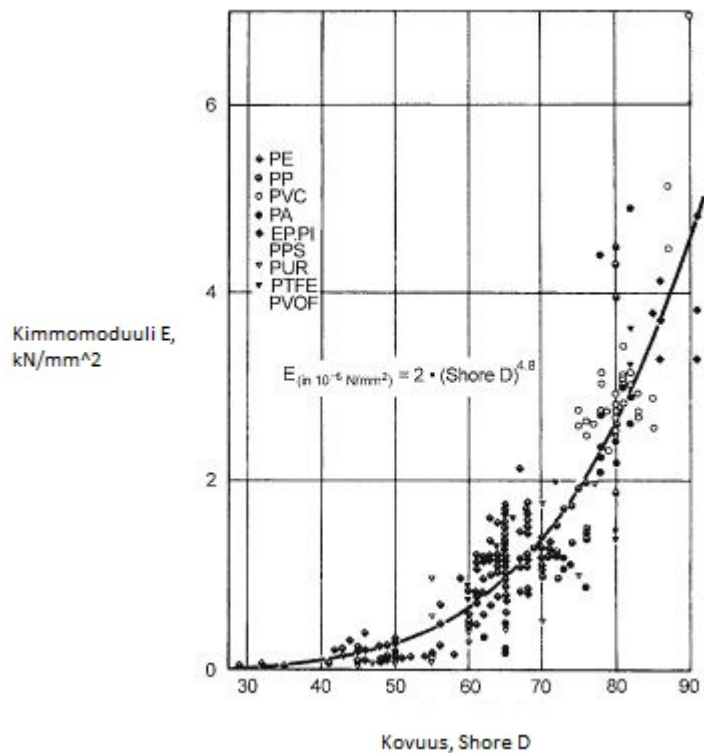
4.3 Korrelaationsuhde kovuuden sekä muiden mekaanisten ominaisuuksien välillä

Vaikka käytännössä metallien kovuuden mittauksen avulla arvioidaan materiaalin pinnan kykyä vastustaa plastista muodonmuutosta, käytetään kovuuden mittausta useiden materiaalin ominaisuuksien arvioimiseen. Tyypillisesti kovuuden avulla arvioidaan mm. materiaalin myötölujuutta, vetolujuutta ja väsymisrajaa.

Pehmeiden materiaalien osalta vastaavanlaisia, yhtä tarkkoja korrelaatioita ei ole pystytty osoittamaan materiaalin muodonmuutoksen monimutkaisuuden takia (ks. kuvio 1). Likimääräisiä korrelaatioita on löytynyt kumien sekä joidenkin muovien kohdalla kovuuden ja kimmomoduulin eli kimmokertoimen välillä. Tutkimusten mukaan parhaisiin tuloksiin on päästy hyvin elastisten kumimateriaalien kanssa sekä hyvin likimääräiseen korrelaatioon Shore D kovuuden ja kimmomoduulin välillä (ks. kuvio 2). Empiirisesti osoitetut korrelaatioita eri materiaalin ominaisuuksien välillä ovat riippuvaisia mittausten menetelmästä ja testatusta materiaalista, joten materiaaliryhmiä koskevia yleistyksiä ei tulisi suorittaa. (Herrmann 2011, 119–121.)



Kuvio 1. Kovuuden ja myötölujuuden korrelaatio (Herrman 2011, 120)



Kuvio 2. Kimmomoduulin ja kovuuden korrelaatio (Herrmann 2011, 121)

5 Polymeerimateriaalien kovuuden mittaus

5.1 Muodonmuutokset


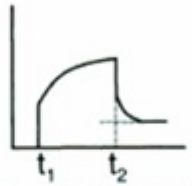
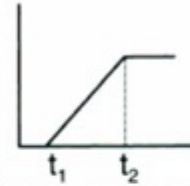

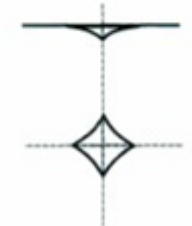
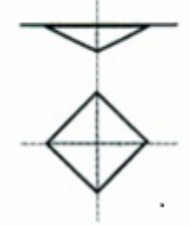
Metallien kovuutta tavanomaisilla mittausmenetelmillä (Rockwell, Vickers, Brinell) mitattaessa on vakiintunut ajatus siitä, että kovuus on materiaalin kykyä vastustaa plastista eli pysyvää muodonmuutosta. Tämä on hyvin perusteltua, sillä metallien kovuutta mitattaessa materiaalissa esiintyy hyvin vähän elastista eli palautuvaa muodonmuutosta. (Herrmann 2011, 119.)

Metallien kovuutta mitattaessa kovuusarvo mitataan normaalisti mittapään kuormituksen poistamisen jälkeen, kun taas esimerkiksi kumien kohdalla mittaus suoritetaan kuormituksen aikana. Ero näiden kahden tapauksen välillä johtuu materiaalien muodonmuutoksista. Metalleilla tapahtuva muodonmuutos mittauksen aikana on lähes kokonaan plastista, kun taas kumien kohdalla muodonmuutokset ovat taas lähes täysin elastisia. Muoveilla muodonmuutokset ovat sen sijaan jotakuinkin näiden kahden tapauksen väliltä, eli mittauksen aikana tapahtuu sekä plastista että elastista muodonmuutosta. (Brown 2002, 86.)

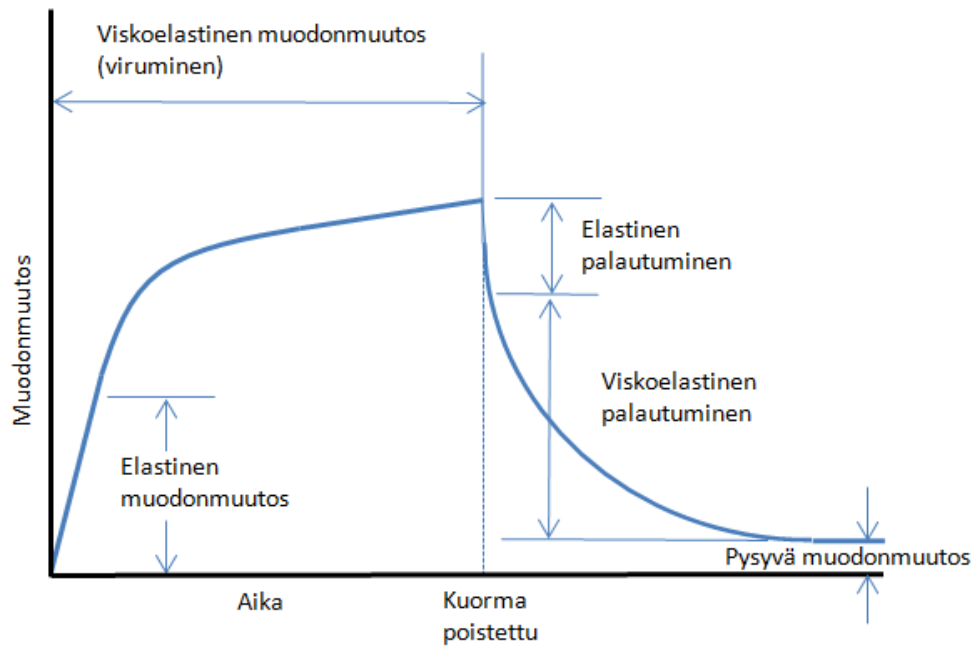
Pehmeiden materiaalien, kuten muovien ja kumien, kovuuden mittaus perustuu samoihin menetelmiin kuin metallien. Pehmeiden materiaalien kovuuden mittauksessa esiintyy kuitenkin muuttujia, joita ei tarvitse ottaa huomioon metalleja testattaessa. Muovien kovuutta testattaessa tulee ottaa huomioon materiaalien viskoelastinen käyttäytyminen. Viskoelastisilla materiaaleilla on otettava huomioon materiaalien taipumus virumiseen kuormitettaessa sekä ajasta riippuvan muodonmuutoksen palautumiseen kuormituksen poistamisen jälkeen. Pehmeät materiaalit kuten polymeerit ovat myös metalleja herkempiä mm. kosteudelle sekä lämpötilalle. (Grellmann 2007, 183; Kuhn ym. 2000, 605.)

Kuviossa 3 on esitetty eri polymeerimateriaalien muodonmuutosten käyttäytymistä kuormitustilanteessa sekä sen jälkeen. Hyvin elastisien materiaalien kuten kumien kohdalla muodonmuutokset tapahtuvat hyvin äkillisesti. Maksimaalinen muodonmuutos saavutetaan nopeasti, ja kuormituksen poistamisen jälkeen muodonmuutokset palautuvat lähes alkutilanteeseen joten tapahtuneet muodonmuutokset ovat

pääasiassa elastisia. Viskoelastisten materiaalin muodonmuutokset ovat vahvasti riippuvaisia ajasta sekä lämpötilasta kuormituksen aikana. Kuormitustilanteen alkaessa tapahtuu äkillistä muodonmuutosta, mikäli kuormitustilannetta pidetään yllä, alkaa materiaalissa tapahtumaan viskoelastista muodonmuutosta toisin sanoen viirumista. Kuormituksen poistamisen jälkeen ilmenee välitöntä elastista palautumista, jonka jälkeen materiaalissa alkaa tapahtua viskoelastista palautumista. Materiaalista riippuen viskoelastisen palautumisen seurauksesta materiaalin muodonmuutokset voivat palautua alkutilanteen tasolle, mutta yleisesti materiaalissa esiintyy myös pysyviä muodonmuutoksia (ks. kuvio 4). Viskoelastisuutta esiintyy kaikilla muoveilla ainakin jollakin asteella. Muovit joilla on vähäinen taipumus viskoelastisille muodonmuutoksille käyttäytyvät erilailla kuin elastiset sekä viskoelastiset materiaalit. Kuormituksen alkaessa muodonmuutokset kasvavat tasaisesti ajan suhteen tiettyyn pisteeseen, jonka jälkeen muodonmuutoksia ei tapahdu kuorman pysyessä samana. Kuormituksen poistamisen jälkeen materiaaliin on muodostunut plastisia eli pysyviä muodonmuutoksia eikä merkittävää viskoelastista palautumista tapahdu. (Grellman & Seidler 2007, 87–88; Rosato & Rosato 2004, 203–204.)

| | Elastiset kumit | Viskoelastiset muovit | Kovat muovit |
|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Materiaalin käyttäytyminen muodonmuutoksen ja ajan suhteen |  |  |  |
| Painauma kuormituksen poistamisen jälkeen |  |  |  |

Kuvio 3. Materiaalin käyttäytymisen ja painauman yhteys (Grellman 2007, 184)



Kuvio 4. Viskoelastinen muodonmuutos (Rosato 2004, 204)

Pehmeiden materiaalien kovuutta mitattaessa tulisikin ottaa huomioon mm. seuraavat vaikuttavat tekijät:

- nimellinen testauslämpötila
- testikuorman saavuttamiseen kulunut aika
- testikuorman pitoaika
- testikappaleen säilytys ja käsittelytila (Grellmann ym.2007, 184–185.).

Se, kuinka suuri merkitys näillä vaikuttavilla tekijöillä on mitattuihin tuloksiin, riippuu hyvin vahvasti mitattavasta materiaalista ja mittausmenetelmästä.

5.2 Tavanomaiset mittausmenetelmät

Yleisimmin käytössä olevat kovuuden mittausmenetelmät polymeereille ovat Rockwell-, Shore-, P&J- sekä Barcol-mittausmenetelmät. Rockwell-mittausmenetelmässä kovuus määritetään painauman syvyyden muutoksen perusteella. Menetelmässä mitataan teräskuulan painautumissyvyys materiaaliin sekä esikuormalla että varsinaisella mittakuormalla. Muovien kovuutta testattaessa yleisimmin käytetyt Rockwell-

mitta-asteikot ovat Rockwell- R, L, M, ja E. Rockwell-kovuudenmittausta käytetään suhteellisen kovien kertamuovien ja kestumuovien mittaamiseen. Kaksivaiheisen kuormituksen takia Rockwell-mittalaitteet ovat jalustamallisia eikä käsikäyttöisiä kannettavia mittalaitteita ole saatavilla muovien mittaukseen.

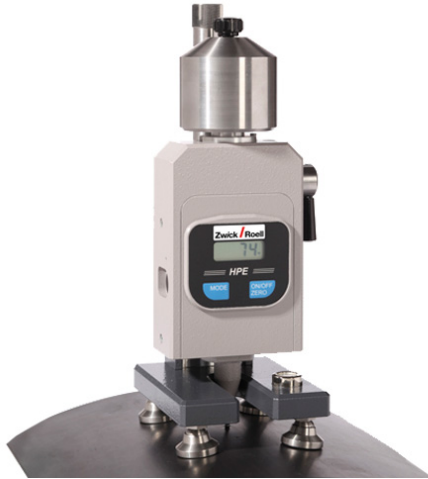
Shore-durometri on kannettava, käsikäyttöinen muovien ja kumien kovuudenmittauslaite, jossa kovuusarvo määritetään jousikuormitetun mittapään painauman syvyyden mukaan. Luvussa 6.1 on tarkemmin esitelty Shore-mittausmenetelmä.

Barcol-kovuuden mittausmenetelmä on niin ikään käsikäyttöinen kannettava mittalaite, jota käytetään lujitemuovien ja muiden jäykkien muovien kovuuden määrittämiseksi. Barcol mittausmenetelmä on esitetty tarkemmin luvussa 6.2.

IRHD (International rubber hardness degrees) -menetelmällä mitataan pehmeiden elastomeerien ja kumien kovuutta pallomaisen painimen tunkeuman avulla. Menetelmä käyttää esikuormitusta, niin sanottua kontaktivoimaa, joka kohdistetaan painimeen. Esikuormituksen aikana mittalaitteen tunkeumaksi asetetaan nolla, minkä jälkeen varsinaista kuormitusvoimaa aletaan lisätä tiettyyn lopulliseen kuormaan, jonka jälkeen tunkeuma mitataan ja kovuusarvo luetaan. Esikuormituksen takia IRHD-mittalaitteita ei voida käyttää käsikäyttöisesti, vaan ne vaativat mittajalustan, johon mittalaite on kiinnitetty ja jossa on oma kuormitusmekanismi. (Kuhn ym. 2000, 558.)

P&J (Pusey & Jones) -menetelmää käytetään kumien ja kumimaisten materiaalien, etenkin kumi- ja kumipinnoitteisten telojen kovuuden mittaukseen. P&J-menetelmä on vanha menetelmä, mutta silti laajassa käytössä sen suhteellisen hyvän tarkkuuden vuoksi. Merkittävänä erona Shore-menetelmään nähden on se, että P&J-laitteessa ei ole paininjalkaa, jota vasten testattava pinta painetaan. Mittalaite mittaa niin ikään mittapään tunkeumaa, mutta muista poiketen pieni P&J- arvo tarkoittaa kovaa materiaalia ja korkea P&J- arvo matalaa kovuutta. Kuormitusvoima tuotetaan 1 kg:n painoisella painolla ja kovuusarvo luetaan 60 sekunnin päästä kuormitusvoiman lisäämisen jälkeen (ks. kuvio 5). P&J-mittauksen heikkoutena on se, ettei mittapään massaa ole määritetty, vaan se vaihtelee eri mittareiden välillä, mikä hankaloittaa tulosten vertailua eri mittalaitteiden kesken. Metsolla on käytössä kumipinnoitetelosten kovuuden mittaukseen Tieto-Oskari Oy:n ja Metson kehittämä Ruben, automaattinen

kovuuden mittauslaite. Laite toteuttaa P&J-standardin mukaisen mittauksen automaattisesti, mikä pienentää ympäristön ja käyttäjän aiheuttamien virhetekijöiden vaikutusta mittaustulokseen. (ks. kuvio 6). (Herrmann 2011, 132.)



Kuvio 5. P&J-mittalaite (Pusey & Jones hardness tester n.d.)



Kuvio 6. Ruben-mittalaite (Ruben 005 kumin kovuuden mittalaite n.d.)

5.3 Kannettavat mittalaitteet

Nykypäivän kustannuspaineet ja korkeat laatuvaatimukset modernissa tuotantoprosessissa vaativat nopeita ja taloudellisia vaihtoehtoja tavanomaisten ns. kiinteiden mittalaitteiden lisäksi. Tavanomaiset mittausmenetelmät kuten Rockwell, Brinell ja

Vickers vaativat, että testikappale tuodaan mittalaitteelle, eivätkä ns. on-site -mittaukset isoille kappaleille ole mahdollisia. Kannettavien kovuusmittauslaitteiden sovellusmahdollisuudet ovat laajat. Niillä voidaan mitata niin suuria kuin pieniä kappaleita ja ennen kaikkiaan niillä voidaan mitata kohteissa, joissa on vaikea luoksepäästävyys. (Frank 2005, 5.)

Kannettavat kovuusmittauslaitteet ovat nousseet pinnalle vasta 90-luvun lopulla kehittyneen teknologian ja digitaalisten instrumenttien avulla. Tällä hetkellä laajemmassa käytössä on kaksi fysikaalista menetelmää, dynaaminen kimmahdusmenetelmä (Leeb/Rebound) ja staattinen UCI (Ultrasonic Contact Impedance) ultraäänimenetelmä. Nämä kaksi menetelmää on suunniteltu pääasiassa metallien kovuuden mittaukseen eivätkä ne sovellu samoilta osin pehmeille polymeerimateriaaleille. Kyseisillä menetelmillä päästään luotettavuudeltaan ja toistettavuudeltaan hyvin lähelle laboratorio oloissa suoritettuja mittauksia, mikäli mittaukset suoritetaan oikein, menetelmille soveltuville materiaaleille.

Pehmeiden materiaalien kuten kumin ja muovin kohdalla vastaavanlaisia tarkkoja vakiintuneita menetelmiä ei ole vielä kehitetty. Pehmeiden materiaalien kohdalla laajassa käytössä ovat perinteiset viisari ja digitaaliset Shore durometrit sekä Barcolmittalaitteet. Näiden mittalaitteiden tarkkuus, luotettavuus ja toistettavuus ovat kuitenkin huomattavasti alhaisempia verrattuna kehittyneisiin metalleille suunniteltuihin kimmahdus- ja ultraäänimenetelmiin nähden. Joidenkin valmistajien mukaan tietyt UCI-menetelmään perustuvat mittalaitteet soveltuvat osin myös tietyille muoveille, mutta esimerkiksi komposiittien kohdalla soveltuvuutta ei ole vahvistettu. Uutena innovaationa kovuuden mittauslaitteiden alalle on noussut Krautkrämerin kehittämä TIV (Through Indenter Viewing) -optinenmenetelmä, joka valmistajan mukaan on riippumaton testattavan kappaleen koosta ja materiaalista. Vähäisten tutkimusten ja kokemusten takia menetelmän soveltuvuudesta polymeerien ja etenkin komposiittien osalle ei ole vahvistettu, eivätkä laitteen edustajat suosittele sen käyttöä komposiittimateriaaleille. (Frank 2005, 5;10; Karumaa 2013.)

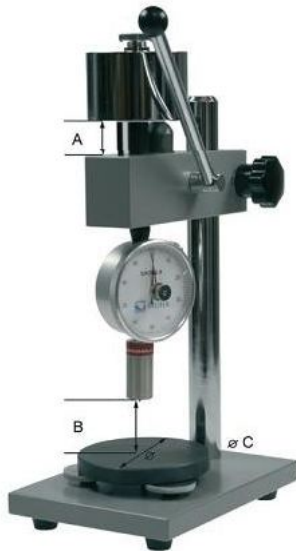
6 Komposiittipinnoitteiden kovuuden mittausmenetelmät

6.1 Shore-durometri

Komposiittipinnoitteiden kovuudenmittauksessa liikutaan haasteellisella alueella. Komposiittimateriaalien kovuuden avulla ei varsinaisesti todenneta mitään tiettyä materiaalin ominaisuutta, vaan kertamuovikomposiittien kovuuden mittausta käytetään pääasiassa hartsin kovettumisasteen määrittämiseen. Käytetyimmät menetelmät komposiittien kovuuden määrittämisessä ovat Barcol-, Shore- ja Rockwell-menetelmät.

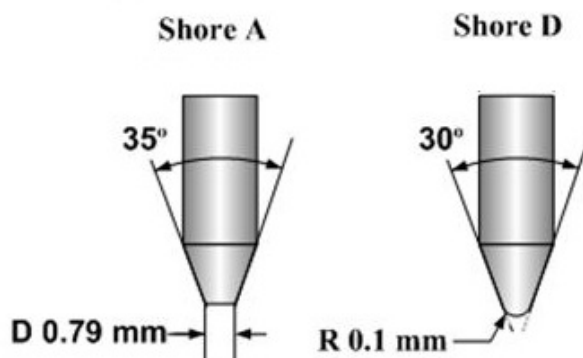
Shore-durometrit ovat yleisimmin käytettyjä mittalaitteita mittaamaan muovien ja kumien kovuutta. Kuten monissa muissakin mittausmenetelmissä, myös Shore-menetelmästä on olemassa useita eri mitta-asteikoita eri materiaaleille. Yleisimmin käytössä ovat standardisoidut (ISO 868) Shore A ja Shore D.

Durometri on kompakti, käsikäyttöinen mittalaite, jossa standardin mukainen mittapää painetaan mitattavan materiaalin pintaan. Kovuusarvo määritetään painamalla painimen jalka (ks. kuvio 9.) tukevasti testattavan kappaleen pintaan. Painin on yhdistetty lineaariseen mittauslaitteeseen, joka mittaa painauman syvyyden, joka tämän jälkeen muunnetaan joko mekaanisessa tai elektronisessa järjestelmässä Shore-arvoksi. Shore-arvo ilmoitetaan välillä 0–100, lukematarkkuuden ollessa mittalaitteesta riippuen 0,1–1 Shoren välillä. Mitä kovempi materiaali on, sitä suurempi saatu lukema on. Kovuusarvo 100 osoittaa mittapään tunkeuman olevan nolla eli kyseessä on menetelmään nähden hyvin kova aine. Tunkeumakovuus on kääntäen verrannollinen tunkeumaan ja riippuvainen materiaalin kimmomoduulista ja viskoelastisista ominaisuuksista. Mittausten toistettavuuden parantamiseksi durometri voidaan asettaa sille suunniteltuun mittapenkkiin, joka mahdollistaa tasaisemman ja kohtisuoran kuormituksen (ks. kuvio 7). (Brown 2007, 87–88; SFS-EN ISO 868.)



Kuvio 7. Mekaaninen Shore -durometri ja mittapenkki (Sauter TH- D Manual hardness test stand n.d.)

Shore A -menetelmä soveltuu pehmeille muoveille ja kumeille, kun taas Shore D -menetelmä soveltuu kovempien muovien mittaamiseen. Shore A- ja Shore D -durometrien eroavaisuudet löytyvät kuormitusjousen voimasta sekä painimen muodosta. Shore A duometreissä kartiomainen mittapää on katkaistu, kun taas Shore D -mittapää on hieman terävämpi sekä kärjestä pyörästetty (ks. kuvio 8). D-tyypin durometria suositellaan käytettäväksi, kun A-tyypin durometrin lukema on yli 90, ja A-tyypin durometria, kun D-tyypin durometrin lukema on alle 20. (Kuhn ym. 2000, 554–558.)



Kuvio 8. Shore A- ja D-mittapäät (Kopeliovich n.d.)



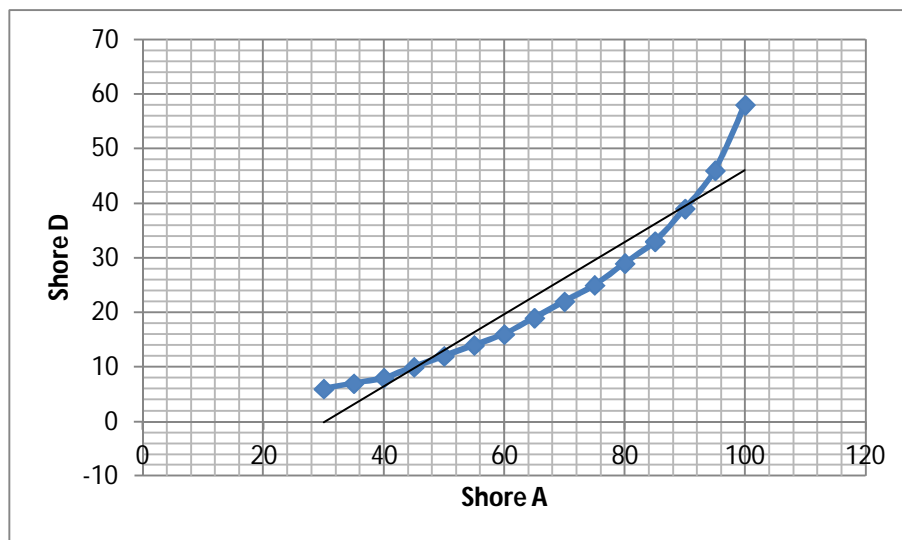
Kuvio 9. Digitaalinen Shore D -durometri (Shore D -kovuusmittarit n.d.)

Durometriä käytettäessä tulisi huomioida, että mittapään muoto, painamiseen käytetty voima ja kuormituksen kestoaika vaikuttavat saatuihin tuloksiin. Testattavan kappaleen tulisi olla vähintään 4 mm paksuja ja mittaukset tulisi suorittaa vähintään 9 mm päässä kaikista reunoista. Eri mittausten välinen etäisyys toisistaan tulisi olla vähintään 6 mm:ä. Mittauksia tulisi suorittaa vähintään viisi, joiden keskiarvo on ilmoitettu kovuusarvo. (Herrmann 2011, 121–124; ISO 868:2003; Kuhn ym. 2000, 554–558.)

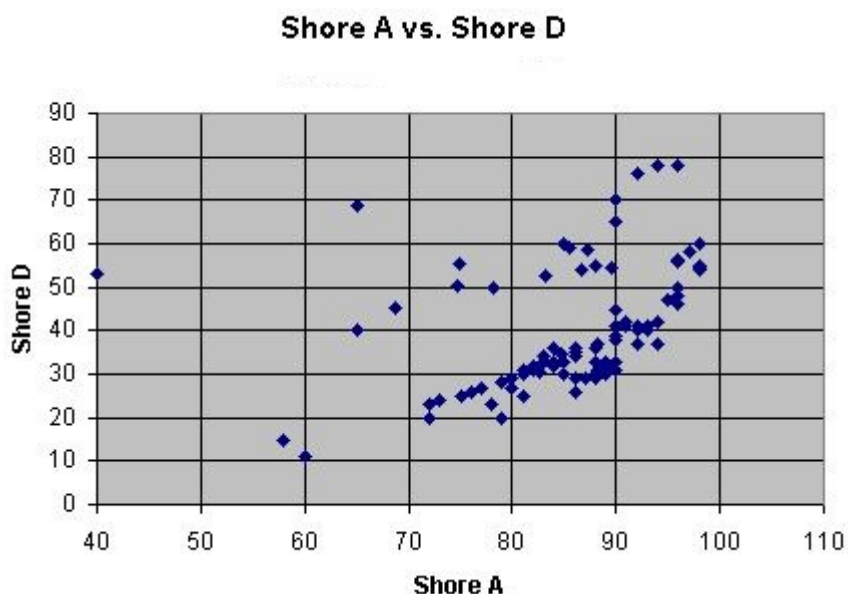
Mittausarvon lukemisen suhteen on eroavaisuuksia kansainvälisen ISO standardin sekä Yhdysvalloissa käytössä olevan ASTM (American Society for Testing and Materials) standardin välillä. ISO 868 Standardi suosittelee, että mittauslukema luetaan mittalaitteesta n. 15 sekunnin kuluttua paininjalan kosketuksesta, kun taas ASTM suosittelee että mittauslukema luetaan noin 1 sekunnin kuluttua paininjalan kosketuksesta materiaalin pintaan. Mikäli durometri mahdollistaa olisi suositeltavaa ottaa ylös molemmat lukemat, sillä mittausajan kasvaessa 1 sekunnista 15 sekuntiin on odotettavissa alhaisempia kovuusarvoja, materiaalin viskoelastisuudesta johtuen. Lukemat onkin suositeltavaa ilmoittaa muodossa Shore-kovuus D/15:45, jossa D on durometrin tyyppi, 15 on aika sekunteina siitä, kun paininjalka on tuotu kiinteään

kosketukseen koekappaleen kanssa, siihen, kun, lukema on luettu, ja 45 on saatu kovuusarvo. (Herrmann 2011, 121–124; ISO 868:2003; Kuhn ym. 2000, 554–558.)

Shore-mittausmenetelmä tulokset ovat ns. empiirisiä kovuusarvoja, jotka eivät korreloi kovin hyvin materiaalin muiden perusominaisuuksien kanssa, eikä sitä näin ollen tulisi käyttää yksinään materiaalin ominaisuuksien arvioinnissa. Korrelaatio suhde eri polymeerimateriaalien ja Shore A- sekä Shore D -arvojen välillä on varsin heikko, joten mikäli vertailutaulukoita käytetään, tulisi niiden paikkaansa pitävyyttä testata empiirisesti materiaali kohtaisesti. Yleisesti Shore A- ja Shore D -arvoja voidaan verrata keskenään kuvion 10 mukaisesti, mutta kuten kuvio 11 osoittaa, kun samaan taulukoon otetaan mukaan useita eri polymeerimateriaaleja, on vertailu lähes mahdotonta. Tutkimusten mukaan korrelaatio on suurempi materiaaleilla, joilla on samankaltaiset kimmoiset ominaisuudet, mutta silti saadut tulokset eivät ole tarpeeksi luotettavia, jotta suoria vastaavuuksia voitaisiin osoittaa.



Kuvio 10. Shore A/D vastaavuustaulukko



Kuvio 11. Korrelaatio eri polymeerimateriaalien välillä (Shore Hardness Testing of Plastics n.d.)

Durometrit tulisi testata aina ennen suoritettavia mittauksia eri kovuuksien testipalojen avulla toimiiko mittalaite asianmukaisesti sekä tarkistaa durometrin nolla-asetus. Durometrin antama lukema tulisi täsmätä testipalassa ilmoitetun lukeman kanssa. Oikea lukema ei välttämättä kerro, että mittalaite on kalibroitu, vaan tietyn aikavälein durometri tulisi kalibroida standardin mukaisen menetelmän mukaan tai akkreditoitussa kalibrointilaboratoriossa. Durometri suositellaan kalibroitavan vähintään kerran vuodessa. Durometrin käyttö mitta-asteikon ääripäissä (alle 20 ja yli 90) ei ole suositeltavaa, vaan esimerkiksi alle 20 (ShD) Shore D -arvot tulisi mitata Shore A -durometrilla, ja yli 90 ShD arvot tulisi mitata muilla mittausmenetelmillä kuten Barcol-menetelmällä. (Kuhn ym. 2000, 557–558.)

6.2 Barcol-kovuus

Barcol-kovuus on lujitemuovien ja muiden jäykkien muovien mittausmenetelmä. Barcol-mittalaitteen jousikuormitteinen kartiomainen katkaistu mittapää painetaan testattavan kappaleen pintaan 4–7 kg kuormalla, minkä jälkeen mittakellon lukema osoittaa Barcol-kovuusarvon. Mittakellon asteikko on 0–100, yksi jako-osa esittää 0,0076 mm:n painauma. Mitä korkeampi Barcol-lukema on, sitä kovempaa materi-

aali on. Barcol-mittausta käytetään sellaisten kovien kesto- ja kertamuovien kovuuden määrittämiseen, jotka ovat liian kovia Shore D -menetelmälle. Mitattavien näytteen tulee olla vähintään 1,5 mm paksuja ja mittaukset tulee suorittaa vähintään 3 mm:n päästä kappaleen reunoista sekä muista mittauskohdista. Lujitemuovien Barcol- kovuuslukemien vaihtelu on suurempi kuin homogeenisten materiaalien (ks taulukko 1). Vaihtelu johtuu pääasiassa hartsin ja lujitteen välisistä kovuuseroista. Tämä vaihtelu on pienempää materiaaleilla, joiden kovuus on yli 50 Barcolia (Hba). Luotettavampien tulosten saamiseksi lujitemuoveja mitattaessa tulisi testikappaleesta mitata 12 eri mittausta, joista suurin ja pienin arvo jätetään huomioimatta ja lopullinen kovuusarvon on jäljellä olevien 10 mittauksen keskiarvo. (DIN EN 59/ SFS 3912:1982)

Barcol-mittalaitteella (ks. kuvio 12, 13) mitattaessa mittapää tulee sijoittaa mittauksissa samalle tasolle Barcol-laitteen tukijalkojen kanssa, jotta varmistutaan mittapään kohtisuoruudesta testattavan kappaleen pintaan nähden. Koestuspää ei saa liukua eikä raapia tutkittavaa pintaa. Ennen mittausta tulisi varmistaa, että mittakellon lukema näyttää nollaa ja ettei mittakärki ole vahingoittunut, sekä tarkistaa mittalaitteen lukema testipalojen avulla. (The Impressor Hand-Held Portable Hardness Tester 2002, 2–4.)



Kuvio 12. Mekaaninen Barcol-mittalaite (The Impressor Hand-Held Portable Hardness Tester n.d.)



Kuvio 13. Digitaalinen Barcol-mittalaite (Barcol hardness tester HPE II n.d.)

Taulukko 1. Suositeltavien mittausten lukumäärä Barcol-kovuutta määritettäessä (SFS 3912:1982)

| Kovuus M-934:n asteikolla | Lukemien varianssi | Variaatiokerroin | Keskiarvoestimaatin varianssi | Mittausten vähimmäismäärä |
|------------------------------------|--------------------|------------------|-------------------------------|---------------------------|
| Homogeeninen aine | | | | |
| 20 | 2,47 | 2,6 | 0,27 | 9 |
| 30 | 2,2 | 1,7 | 0,28 | 8 |
| 40 | 1,93 | 1,3 | 0,27 | 7 |
| 50 | 1,66 | 1,1 | 0,28 | 6 |
| 60 | 1,39 | 0,9 | 0,28 | 5 |
| 70 | 1,12 | 0,8 | 0,28 | 4 |
| 80 | 0,85 | 0,7 | 0,28 | 3 |
| Epähomogeeninen aine (lujitemuovi) | | | | |
| 30 | 22,4 | 2,9 | 0,77 | 29 |
| 40 | 17,2 | 2,2 | 0,78 | 22 |
| 50 | 12 | 1,7 | 0,75 | 16 |
| 60 | 7,8 | 1,5 | 0,78 | 10 |
| 70 | 3,6 | 1,2 | 0,75 | 5 |

Barcol-menetelmän merkittävänä heikkoutena on se, ettei Barcol-menetelmän sekä muiden vastaavanlaisten kovuusmittausmenetelmien väliltä löydy vastaavuus- tai vertailutaulukoita. Syynä tähän lienee se ettei, lujitemuovien kovuutta mitattaessa yleisesti pyritä selvittämään materiaalin pinnan ominaisuuksia, vaan hartsin kovet-

tumisen astetta. Hartsin kovettuessa, lujitemuovin kovuus kasvaa, kun kovuuden kasvu pysähtyy, voidaan kovettumisreaktio katsoa valmiiksi.

7 Mittausmenetelmän valinta

Mittausmenetelmän valinta on melko yksinkertaista, mikäli mittaukset suoritetaan koostumukseltaan homogeeniselle materiaalille, joka ovat vähintään 3 mm paksu, tasainen ja muodoltaan yksinkertainen. Käytännössä mittausmenetelmää valittaessa tulee ottaa huomioon useita tekijöitä, jotka vaikuttavat merkittävästi saatuihin tuloksiin. Tällaisia tekijöitä ovat mm:

- kovuustaso, (asteikko rajoitukset)
- testattavan kappaleen paksuus,
- testattavan kappaleen koko ja muoto,
- testattavan kappaleen pinnanlaatu,
- testattavan kappaleen materiaali,
- painimen sijainti,
- tuotantomäärät.

(Kuhn ym. 2000, 568.)

Mittausmenetelmää valittaessa on tärkeää valita oikea mitta-asteikko, saavutettavakseen luotettavuudeltaan ja toistettavuudeltaan hyvät tulokset. Mitta-asteikon valintaan vaikuttaa mitattava materiaali ja sen oletettu kovuus. Luotettavien tulosten saamiseksi olisi suositeltavaa, että asteikko valitaan siten, että saadut tulokset asetuvat mahdollisimman lähelle asteikon puoliväliä. Testattavan kappaleen tulee olla myös tarpeeksi paksu, etteivät kuormitusvoimasta aiheutuvat muodonmuutokset pääse vaikuttamaan materiaalin toiselle puolelle. Standardisoitujen menetelmien standardit määrittävät minimiaineenpaksuudet joita menetelmällä voidaan mitata, tietyillä kuormitusvoimilla. (Kuhn ym. 2000, 568–569.)

Testattavan kappaleen muoto ja koko vaikuttavat merkittävästi siihen, mitä menetelmiä mittaajalla on käytössä. Esimerkiksi suuret kappaleet vaativat mittausmene-

telmää, jossa mittalaite on mahdollista tuoda kappaleen luokse. Kannettavat mittalaitteet on suunniteltu juuri tällaisia tapauksia varten, jossa kappaleen kuljettaminen mittauslaboratorioon on hankalaa tai mahdotonta. Testattavat kappaleet voivat olla myös muodoltaan sellaisia, että ne vaativat mittapenkin lisäksi erilaisia tukijalustoja, johon kappale voidaan kiinnittää tukevasti. Pieniä sylinterimäisiä kappaleita mitattaessa erilaisten tukijalustojen lisäksi on määritetty ns. korjauskertoimia, jotka ottavat huomioon sylinterimäisen muodon vaikutuksen saatuihin kovuusarvoihin. Ideaali tilanteessa testattava kappale olisi täysin tasainen ja vaakasuorassa, jossa mittapää painautuu kappaleen pintaan kohtisuorassa. Kaikkia menetelmiä käytettäessä tulisi mittapään painautua mahdollisimman kohtisuorassa testattavaan pintaan nähden. Tietyt mittausmenetelmät vaativatkin hyvin kohtisuoran painimen liikkeen luotettavien tulosten saamiseksi. (Kuhn ym. 2000, 575–576.)

Mitattavan kappaleen materiaali ja pinnanlaatu vaikuttavat mitä mittausmenetelmää voidaan soveltaa tietylle kohteelle. Mitä parempi pinnanlaatu on, sitä tarkempia tuloksia saadaan aikaan mittausmenetelmästä riippumatta. Kaikissa tapauksissa ei ole mahdollista suorittaa mittauksia, jossa testattavan materiaalin pinta on hiottu sekä kenties kiillotettu. Näissä tapauksissa tulisi valita mittamenetelmä, jossa käytetään isompia painimia ja suurempia kuormitusvoimia. (Kuhn ym. 2000, 591.)

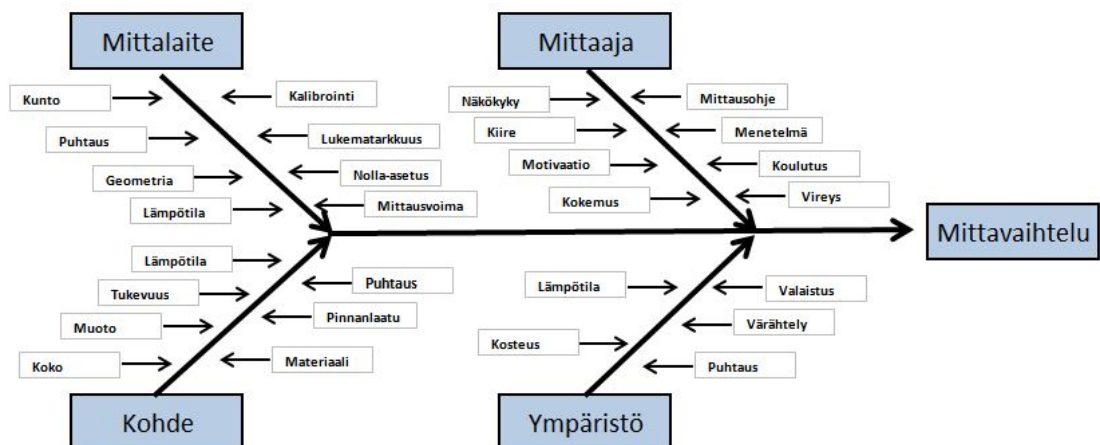
Työn kannalta merkittävimmät tekijät mittausmenetelmän valinnassa ovat kappaleen materiaali ja koko. Kappaleen materiaali ja koko rajaavat useat tavanomaiset mittausmenetelmät pois, sillä mittaukset tulee pystyä suorittamaan tuotantotiloissa kappaleen luona, polymeerimateriaaleille soveltuvalla mittausmenetelmällä. Näin ollen komposiittipinnoitteisien kalanteritelojen kovuuden määrittämiseksi käytettäviksi menetelmiksi jää Shore D- sekä Barcol-menetelmä.

8 Mittausepävarmuus

8.1 Mittausepävarmuus kovuuden mittauksessa

Minkä tahansa prosessin lopputuloksen kelvollisuutta ja vaihtelua voidaan arvioida mittaamalla. Mittaamisen ongelmana on, että tarkallakin menetelmällä saadaan selvitettyä vain mittauskohteen likiarvo. Prosessin mittaamalla havaittu vaihtelu sisältää siis myös mittausprosessin vaihtelua. Mitä parempi mittausjärjestelmän suorituskyky on sitä, luotettavampi ja todellisempi kuva prosessista saadaan mittaamalla. (Salomäki 1999, 117.)

Kovuuden mittaukset ovat suhteellisen helppoja suorittaa, mikäli mittaukseen vaikuttavat epävarmuustekijät on otettu huomioon. Epävarmuustekijät voidaan jakaa neljään eri ryhmään, jotka vaikuttavat saatuihin mittauksituloksiin. Nämä tekijät liittyvät mittaajaan, mittavälineeseen, mitattavaan kohteeseen sekä mittausympäristöön (ks. kuvio 14.). Mittausten kannalta onkin tärkeää, että jatkuvasti pyritäisiin eliminointaan, minimoimaan tai edes ottamaan huomioon kyseiset tekijät. (Guidelines on the Estimation of Uncertainty 2011, 4–7.)



Kuvio 14. Mittavaihteluun vaikuttavat tekijät (Hiltunen, E., Linko, L., Hemminki, S., Hägg, M., Järvenpää, E., Saarinen, P., Simonen, S. & Kärhä, P. 2011, muokattu)

Tärkein lähtökohta mittaajalla on valita oikea mittausmenetelmä tiettyä sovellusta varten. Mittaajalla tulisi olla hyvä käsitys siitä miten mittalaite toimii ja miten sitä

käsitellään. Mittaajan tulisi olla myös tietoinen tekijöistä, jotka vaikuttavat mittaus-epävarmuuteen. Mittaajan tulee käsitellä mittalaitetta laadittujen ohjeiden mukaisesti, sekä huolehtia, ettei mittauksia suoriteta liian lähellä toisiaan tai liian lähellä kappaleen reunoja. Mittaajan tulee myös tiedostaa mittausmenetelmän pinnanlaatuvaatimukset, sekä tarvittava testikappaleen tuenta mittauksen aikana. Mitä vaativammista mittauskohteista on kyse, sitä enemmän mittaajan koulutuksella ja kokemuksella on vaikutusta saatujen mittaustulosten tarkkuuteen sekä luotettavuuteen. (Guidelines on the Estimation of Uncertainty 2011, 7; Lindegren 2010, 9.)

Mittalaitteella saadut tulokset ovat likiarvoja. Mittaus ei koskaan voi olla tarkempi, kuin se epävarmuus, jolla mittalaite on kalibroitu. Mittalaitteen suunnittelulla, sen oikeaoppisella käytöllä ja kunnolla on merkittävä vaikutus tuloksiin. Mikäli mittalaite on suunniteltu hyvin mittalaitteessa ja mahdollisessa mittapenkissä ei mittaushetkellä tapahdu rakenteellisia muutoksia, eikä testikuorma vaihtelee eri mittausten välillä. Käytettävien mittapäiden tulee olla vaatimusten mukaisia eikä niissä saa olla merkkejä ulkoisista vaurioista. Mittalaite ja mittapää tulisi tarkistaa sekä kalibroida säännöllisesti, jotta mittalaitteesta aiheutuvat poikkeamat voitaisiin minimoida. (Guidelines on the Estimation of Uncertainty 2011, 6; Lindegren 2010, 9; Hiltunen 2011, 39.)

Testattavalla materiaalilla on merkittävä vaikutus mittauksen epävarmuuteen. Mittausmenetelmä tulee valita oikein testattavan materiaalin sekä kappaleen paksuuden mukaan. Mitä syvempi mittapään aiheuttama painauma on, sitä paksumpi testattavan materiaalin tulisi olla, eikä testattavan kappaleen kääntöpuolella saa näkyä mittauksen jälkeen merkkejä muodonmuutoksista. Kappaleen pinnanlaadulla on myös merkittävä vaikutus saatuihin tuloksiin. Toiset mittausmenetelmät vaativat parempaa pinnanlaatua kuin toiset. Karkeapintaiset materiaalit vaativat isompia kuormitusvoimia ja/tai isompia mittapäitä. Mittausmenetelmässä käytettävän mittapää sekä sen muoto vaikuttavat siihen kuinka hyvän pinnanlaadun mittaus vaatii. Toistettavuuden kannalta on myös tärkeää, että testattavan kappaleen pinta olisi puhdas, eikä siinä olisi rasvaa, ylimääräisiä partikkeleja tai pölyä. Tarkkojen mittaustulosten kannalta on tärkeää, että testattava materiaali olisi mahdollisimman homogeenistä eli yhtenäistä. Näin ollen minimoidaan materiaalin koostumuksesta aiheutuva mittaustulosten hajonta. Suurilla kuormitusvoimilla testattaessa tulee ottaa huomioon myös

alustan ja testikappaleen tuenta ja jäykkyys. (Guidelines on the Estimation of Uncertainty 2011, 4; Lindegren 2010, 10.)

Ympäröivällä lämpötilalla voi olla merkittävä vaikutus kovuus mittauksen tuloksiin. Etenkin hyvin pehmeitä materiaaleja mitattaessa kappaleen lämpötilalla ja ympäröivällä lämpötilalla on vaikutusta saatuihin tuloksiin. Tietyillä materiaaleilla on huomioitava myös kosteuden vaikutus materiaaliin sekä saatuihin mittaustuloksiin. Standardisoidut mittaussuunnitelmat määrittelevät missä lämpötiloissa mittaukset tulisi suorittaa. Karkeana lämpötila-alueena voidaan pitää 18–24 °C:sta. Ympäristön tärinät ovat myös yksi epävarmuustekijä, varsinkin tarkoilla pienillä kuormitusvoimilla käytävillä mittaussuunnitelmissä. Hyvin pieniä voimia käyttävät mikrokovuus ja nanokovuus mittaussuunnitelma vaativat usein täysin tärinättömän ympäristön. (Guidelines on the Estimation of Uncertainty 2011, 6; Lindegren 2010, 9.)

8.2 Ongelmat Shore kovuuden mittauksessa

Paperiteollisuudessa on pitkään ollut käytäntönä mitata kalanteriteloissa käytettävien komposiittipinnoitteiden kovuuksia Shore- mittaussuunnitelmallä. Käytäntö on vakiintunut niin asiakkaiden kuin valmistajien keskuudessa. Ongelmana Shore- mittaussuunnitelmissä on se, ettei menetelmää ole alun perin suunniteltu kovien komposiittipinnoitteiden kovuuden määrittämiseen.

Shore-durometrit ovat pääasiassa käsikäyttöisiä mittalaitteita, joiden manuaalisuus lisää merkittävästi mittaajasta aiheutuvia epävarmuustekijöitä kovuuden mittauksessa. Ilman testijalustaa suoritettavissa mittauksissa durometrin asento, kuormitusvoima sekä kuormitusnopeus vaihtelevat eri mittauksien välillä, mikä aiheuttaa tulosten hajontaa. Yksi yleisimmistä syistä ristiriitaisien kovuusarvojen saamiseksi eri mittaajien kesken, on vaihtelu nopeudessa, jolla durometri painetaan testattavan kappaleen pintaan. Mikäli durometri painetaan liian nopeasti testattavan kappaleen pintaan, saattaa durometrin antama kovuusarvo olla tietyillä, varsinkin pehmeillä materiaaleilla virheellisen suuri. Ilmiö johtuu siitä, että polymeerimateriaalin reagointi ulkoiseen tekijään molekyyllitasolla tapahtuu viiveellä. Mikäli ulkoisen tekijän aiheuttama muodonmuutos on ajallisesti lyhyt ja nopea, molekyylit eivät ehdi hakeutu-

maan uuteen tasapainotilaan, ja näin ollen polymeerimateriaali käyttäytyy kuin sen kovuus olisi suuri. Toisaalta durometri voidaan painaa myös liian hitaasti kappaleen pintaan, jolloin mittapää pääsee painautumaan materiaaliin ennen kuin paininjalka on vaadittavassa kontaktissa materiaalin pinnan kanssa, mikä voi johtaa liian alhaisiin tuloksiin. Vastaavanlaisia eroja mittaustuloksissa aiheutuu, mikäli mittausaika vaihtelee merkittävästi eri mittausten välillä. Mikäli mittausaikaa lasketaan standardinmukaisesta 15 sekunnista 3 sekuntiin, on odotettavissa, että saadut tulokset ovat korkeampia. Ilmiöön vaikuttaa polymeerimateriaalien viruminen ja edellä mainittu molekyyliä viiveellinen reagointi. (Kuhn ym. 2000, 557–558.)

Mittapenkit ja jalustat on kehitetty pääasiassa eliminoimaan virheet, joita syntyy, kun mittapää ei painaudu materiaalin pintaan kohtisuorassa. Mittapenkeihin on saatavissa painoja (ks. kuvio 7, s. 22), joilla pyritään varmistamaan tasainen vakiokuormitus, jolla durometriä painetaan materiaalin pintaan. Mittapenkeissä on normaalisti myös mekanismi, joka varmistaa tasainen nopeuden, jolla durometri painetaan materiaalin pintaan. Mekanismin avulla pyritään eliminoimaan mittaajasta aiheutuvaa virhettä, joka aiheutuu liian nopeasta tai liian hitaasta durometrin kuormituksesta. (Kuhn ym. 2000, 557–558.)

Mittausmenetelmänä Shore-kovuus ei ole kovin tarkka. Uusien digitaalisten durometrien lukematarkkuudet ovat 0,1 ShD, mutta itse mittareille luvataan parhaimmillaan tarkkuudeksi $\pm 0,5\text{--}1$ ShD. Kun käytettävien mittareiden karkea asteikko yhdistetään siihen, että koko asteikon laajuus on vain 100 Shore-yksikköä, on eri tekijöiden aiheuttama mittausepävarmuus prosentuaalisesti melko suuri. Durometrit ovat valmistajasta riippuen rakenteeltaan hyvin erilaisia, toiset ovat helpompia ja käyttäjäystävällisempiä käsitellä kuin toiset. Erilaisten mittareiden välillä samasta testikappaleesta mitattujen kovuusarvojen vaihtelu voi olla merkittävä, varsinkin käsinmittauksessa.

8.3 Ongelmat komposiittipinnoitettujen telojen kovuuden mittauksessa

Komposiittipinnoitettujen telojen kovuuden mittauksen ongelmallisuutta lisää telojen suuri koko. Mittalaittevalmistajien suunnittelemat testijalustat, joilla voidaan vähentää mittaajasta aiheutuvia virhetekijöitä, on suunniteltu pienille testikappaleille, eikä niiden käyttäminen suoraan telojen pinnalla ole mahdollista. Tällä hetkellä laadunvarmistuksessa suoritettavat mittaukset joudutaan tekemään manuaalisesti käyttäisillä Shore-durometreillä, joten mittaajasta ja mittalaitteesta aiheutuva mittaus tulosten hajonta on liian suuri. Näin ollen on vaikeaa arvioida kuinka suuri osa hajonnasta aiheutuu itse pinnoitusprosessista ja kuinka suuri osa hajonnasta aiheutuu mittaustapahtumasta.

Oman haasteensa mittauksille asettaa itse materiaali. Komposiittipinnoite koostuu pääasiassa kahdesta eri komponentista, matriisimuovista (epoksihartsi) ja lujitekuidusta (lasikuitu). Kun kyseessä on kaksi aivan erilaista materiaalia, ei materiaaliyhdistelmä ole koskaan täysin homogeenista, vaan materiaalikoostumus vaihtelee eri kohdissa telan pintaan ja aiheuttaa mittauksissa hajontaa. Kahden eri pääkomponentin lisäksi komposiitti koostuu useista eri täyteainesta, joilla parannetaan tiettyjä materiaalin ominaisuuksia. Parametrien monilukuisuuden vuoksi samoistakin materiaaleista valmistettujen komposiittien ominaisuudet voivat vaihdella huomattavasti laajemmissa rajoissa kuin esim. metalliseosten ominaisuudet. Materiaalin epähomogeenisuus vaikeuttaa myös epävarmuustekijöiden arviointia. Epähomogeenisuuden takia ei voida olla täysin varmoja, johtuuko mittaustulosten hajonta itse materiaalista vai mittaustapahtumasta.

Merkittävä haaste komposiittipinnoitettujen telojen kovuuden mittauksessa on jo aikaisemmin esitetty seikka, ettei sovellusta varten löydy optimaalista mittaussuunnitelmaa. Tällä hetkellä käytössä oleva Shore-mittausmenetelmä on suunniteltu alun perin pehmeimmille elastisille materiaaleille. Suositusten mukaan yli 90 ShD -arvoja ei tulisi mitata enää kyseisellä menetelmällä, mutta komposiittipinnoitteiden kovuudet kalanteriteloissa vaihtelevat nykyisin noin 90–95 ShD välillä. Tässä suhteessa Barcol-mittausmenetelmän asteikko olisi parempi, mutta Shore-menetelmän suora korvaaminen on hankalaa sen laajan käytön takia.

9 SPC - Tilastollinen prosessin valvonta

9.1 SPC:een perusajatus

Tilastollinen prosessin valvonta (statistical process control, SPC) pyrkii selvittämään, eliminoimaan ja hallitsemaan prosesseissa ilmenevää hajontaa. Lähtökohtana on tietoisuus siitä, että kaikissa prosesseissa esiintyy vaihtelua, jota ei voida täysin poistaa. Tilastollinen prosessinvalvonta ei pyri asettamaan täsmällisiä rajoja prosesseille, vaan hyväksyy vaihtelun normaaliksi osaksi prosesseja. SPC on laadun kehittämistä ja tuotantoprosessin taloudellista ohjaamista varten kehitetty työkalu, joka pyrkii erottamaan prosessissa vaihtelua aiheuttavat satunnais- ja erityisyyt, sekä poistamaan prosessissa ilmenevät erityisyyt. Satunnaissyyt eli yleistä vaihtelua aiheuttavat syyt ovat prosesseissa jatkuvasti läsnä ja syiden yhteisvaikutus näkyy prosessin luonnollisena vaihteluna. Erityisyyt ovat lähtöisin prosessin ulkopuolelta ja ilmenevät prosessissa ajoittain. Erityisyyt aiheuttavat satunnaissyitä enemmän vaihtelua ja niiden löytäminen ja poistaminen prosessista tuo taloudellista hyötyä. (Shewhart 1931, 8–18; Salomäki 1999, 172–173.)

Prosessin katsotaan olevan hallinnassa, jos prosessin ulostulon käyttäytymistä voidaan ennustaa aiemman käyttäytymisen perusteella, ulostulo on normaalisti jakautunutta eikä siihen vaikuta erityisyyttä. Normaalijakauma on yleisin jakauma, ja useimmat luonnolliset tapahtumat pyrkivät jakautumaan normaalijakauman mukaan. Prosessi on huonosti säädetty, mikäli mittausdatan keskiarvo poikkeaa tavoitearvoista, ja mikäli data ei ole normaalisti jakautunutta tällöin prosessiin vaikuttaa joitain erityisyyttä. Mikäli jakauma ei mahdu asetettujen toleranssien sisään, prosessi ei ole suorituskykyinen verrattuna määritettyihin vaatimuksiin nähden. Keskeinen työkalu prosessin kuvauksessa ja kehityksen tarkastelussa on valvontakortit, joiden avulla arvioidaan prosessin käyttäytymistä ja suoriutumista. Valvontakorttien tarkoitus on mitata ja vähentää prosessivaihteluita sekä erotella satunnais- ja erityisyyt toisistaan. (Shewhart 1931, 6; Salomäki 1999, 174.)

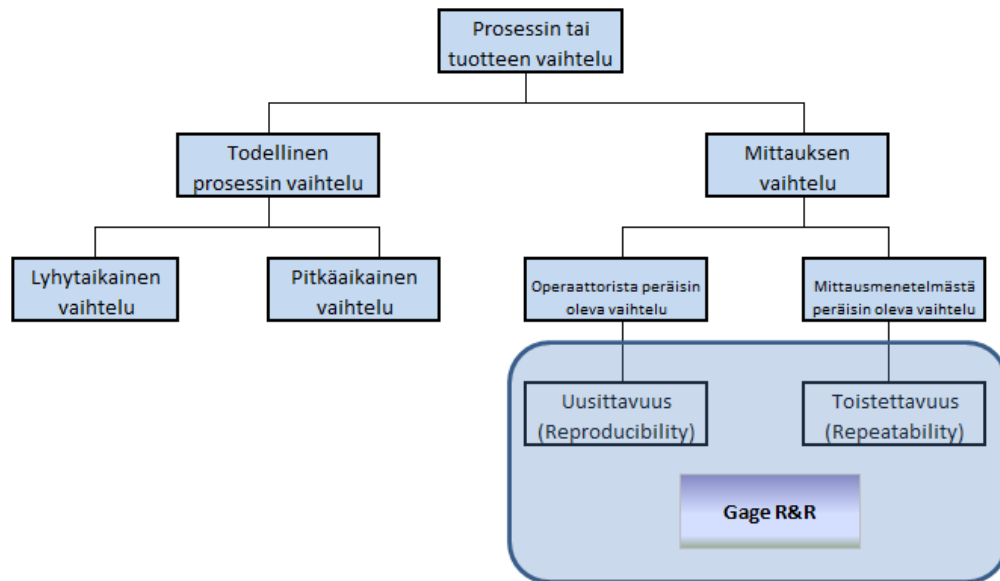
Tilastollinen prosessinohjaus perustuu tilastolliseen, pitkäjänteiseen analysointiin ei niinkään yksittäisiin mittauksiin. Tilastollisella tarkkailulla voidaan havaita onko pro-

sessi poissa ohjauksesta, mutta erityisyyden lähteitä tarkkailu ei paljasta, vaan niiden selvittämiseen joudutaan käyttämään muita menetelmiä. Tilastollisella prosessinohjauksen tarkoitus on auttaa ymmärtämään ja vähentämään vaihtelua ja aikaansaada vakaa, ennustettava prosessi.

9.2 Gage R&R -testi

Prosessinohjauksen ja valvonnan tarkoitus on vähentää prosesseissa esiintyvää vaihtelua. Prosessista mitattu vaihtelu koostuu kahdesta eri osasta, todellisesta prosessin laatuominaisuuksien vaihtelusta sekä mittaamisessa käytettävien mittauslaitteiden aiheuttamasta vaihtelusta. Todelliseen tuotteesta tai sen tuotantoprosessista aiheutuvaan vaihteluun käsiksi pääsemiseksi, täytyy prosessista pystyä erottamaan mittauksen aiheuttama vaikutus. R&R- testin tarkoituksena on selvittää ja analysoida operaattorista aiheutuvan vaihtelun eli uusittavuuden (reproducibility) sekä mittausmenetelmästä aiheutuvan vaihtelun eli toistettavuuden (repeatability) yhteisvaikutusta mittausprosessin vaihteluun (ks. kuvio 15). (Barrentine 2003, 1-3.)

Toistettavuus kertoo, kuinka paljon satunnaista hajontaa mittaustapahtumassa esiintyy, kun yksi mittaaja mittaa samaa kappaletta samalla mittalaitteella useita kertoja. Uusittavuus puolestaan kertoo, kuinka paljon hajontaa esiintyy, kun useat mittaajat mittaavat kyseistä testikappaletta samaa mittalaitetta käyttäen. (Barrentine 2003, 1–3; Salomäki 1999, 120–121.)



Kuvio 15. Prosessin vaihtelu (Karjalainen E & Karjalainen T 2002, 142, muokattu)

Gage R&R- testi keskittyy lyhyen ajan vaihtelulähteiden selvittämiseen, eikä sillä pyritä selvittämään mittalaitteen pitkän ajan vaihtelulähteiden, kuten lineaarisuuden, stabiilisuden tai kalibroinnin vaikutusta hajontaan. Näitä tekijöitä ei tule kuitenkaan jättää huomioimatta, kun tarkastellaan koko mittausjärjestelmän laatua, mutta ensisijainen tavoite on selvittää toistettavuuden ja uusittavuuden aiheuttama vaihtelu. Monesti suositellaan, että esimerkiksi ympäristöolosuhteet stabiloidaan ennen toistettavuus- ja uusittavuusmittauksia, jotta voidaan jättää mittaustapahtuman ulkopuoliset vaihtelukomponentit huomioimatta ja keskittyä tarkkailemaan systeemin sisäistä vaihtelua. (Barrentine 2003, 2–3.)

Gage R&R- testejä eli RR- testejä on kolme erilaista: lyhyt testi, pitkä testi ja aistinvarainen testi. Yleisin tapa on käyttää niin sanottua pitkää testiä, jossa käytetään vähintään kahta mittaajaa eli operaattoria ja kymmentä näytekappaletta. Gage R&R -testi antaa uusittavuuden ja toistettavuuden yhteisvaikutuksen eli mitattujen tulosten hajontavälin. Hajontaväli määritellään usein asetetun luottamuskertoimen avulla. Yleisimmin käytetty hajontaväli on 6σ (sigma), joka vastaa normaalijakauman luottamusväliä 99,73 %. R&R-testi voidaan suorittaa ns. käsin käyttämällä apuna MS Office Excelliä, mutta nopeiden ja monipuolisten raporttien johdosta on suositeltavaa käyttää esimerkiksi Minitab-ohjelmistoa. (Barrentine 2003, 5)

RR- testin suunnittelu

Ideaalitilanteessa käytettävät mittalaitteet olisi kalibroitu ennen toistettavuus- ja uusittavuustestin suorittamista ja suoritettusta testistä olisi laadittu toimenpidelista mittauksia varten sekä määritelty tarpeelliset avainluvut. Laitteen kalibrointi, mittaajien, näytteiden sekä testikertojen määrä, mitattavan kappaleen sisäinen vaihtelu ja tulosten analysointimenetelmä vaikuttavat lopullisiin tuloksiin ja analyysin luotettavuuteen. Mittaustapahtuma ja ympäristö tulisi eristää tekijöiltä, joiden vaikutusta ei haluta sisällyttää mittauksiin. (Barrentine 2003, 17–23; Salomäki 1999, 124–125.)

Mittauksissa tulisi käyttää samoja mittaajia, jotka normaalistikin työskentelevät kyseisten mittalaitteiden kanssa. Mittaajien, näytteiden ja toistojen määrä näytettä kohti määräytyy mittaustilanteesta. Riittävän luotettavien tulosten saamiseksi tulisi näytteiden ja operaattoreiden tulon määrän olla yli 15. Yleisesti mittauksissa käytetään 2–4 mittaajaa, 10:tä näytekappaletta sekä 2–3 mittauskertaa näytettä kohti. Mitä enemmän mittausdataa on käytettävissä, sitä luotettavampia saadut tulokset ovat. (Barrentine 2003, 17–23; Salomäki 1999, 124–125.)

Toistettavuus- ja uusittavuustestiä suoritettaessa testattaviksi näytekappaleiksi tulisi valita sellaisia kappaleita, joiden sisäinen, tuotantoprosessista aiheutuma vaihtelu olisi mahdollisimman pieni. Näytteet tulisi valita mahdollisimman homogeenisesta ja lähellä mallikappaleen tavoitearvoa edustavasta joukosta. Mittalaitteen lukematarkkuuden tulisi olla vähintään kymmenesosa mitatun ominaisuuden toleransseista. Eli mikäli toleranssiväli on ± 1 yksikköä, tulisi mittalaitteen kyetä 0,1 yksikön tarkkuuteen. (Barrentine 2003, 17–23.)

RR- testin tulosten arviointi

Toistettavuus- ja uusittavuustestin tuloksien arviointiin tarvitaan suoritusmittareita havainnollistamaan mittausjärjestelmän suorituskykyä. Pelkät testin antamat tulokset eivät suoraan kerro mittausmenetelmän hyvyttä ja suorituskykyä. Saadakseen tarkemman käsityksen itse mittausprosessin kyvykkyydestä tulee tuloksissa ilmenevää vaihtelua verrata prosessin kokonaisvaihteluun tai asetettuihin vaatimusrajoihin.

Mittausten suorituskykyindeksien, MCI (measurement capability index) avulla voidaan arvioida mittauksen suorituskykyä ja laskea, kuinka hyvin se täyttää asetetut vaatimukset. (Barrentine 2003, 23–33.)

Yksi tapa määrittellä mittausprosessin kyvykkyyttä, on verrata RR-testin tulosta koko prosessin hajontaan. Tämän avulla voidaan arvioida, kuinka paljon käytetty mittausmenetelmä vääristää tuloksia. Toinen tapa on verrata hajontaa prosessin spesifikaatio-rajoihin. Indeksien heikkous on spesifikaatio-rajojen virheellinen tai liian tiukka asetelu, joka saattaa johtaa väärin johtopäätöksiin. (Barrentine 2003, 23–33.)

Mittausdatan pohjalta laadittujen valvontakorttien perusteella voidaan myös arvioida mittausmenetelmän kyvykkyyttä. Keskiarvo- ja vaihteluvälikorttien (\bar{x} -R – kortti) avulla voidaan arvioida mittaussysteemin kyvykkyyttä toistaa mittauksia, mittauksien herkkyyttä ja erottelevuutta ja stabiilisuutta. (Barrentine 2003, 23–33.)

Mikäli kyvykkyys ja suorituskyky luvut ovat huonoja, tulee mittauksen taustalla vaikuttavia haitallisia tekijöitä kartoittaa ja pyrkiä poistamaan niitä systemaattisesti. Toistettavuus- ja uusittavuusvirheitä voidaan vähentää kouluttamalla mittalaitetta operoivia henkilöitä, yhtenäistämällä mittauskalustoa ja vakioimalla mittauksen tapahtumaa. Tuloksia arvioitaessa tulee ottaa huomioon käytettyjen mittalaitteiden tarkkuus, spesifikaatio-rajojen asettelu, testikappaleiden sisäinen vaihtelu sekä mittalaitteiden kalibrointi. RR- testi ei ole kertakäyttöinen, vaan testi tulisi uusita säännöllisesti, jotta voidaan havaita mahdolliset muutokset mittausprosessissa sekä varmistua tehtyjen korjaavien toimenpiteiden hyödyllisyydestä. (Barrentine 2003, 23–33.)

10 Teollinen koesuunnittelu

10.1 Taguchi-menetelmä

Japanilaisen Genichi Taguchin kehittämä Taguchi-menetelmä on tuote- ja prosessisuunnitteluun kehitetty laadun optimointimenetelmä. Menetelmä perustuu 1920-luvulla kehitettyyn tilastolliseen koemenetelmään (DOE, Design of Experiments), jos-

sa tutkitaan samanaikaisesti eri tekijöiden vaikutusta tuotteen tai prosessin ulostuloon. Taguchi-menetelmä koostuu kolmesta eri vaiheesta: systeemis suunnittelu, parametrisuunnittelu ja toleranssisuunnittelu, ja vaiheet yhteen sitovasta Taguchi-laatufilosofiasta. Perusajatus lähtee siitä, että laatu on suunniteltava itse tuotteeseen tai prosessiin. Lisäksi filosofian mukaan laadun parantaminen ja kustannusten alentaminen samanaikaisesti on mahdollista, kun pienennetään tuotteiden ominaisuuksien vaihtelua. Filosofian mukaan laatu perustuu hävikkiin, jonka tuote aiheuttaa käyttäjälle, jos tuotteen ominaisuudet vaihtelevat. Perinteisen laatuajattelun mukaan hävikin arvo on nolla, kun pysytään toleranssirajojen sisällä. Taguchin laatuajattelun mukaan hävikki on nolla vain silloin kun ollaan täsmälleen tavoitearvossa. Taguchi-menetelmällä voidaan ymmärtää kokonaista ajattelutapaa, filosofiaa, mutta yhtä hyvin se on joukko menetelmiä, joita voidaan käyttää itsenäisinä. Tässä työssä tullaan käyttämään parametrisuunnittelua, tehostamaan kokeiden suunnittelua ja löytämään ne parametrit, joilla häiriöiden vaikutusta mittaustuloksiin voidaan vähentää. (Karjalainen 1992, 11–12; Ranjit 2001, 9–11.)

10.2 Parametrisuunnittelu

Parametrisuunnittelun tavoitteena on määrittää valittavissa ja ohjattavissa olevien tekijöiden ominaisarvot niin, että saavutetaan maksimaalinen suoritusarvo minimoitaessa häiriöitä ja kustannuksia. Parametrisuunnittelun tarkoituksena on etsiä keskinäisvaikutuksia tekijöiden väliltä, löytää parempia kombinaatioita tekijöiden kesken, joilla häiriötekijöiden vaikutus pienenee. Tekijöistä voidaan etsiä myös tekijät, joita muuttamalla tuotteen tai prosessin suoritusarvoa voidaan maksimoida. (Karjalainen 1992, 16–17.)

Työssä parametrisuunnittelun avulla pyritään selvittämään neljän eri tekijän vaikutusta saatuihin mittaustuloksiin sekä löytämään paras mahdollinen kombinaatio tekijöiden väliltä, jolla saavutetaan luotettavimmat mittaustulokset.

10.3 Ortogonaalimatriisi

Klassisessa koesuunnittelumenetelmässä eri tekijöiden vaikutusta tuotteen tai prosessin ulostuloon testataan yksi tekijä kerrallaan, joten useiden eri tekijöiden testaamista eri tasoissa vaatii suuren määrän kokeita, mitkä taas vaativat suuren määrän resursseja. Esimerkiksi testattaessa kolmen eri tekijän vaikutusta kahdella eri tasolla (arvolla) vaatii kaikkien kombinaatioiden testaamiseen 8 eri koetta (ks. taulukko 2.).

Ortogonaalimatriisin avulla voidaan käsitellä suuria määriä muuttujia pienellä määrällä kokeita, siten että kaikki parametri tasot tulee huomioitua yhtä monta kertaa (ks. taulukko 3.). Normaaleilla koejärjestelyillä kokeiden määrää vähennettäessä niiden luotettavuus laskee, mutta ortogonaalimatriisia käytettäessä voidaan saavuttaa yli 90 prosenttisesti sama tulos, mikä saavutetaan, kun kaikki mahdolliset yhdistelmät tutkittaisiin. (Karjalainen 1992, 20–22.)

Taulukko 2. Klassinen koemenetelmä (Karjalainen 1989)

| KOE | TEKIJÄT/PARAMETRIT | KOETULOS |
|-----|--------------------|----------|
| 1 | A1 B1 C1 | 1mm |
| 2 | A1 B1 C2 | 2mm |
| 3 | A1 B2 C2 | 3mm |
| 4 | A2 B2 C2 | 4mm |
| 5 | A2 B2 C1 | 5mm |
| 6 | A2 B1 C2 | 6mm |
| 7 | A2 B1 C1 | 7mm |
| 8 | A1 B2 C1 | 8mm |

Taulukko 3. Ortogonaalimatriisi (Karjalainen 1989)

| KOE | TEKIJÄT/PARAMETRIT | | | KOETULOS |
|-----|--------------------|---|---|----------|
| | A | B | C | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1mm |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 2mm |
| 3 | 2 | 1 | 2 | 3mm |
| 4 | 2 | 2 | 1 | 4mm |

10.4 Tulosten analysointi ja tarkastelu

Tulosten analysoimiseksi on olemassa monia tilastollisia menetelmiä. Tilanteesta riippuen voidaan käyttää havaintomenetelmää, ranking-menetelmää, sarake-menetelmää, varianssianalyysiä, signaali-kohinasuhdetta, keskiarvo -käyriä, keskinäisvaikutuskäyriä ja vastetaulukkoita. Analyysien tekoa varten on olemassa erilaisia tietokoneohjelmia, kuten Minitab, jota tässäkin opinnäytetyössä hyödynnettiin. Tietyn tekijän vaikutus koetulokseen saadaan näkyviin laskemalla sille vaste. Tekijöiden eri tasojen vasteiden erotuksen avulla saadaan näkyviin koetulosten kannalta merkittävimmät tekijät, jotka vaikuttavat hajontaan. Vasteet voidaan laskea esim. keskiarvojen tai signaali-kohina -suhteen perusteella. (Karjalainen 1992, 27–31.)

11 Koemittaukset

11.1 Mittausten toteuttaminen

Työn kokeellisen osan tarkoituksena oli tutkia käytössä olevan mittausmenetelmän mittausepävarmuutta ja tulosten hajontaa sekä selvittää mistä tekijöistä epävarmuus koostuu. Mittausepävarmuuden selvittämiseen hyödynnettiin mittalaitteelle suoritettua Gage R&R -testiä. Työssä pyrittiin selvittämään myös määritettyjen tekijöiden vaikutusta saatuihin mittaustuloksiin ja niiden hajontaa. Tekijöiden vaikutuksen selvittämiseen käytettiin Taguchi-koesuunnittelumenetelmää. Testimittausten ja niiden tulosten analysointiin käytettiin Minitab 16 -ohjelmaa. Suoritetut testit, niiden tulokset ja teoria-aineisto toimivat laaditun käsikirjan pohjana, jonka tarkoituksena on jatkossa ohjeistaa telapinnoitteille suoritettavia kovuusmittauksia ja toimia suunnittelun, valmistuksen ja laadunvalvonnan tukena.

R&R-testi suoritettiin Service technology centerin (STC-halli) laboratoriotiloissa (ks. liite 1) tuotannosta kerättyjen näytteiden avulla. Taguchi-koesuunnittelumenetelmä

testi toteutettiin sen sijaan STC -hallin tuotantohallissa (ks. liite 2) pinnoitteen poistoon tulleen telan pinnalla, johon valmisteltiin tarvittavat vyöhykkeet koetta varten.

11.2 R&R-testi

RR -testin valmistelu aloitettiin valitsemalla mittalaite, jota testissä tultiin käyttämään. Vaihtoehtoina oli kolme eri mittalaitetta; uusi digitaalinen Shore D -mittari (ks. kuvio 16), digitaalinen Barcol -mittari sekä tuotannon käytössä oleva viisarimallinen Shore D -mittari (ks. kuvio 17). Testimittariksi valittiin uusi digitaalinen Gibitren Shore D -mittari, sillä Gibitren mittarilla voitiin mitata sekä käsin että laboratorion testijalustaa hyödyntäen. Valintaa puolsi myös mittarin parempi resoluutio, joka oli 0,1 Shorea, kun viisarimallissa jouduttiin arvioimaan mittarinlukema silmämääräisesti 0,5 Shoren tarkkuudella. Viisarimallisen mittarin asteikko olisi ollut tämän lisäksi liian karkea. Mittari ei olisi pystynyt jakamaan tulosten vaihteluväliä tarpeeksi pieniin osiin, jotta toistettavuus- ja uusittavuusvirhettä olisi esiintynyt mittausprosessissa. Barcol-mittaria ei tässä vaiheessa valittu testimittariksi, sillä Barcolia varten ei ollut olemassa minkäänlaista vertailudataa. Shore-menetelmä on myös laajemmin käytetty ja tunnettu, minkä takia se on Metsollakin käytössä. Testi suoritettiin kolmea eri lukemahetkeä maksimiarvoa, 1 sekuntia ja 15 sekuntia käyttäen. Tällä tavoin pystyttiin arvioimaan myös lukemahetken vaikutusta saatuihin tuloksiin RR-testin yhteydessä.



Kuvio 16. Gibitre Shore D -mittari (Manual Digital Hardness Tester n.d.)



Kuvio 17. CV Instruments Shore D -mittari (Shore hardness tester n.d.)

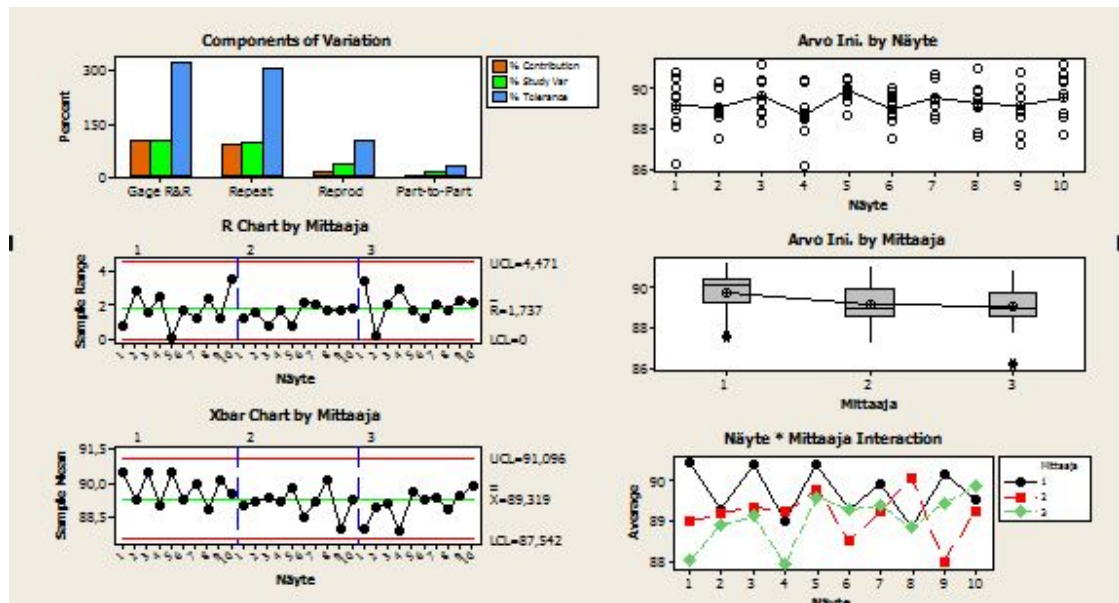
Mittarin valinnan jälkeen valmisteltiin Minitab-ohjelmaa hyödyntäen mittauspöytäkirja, johon tulokset merkittiin ennen tietokoneohjelmaan syöttämistä. RR-testi tehtiin ns. pitkää menetelmää käyttäen, johon valittiin 10 näytettä, 3 mittaajaa sekä 3 mittauskertaa näytettä kohti. Näiden kolmen parametrin avulla Minitab-ohjelma muodosti mittausmatriisin, jonka mukaan näytteet mitattiin satunnaisessa järjestyk-

sessä. Mittausjärjestystä sekoittamalla pyrittiin eliminoimaan se, ettei mittaaja tunnista aiemmin mitattuja tuloksia näytteistä, vaan jokainen mittaus olisi riippumaton aiemmista mittaustuloksista.

Testinäytteinä käytettiin neljän eri projektin CalJaguar komposiittipinnoitteiden pannaäytteitä, joista näytepalat valmistettiin. Huono puoli kerätyissä näytteissä oli se, etteivät niiden pinta vastannut aivan sitä pintaa, josta kovuusmittaukset tuotannossa normaalisti otetaan. Näytteiden pinta oli normaalia karheampi, mikä näkyi mittaustuloksissa hieman matalampina tuloksina, eikä mitattuja tuloksia voitu suoraan verrata pinnoitteen tavoitearvoon.

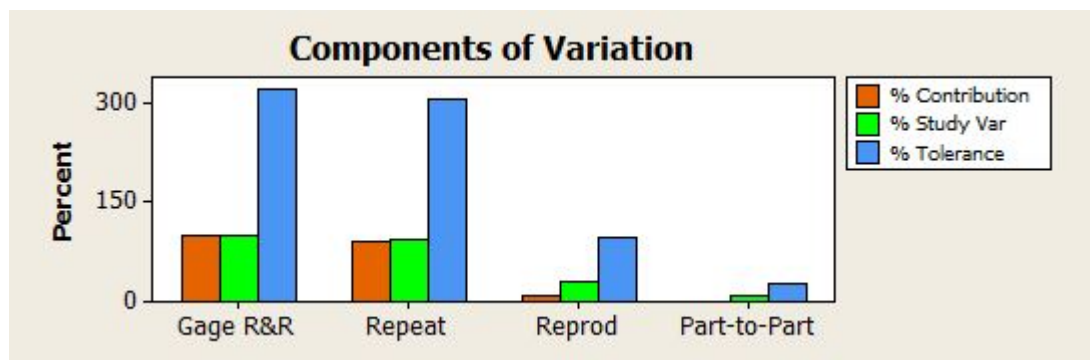
11.2.1 Käsinmittaus, maksimiarvo

R&R-testi suoritettiin ensimmäisenä käsinmittaamalla maksimiarvoa käyttäen, minkä jälkeen saadut tulokset syötettiin Minitab-ohjelmaan laskentaa ja analyysiä varten. Yleissääntönä pidetään, että luotettavan mittausprosessin kokonaisvaihtelu saisi olla enintään 10 % prosessin toleranssialueesta, mikä tässä tapauksessa olisi 0,2 Shorea, kun annettu toleranssialue on 2 Shorea. Jo ennen testiä tiedettiin, että annettu toleranssialue on tiukka, mutta testin tarkoituksena oli tutkia käsinmittauksen ja testijalustalla suoritettujen mittausten mittausepävarmuutta sekä selvittää, mistä tekijöistä mittausepävarmuus koostuu.



Kuvio 18. Käsinmittaus, maksimiarvo

Kuviosta 18 nähdään Minitabin muodostamat kuusi kuvaajaa, jotka havainnollistavat käsinmittauksella suoritettun mittausprosessin vaihtelua sekä eri tekijöiden vaikutusta mittausprosessin vaihteluun. Kuvaajien ja ohjelman laskennan avulla arvioitiin prosessin hallinnassaoloa ja tekijöitä, joista mittausepävarmuus ja tulosten vaihtelu koostuu



Kuvio 19. Components of Variation, käsinmittaus

Components of Variation (ks. kuvio 19) esittää mittausprosessin vaihtelunlähteiden jakautumista sekä suuruutta. Ideaalitilanteessa suurin osa mittausprosessin vaihtelusta muodostuu näytteiden välisestä (Part-to-Part) vaihtelusta ja muiden tekijöiden

osuuksien tulisi olla hyvin pieniä. Mikäli tuloksia tarkastellaan vaihtelun (%StudyVar) tai annetun toleranssin perusteella (% Tolerance), tulisi toistettavuuden (Repeatability) ja uusittavuuden (Reproducibility) sekä mittausprosessin mittausepävarmuuden (Total Gage R&R) olla alle 10 % (ks. kuvio 20). Mikäli testi osoittaa mittausprosessin kykenevän 10–30 %:n tulokseen tulisi tilannetta arvioida mittauskohteen kriittisyyden mukaan, mutta yli 30 %:n tapauksissa mittausprosessia tulisi kehittää tai korvata se paremmalla menetelmällä. Vaihtelukomponentti (%Contribution) arvoja käytettäessä vastaavat prosentit ovat hyväksytylle prosessille alle 1 %:ia, 1–9 %:n välillä tilanne tulisi arvioida tarkemmin ja yli 9 %:n tilanteessa prosessia tulisi kehittää. %Contribution -taulukon arvot perustuvat kokonaisvaihteluun (Total Variation), joten tekijöiden yhteenlaskettu arvo on aina 100 %, toisin kuin %StudyVar- ja %Tolerance -taulukoissa. %StudyVar- ja %Tolerance -laskenta perustuu standardipoikkeamaan eli keskihajontaan. %Tolerance -arvoja käytetään useasti, kun mittausjärjestelmää arvioidaan mitattujen kappaleiden toleranssiin nähden ja %StudyVar -arvoja, kun pyritään arvioimaan mittauksen vaihtelua kokonaisvaihteluun nähden sekä kehittämään itse prosessia. %Contribution -arvoista voidaan arvioida helposti, mihin tekijöihin tulisi kiinnittää huomiota kehitettäessä mittausprosessia.

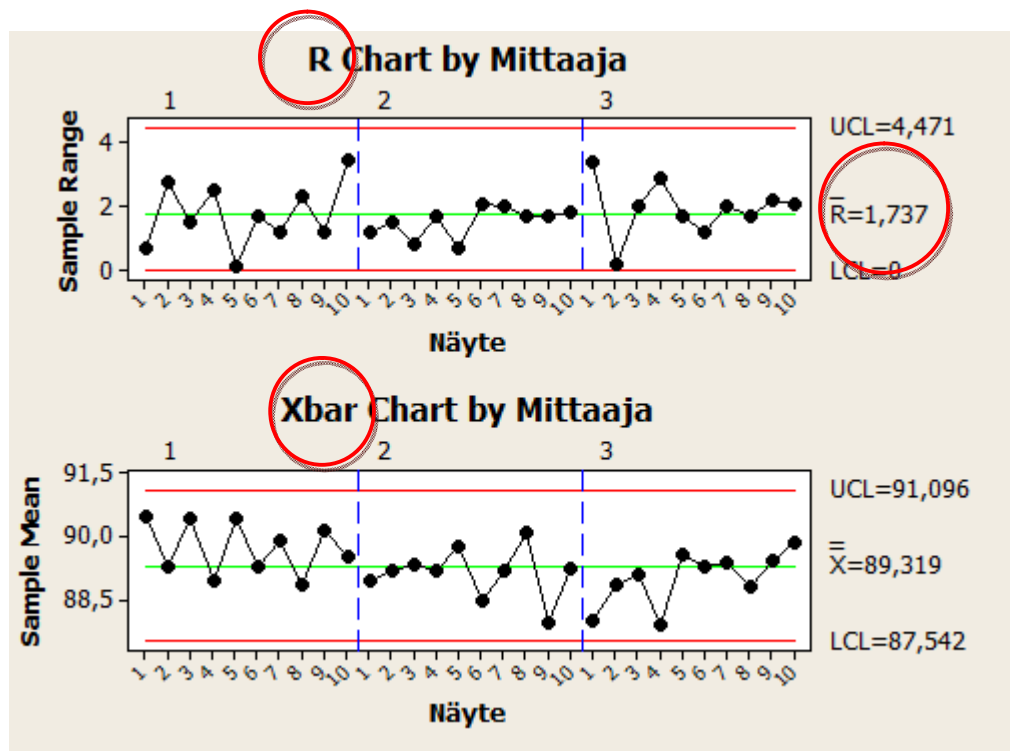
| Source | VarComp | %Contribution (of VarComp) |
|-----------------|---------|-------------------------------|
| Total Gage R&R | 1,13412 | 99,25 |
| Repeatability | 1,02741 | 89,90 |
| Reproducibility | 0,10670 | 9,35 |
| Mittaaja | 0,10680 | 9,35 |
| Part-To-Part | 0,00863 | 0,75 |
| Total Variation | 1,14274 | 100,00 |

Process tolerance = 2

| Source | StdDev (SD) | Study Var (6 * SD) | %Study Var (%SV) | %Tolerance (SV/Toler) |
|-----------------|-------------|-----------------------|---------------------|--------------------------|
| Total Gage R&R | 1,06495 | 6,38970 | 99,62 | 319,48 |
| Repeatability | 1,01356 | 6,08136 | 94,81 | 304,07 |
| Reproducibility | 0,32681 | 1,96086 | 30,57 | 98,04 |
| Mittaaja | 0,32681 | 1,96086 | 30,57 | 98,04 |
| Part-To-Part | 0,09288 | 0,55727 | 8,69 | 27,86 |
| Total Variation | 1,06899 | 6,41395 | 100,00 | 320,70 |

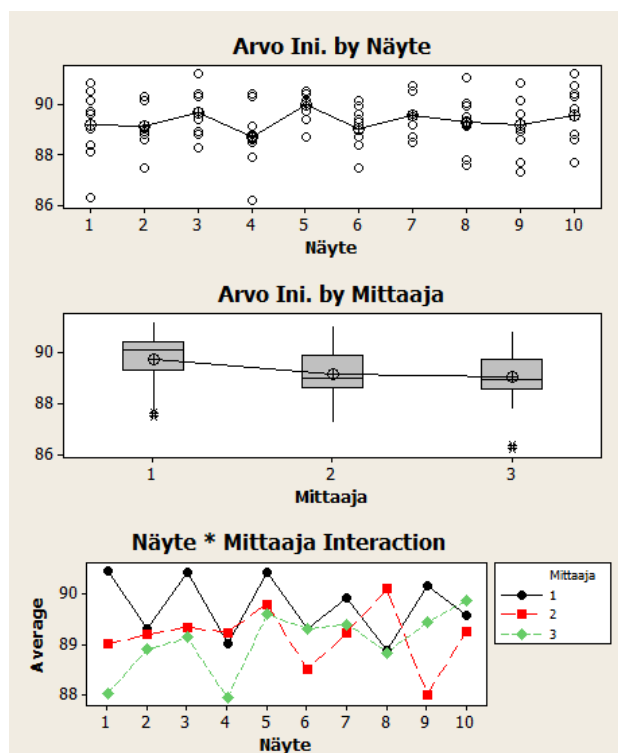
Kuvio 20. Käsinnmittaus, vaihtelutekijät ja session-data

Kuviosta 20 ns. session-datasta nähdään vaihtelukomponenttien, toistettavuuden ja uusittavuuden, osuudet kokonaisvaihtelusta sekä näytteiden välisen vaihtelun suuruus mittalaitteesta aiheutuvaan vaihteluun nähden. Suoritetun R&R-testin ja sen tulosten perusteella nähdään kuvion 20 datan ja kuvion 19 kuvaajien perusteella annetun toleranssin olevan aivan liian tiukka mittausprosessin vaihteluun nähden käsinmittauksessa. Toleranssiin verrattaessa mittausprosessin kokonaisvaihtelu on yli 300 % ja toistettavuuden (304,07 %) sekä uusittavuuden (98,04 %) osuudet ovat selvästi yli hyväksyttävien rajojen. Tuloksista nähdään suurimman osan vaihtelusta tulevan itse mittausprosessista ja tarkemmin ottaen toistettavuusvirheistä, eikä näytteiden välistä vaihtelua (Part-to-part) esiinny juuri lainkaan. Toistettavuusvirheet syntyvät yleensä mm. mittalaitteen asentovaihteluista, mittausvoiman vaihtelusta sekä mittalaitteen välyksistä. Kuten jo teoriaosuudessa kävi ilmi, yksi Shore-mittausmenetelmän heikkouksista ovat juuri nämä asentovaihtelut ja mittausvoiman vaihtelut.



Kuvio 21. R- ja Xbar -kuvaajat käsinmittauksessa

R- ja Xbar -kuvaajat (ks. kuvio 21) tai toisin sanoen valvontakortit havainnollistavat mittaajakohtaisesti prosessin hallinnassaoloa ja vaihtelua sekä vertaa näytteiden välistä vaihtelua toistettavuustekijään (Xbar-kuvaaja). Ideaalitalanteessa R - valvontakortin mittaajien eri näytteistä otettujen mittausten suurimman ja pienimmän arvon erotusta havainnollistavat pisteet sijoittuvat selvästi tilastollisesti tulosaineistosta laskettujen $\pm 3 \sigma$:n valvontarajojen (UCL/LCL) sisäpuolelle, mikä osoittaa prosessin olevan hallinnassa kaikkien mittaajien osalta, koska erityisyyttä ei esiinny. Sen sijaan valvontarajojen väli on 4,471 eli suurempi kuin mittausten tavoiteltu tarkkuustaso toleranssialueeseen verrattuna, joten mittausten suorituskyky on huono. Xbar-valvontakortissa verrataan näytteiden välistä vaihtelua toistettavuustekijään nähden. Myös tämä analyysi osoittaa mittausten prosessin olevan hallinnassa, mutta suorituskyvyn olevan huono. Suorituskykyisessä mittausten prosessissa edellä kuvatuissa analyyseissä valvontarajojen välin pitäisi olla selvästi pienempi kuin määritelty toleranssialue.



Kuvio 22. Mittaustulosten ja mittaajien vaikutuksen analysointikuvaajat käsinmittauksessa

Kuvion 22 ylimmästä kuvaajasta voidaan arvioida jokaisesta kymmenestä näytteestä otetun yksittäisen mittauksen tuloksia sekä tulosten vaihtelua. Jokaista mittausta esittävien ympyröiden tulisi ideaalitalanteessa olla mahdollisimman lähellä toisiaan ja mielellään päällekkäin, ja keskiarvoa kuvaavan viivan tulisi vaihdella tarpeeksi, jotta ero näytteiden välillä olisi selkeä. Arvo Ini. by Näyte -kuvaajasta käy selkeästi ilmi, että käsinmittauksessa saatujen tulosten välillä on suurta vaihtelua, mikä niin ikään osoittaa mittausten suurta hajontaa.

Arvo Ini. by Mittaaja -kuvaaja on ns. boxplot -kuvaaja, jossa arvioidaan kolmen eri mittajaan saamien tulosten jakautumista toisiin mittajiin nähden. Kuvaajan laatikot esittävät, mille alueelle ja mihin kohti asteikkoa 50 % kunkin mittajaan tuloksista asettuu. Laatikon ala- ja yläreuna sekä laatikon läpi piirretty pystyviiva kuvaavat aluetta, joille loput kaksi neljänestä arvoista sijoittuvat. Laatikon sisään piirretty vaakaviiva kertoo tulosten mediaanin ja laatikoita yhdistävät suorat kuvaavat mittajien keskiarvoa. Kuvaajassa ilmenevät tähdet osoittavat ns. extreme -arvoja, jotka poikkeavat selvästi muista mitatuista arvoista. Ideaalitalanteessa laatikot olisivat lähes samankokoisia, samalla tasolla ja mittajien keskiarvoja yhdistävä vaakaviiva olisi mahdollisimman vaakasuorassa. Testin kohdalla nähtiin mittajien tulosten olevan melko samalla tasolla asteikkoa sekä keskiarvojen olevan hyvin lähellä toisia. Mittajaan 1 tulosten kohdalla havaitaan olleen muihin mittajiin nähden suurempia. Havainto on mielenkiintoinen, sillä mittaja 1 oli ainut naispuolinen mittaja, ja tavallisesti miesten mittaamat tulokset ovat naismittajiin nähden suurempia johtuen suuremmasta kuormitusvoiman käytöstä. Suoritetun testin kohdalla mittajaan 1 saamat suuremmat kovuusarvot johtuvat todennäköisesti ns. iskumaisesta kuormituksesta. Liian nopean kuormitusliikkeen johdosta polymeerimateriaalin reagointi molekyyllitasolla tapahtuu viiveellä ja näin ollen saa aikaan jopa virheellisen suuria kovuusarvoja.

Kuvioon 22 viimeinen kuvaaja, Näyte*Mittaja Interaction, esittää mittajien ja näytteiden keskinäistä vaikutusta. Kuvaajan ympyrät ja laatikot kuvaavat kunkin mittajaan näytteestä mitattujen tulosten keskiarvoa. Ideaalitalanteessa kaikkien kolmen mittajaan mittaamien tulosten keskiarvo olisivat mahdollisimman lähellä toisiaan ja näin ollen pisteiden välille piirretyt suorat olisivat yhdensuuntaisia. Tämän lisäksi olisi suotavaa, että näytteistä saadut keskiarvot vaihtelisivat merkittävästi toisiin nähden, jotta näytteiden välinen ero olisi selkeästi havaittavissa. Testin kohdalla nähdään,

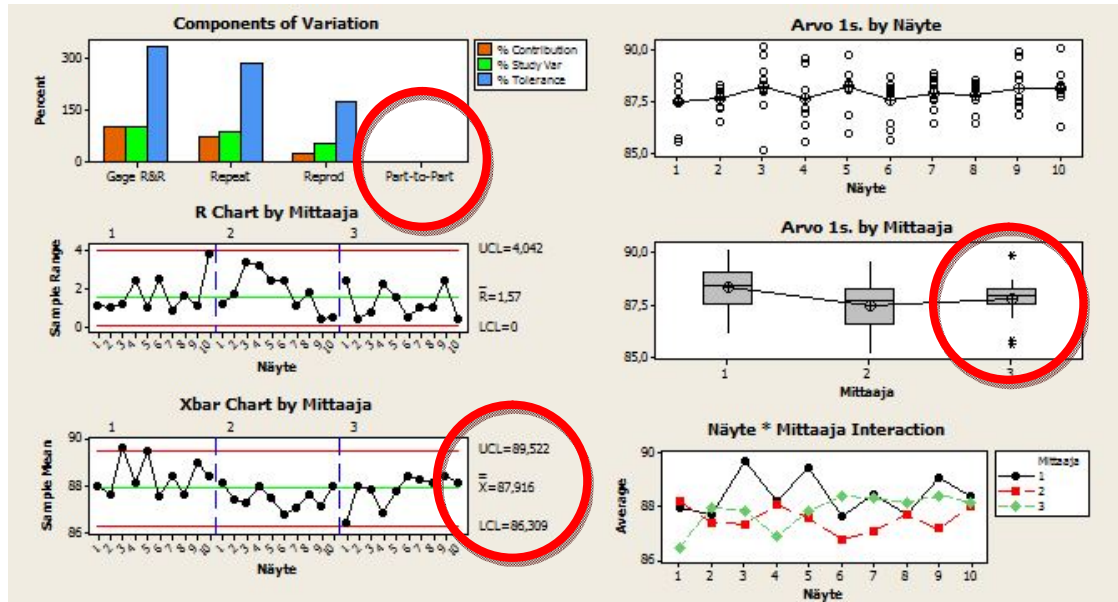
etteivät suorat ole yhdensuuntaisia, mikä havainnollistaa mittaustulosten suurta vaihteluväliä ja epätarkkuutta. Tämän lisäksi mittausmenetelmä ei pysty selkeästi erottamaan näytteiden välisiä eroja.

11.2.2 Käsinmittaus, lukemahetki 1 sekuntia

Gibitren mittarin ominaisuuksiin kuului maksimiarvon ja määritetyn lukemahetken arvon mittaaminen yhdellä mittauksella. Käsinmittaamalla maksimiarvon ja yhden sekunnin lukemahetken kovuusarvon välillä ei RR-testin kannalta ollut kuvion 23 mukaan suuria eroja. Kuvion 23 kuvaajista R/Xbar Chart by Mittaaja havaitaan, että maksimiarvoon nähden saadut tulokset ovat selvästi alhaisempia, kuten keskiarvot osoittavat. Maksimiarvoa käytettäessä mittausten keskiarvo on noin 89,3 ShD, kun lukemahetkellä 1 sekuntia mittausten keskiarvo on noin 87,8 ShD. Tulosten laskuun vaikuttaa pääasiassa kaksi tekijää. Kun paininjalka painetaan käsin testipalan pintaan, saavutetaan suurin kuormitusvoima hetkellisesti eikä kuormitusvoimaa pystytä ylläpitämään tarpeeksi tasaisena tuon yhden sekunnin aikana, vaan kuormitusvoima pääsee laskemaan. Alhaisempi kuormitusvoima näkyy taas suoraan alhaisempina kovuusarvoina. Toinen vaikuttava tekijä on materiaalin viiveellä tapahtuva reagointi ulkoiseen voimaan. Sen sijaan tulosten vaihteluväli lukemahetkellä 1 sekuntia on maksimiarvoon nähden hieman pienempi, 1,57 ShD, mikä näkyy hieman parempana toistettavuutena RR-testissä (ks. kuvio 24). Merkittävänä huomiona boxplot -kuvaajasta huomataan mittajaan 3 tulosten hajonnan merkittävä pieneneminen. Kuvaajasta Arvo 1s. by Mittaaja näkyy mittajaan 3 kohdalla 50 % tuloksista keskittyvän hyvin pienelle alueelle, kuten mittajaan hajontaa kuvaava laatikko ja laatikon läpi vedetty pystyviiva osoittavat. Toisaalta mittajaan 3 kohdalla on muutama selvästi poikkeava arvo, joita kuvaajan tähdet havainnollistavat. Mittajaan 3 selvästi pienempi tulosten hajonta kieli siitä, että mittaja on pystynyt säilyttämään tasaisen kuormitusvoiman mittausten aikana paremmin kuin muut mittajat.

Kokonaisuutena toleranssiin verrattaessa mittausprosessi oli huonontunut (334,30 %). Toistettavuus (286,34 %) oli parantunut aikaisempaan nähden, mutta uusittavuus (172,53 %) oli selkeästi huonontunut. Uusittavuuden huonontumista selittää osin

isommat mittaajien väliset erot, joita Arvo 1s. by Mittaaja -kuvaaja havainnollistaa. Yhtenä huomiona voidaan todeta näytteiden välisen (Part-to-Part) vaihtelun puuttuvan kokonaan. Toistettavuus- ja uusittavuusvirheen ollessa tässä tapauksessa niin suuri, ettei näytteiden välistä vaihtelua pystytä erottelemaan kokonaisvaihtelusta.



Kuvio 23. Käsinmittaus, lukemahetki 1 s.

| Source | VarComp | %Contribution (of VarComp) |
|-----------------|---------|----------------------------|
| Total Gage R&R | 1,24174 | 100,00 |
| Repeatability | 0,91000 | 73,36 |
| Reproducibility | 0,33174 | 26,64 |
| Mittaaja | 0,15095 | 12,80 |
| Mittaaja*Näyte | 0,17119 | 13,83 |
| Part-To-Part | 0,00000 | 0,00 |
| Total Variation | 1,24174 | 100,00 |

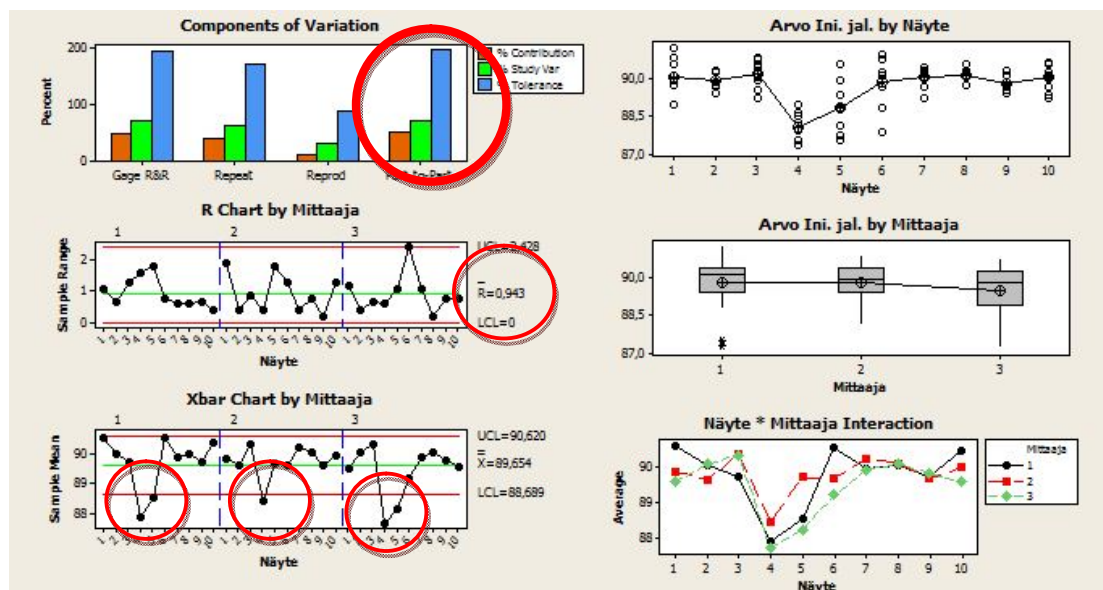
Process tolerance = 2

| Source | StdDev (SD) | Study Var (6 * SD) | %Study Var (%SV) | %Tolerance (SV/Toler) |
|-----------------|-------------|--------------------|------------------|-----------------------|
| Total Gage R&R | 1,11433 | 6,68601 | 100,00 | 334,30 |
| Repeatability | 0,95446 | 5,72676 | 85,65 | 286,34 |
| Reproducibility | 0,57510 | 3,45066 | 51,61 | 172,53 |
| Mittaaja | 0,39868 | 2,39208 | 35,78 | 119,60 |
| Mittaaja*Näyte | 0,41448 | 2,48688 | 37,20 | 124,34 |
| Part-To-Part | 0,00000 | 0,00000 | 0,00 | 0,00 |
| Total Variation | 1,11433 | 6,68601 | 100,00 | 334,30 |

Kuvio 24. Käsinmittaus, lukemahetki 1 s, session-data

11.2.3 Testijalusta, maksimiarvo

Sama RR-testi suoritettiin valmistajan testijalustaa hyödyntäen, jossa mittarin asento sekä mittausvoima saatiin vakioitua. Käsinmittaukseen nähden olikin odotettavissa parempaa toistettavuutta ja näin ollen kokonaisuudessaan suorituskykyisempää mittausprosessia.



Kuvio 25. Testijalusta, maksimiarvo

| Source | VarComp | %Contribution (of VarComp) |
|-----------------|----------|-------------------------------|
| Total Gage R&R | 0,405867 | 49,11 |
| Repeatability | 0,317333 | 38,66 |
| Reproducibility | 0,086333 | 10,45 |
| Mittaja | 0,014634 | 1,77 |
| Mittaja*Näyte | 0,071700 | 8,68 |
| Part-To-Part | 0,420319 | 50,89 |
| Total Variation | 0,825996 | 100,00 |

Process tolerance = 2

| Source | StdDev (SD) | Study Var (6 * SD) | %Study Var (%SV) | %Tolerance (SV/Toler) |
|-----------------|-------------|-----------------------|---------------------|--------------------------|
| Total Gage R&R | 0,636920 | 3,82152 | 70,08 | 191,08 |
| Repeatability | 0,565096 | 3,39058 | 62,18 | 169,53 |
| Reproducibility | 0,293825 | 1,76295 | 32,33 | 88,15 |
| Mittaja | 0,120970 | 0,72582 | 13,31 | 36,29 |
| Mittaja*Näyte | 0,267768 | 1,60661 | 29,46 | 80,33 |
| Part-To-Part | 0,648328 | 3,88997 | 71,34 | 194,50 |
| Total Variation | 0,908843 | 5,45306 | 100,00 | 272,65 |

Kuvio 26. Testijalusta, maksimiarvo, session-data

Testijalustaa käytettäessä huomataan kuvioista 25 ja 26, että saadut tulokset ovat käsinmittaukseen verrattuna huomattavasti parempia. Kokonaisvaihtelu oli testijalustalla 70,08 % ja toleranssiin nähden 191,08 %, joka on yli 100 prosenttiyksikköä pienempi kuin käsinmittauksessa. Toistettavuus (repeatability) laski 62,18 %:iin, ja uusittavuus (32,33 %) pysyi lähes samana. Vaihtelukomponenteista (VarComp) nähdään, että 49,11 % kokonaisvaihtelusta aiheutuu mittalaitteesta ja 50,89 % näytteiden välisestä vaihtelusta. Optimaalisessa tilanteessa näytevaihtelun osuus tulisi olla yli 90 % kokonaisvaihtelusta, joten parannettavaa riittää merkittävästi. Kokonaisuutena mittausprosessi on parantunut käsinmittaukseen nähden merkittävästi, mutta toleranssiin nähden ollaan vielä kaukana suorituskyykyisestä mittausprosessista.

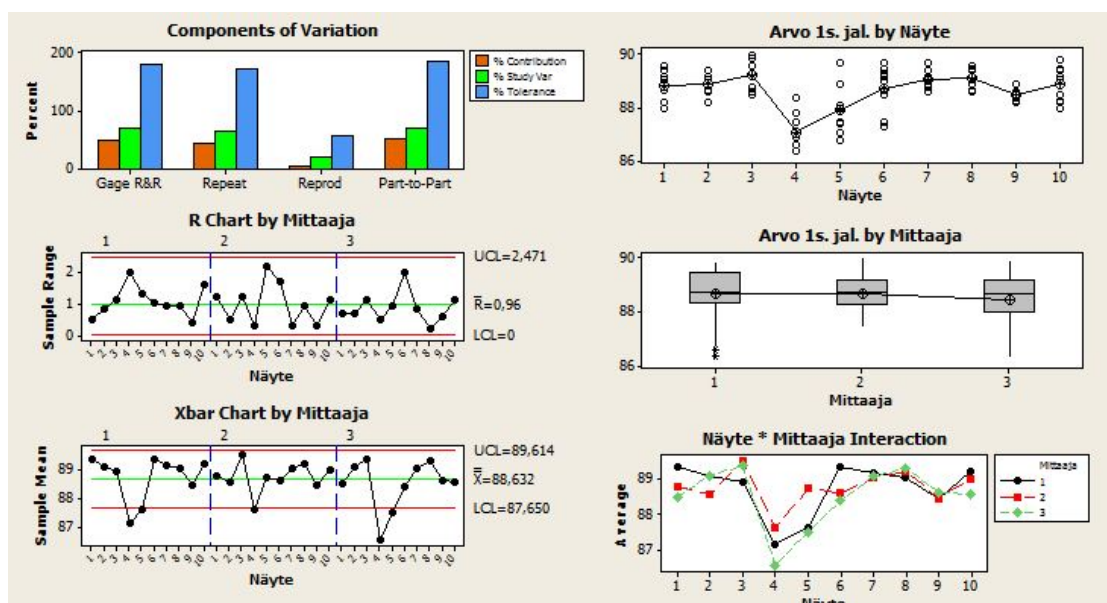
Valvontakortteja tarkasteltaessa voidaan havaita, että tulosten vaihteluväli ja vaihteluvälin keskiarvo (0,943 ShD) on laskenut käsinmittauksen nähden. Pienentyneen hajonnan johdosta muodostuneet valvontarajat ovat huomattavasti tiukemmat käsinmittaukseen nähden. Xbar-valvontakortissa esiintyy myös muutamia valvontarajojen alituksia, mikä indikoi, että mittausprosessin suorituskyykyyn parantuessa analyysi havaitsee jo testipalojen välisiä kovuuseroja. Valvontakorteissa sekä Arvo Ini. by Näyte -kuvaajassa huomio kiinnittyy näytteiden 4 ja 5 selvästi matalampiin arvoihin. Tar-

kempaa syytä tähän ei saatu selvitettyä, mutta oletettavasti tulosten vaihteluun vaikutti näytteen sisäinen vaihtelu sekä se, että mittauspisteet ovat olleet liian lähellä aikaisempia mittauspisteitä ja niiden aiheuttamia painaumuksia. Testipaloista ei silmämääräisesti pystynyt tarkasti katsomaan mihin kohtaan aikaisempi mittauksen painauma oli syntynyt. Tämän lisäksi testipalan liikuttelua eri mittauskohdan varmistamiseksi rajoitti testipalan kaareva pinnanmuoto. Paras kohta luotettavan mittauksien saamiseksi oli kaarevan pinnan ns. huippu. Mikäli käytössä olisi ollut tasaisia näytepaloja, olisi saadut tulokset olleet hieman parempia, mutta toisaalta tuotannossa suoritettavat mittauksetkin joudutaan mittaamaan kaarevalta telapinnalta.

Näyte*Mittaja Interaction -kuvaajasta nähdään mittajien saamien tulosten keskiarvoja kuvaavien pisteiden olevan selvästi lähempänä toisiaan sekä pisteiden väliin piirretyt viivat ovat yhdensuuntaisempia. Samaa vaihtelun pienentymistä voidaan havaita Arvo Ini. ja by Näyte -kuvaajasta jossa yksittäisiä mittauksia kuvaavat ympyrät ovat lähempänä toisiaan, pois lukien näytteiden 5 ja 6 kohdalla.

11.2.4 Testijalusta, lukemahetki 1 sekuntia

R&R-testi suoritettiin myös testijalustalla lukemahetkellä 1 sekuntia, kuten käsinmittauksessa. Kuvio 27 ei silmämääräisesti erota suurta eroa maksimiarvoon nähden, sen sijaan kuvio 28. paljastaa mittausprosessin olevan hieman suorituskykyisempi maksimiarvoon nähden. %StudyVar- ja %Contribution -arvoja tutkimalla havaitaan muiden tekijöiden pysyneen lähes samoina, mutta uusittavuuden osuus on parantunut selkeämmin maksimiarvoon nähden. Toleranssin verrattuna laskua oli tullut selkeämmin. Kokonaisuutena mittausprosessin suorituskyky oli kehittynyt parempaan suuntaan, joten RR-testi päätettiin suorittaa myös standardin suosittelemalle lukemahetkelle 15 sekuntia. Kyseistä testiä ei suoritettu käsinmittauksena, koska tasaisen kuormitusvoiman ja vakaan mittarin asennon pitäminen käsin osoittautui lähes mahdottomaksi.



Kuvio 27. Testijalusta, lukemahetki 1 s.

| Source | VarComp | %Contribution (of VarComp) |
|-----------------|----------|-------------------------------|
| Total Gage R&R | 0,363830 | 48,83 |
| Repeatability | 0,328889 | 44,03 |
| Reproducibility | 0,035741 | 4,80 |
| Mittaaja | 0,005000 | 0,67 |
| Mittaaja*Näyte | 0,030741 | 4,13 |
| Part-To-Part | 0,380958 | 51,17 |
| Total Variation | 0,744617 | 100,00 |

Process tolerance = 2

| Source | StdDev (SD) | Study Var (6 * SD) | %Study Var (%SV) | %Tolerance (SV/Toler) |
|-----------------|-------------|-----------------------|---------------------|--------------------------|
| Total Gage R&R | 0,603017 | 3,61810 | 69,88 | 180,91 |
| Repeatability | 0,572616 | 3,43569 | 66,36 | 171,78 |
| Reproducibility | 0,189052 | 1,13431 | 21,91 | 56,72 |
| Mittaaja | 0,070711 | 0,42426 | 8,19 | 21,21 |
| Mittaaja*Näyte | 0,175330 | 1,05198 | 20,32 | 52,60 |
| Part-To-Part | 0,617242 | 3,70345 | 71,53 | 185,17 |
| Total Variation | 0,862912 | 5,17747 | 100,00 | 258,87 |

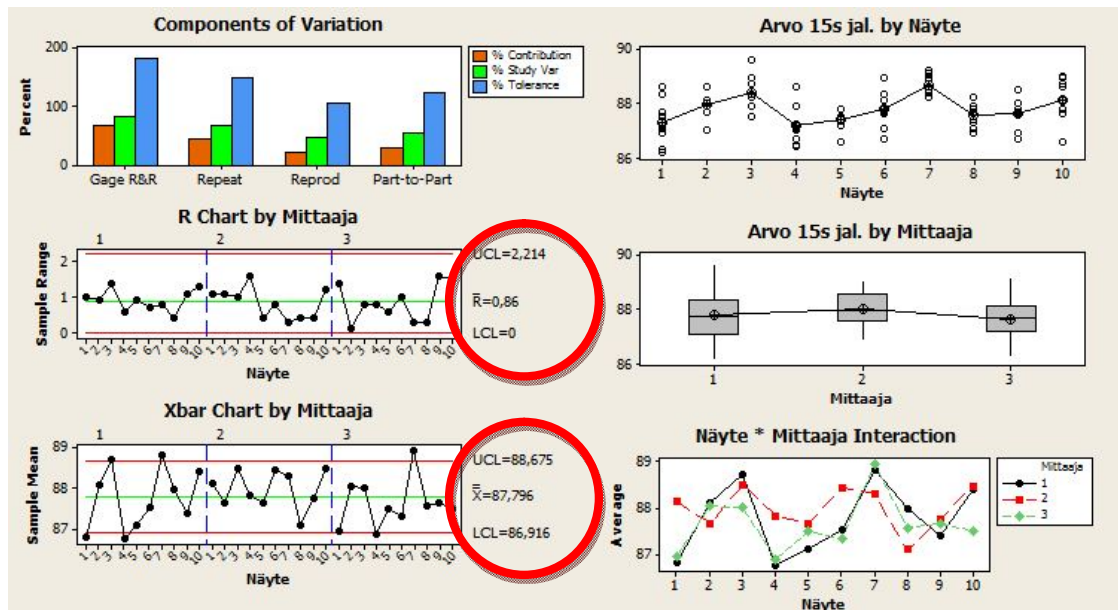
Kuvio 28. Testijalusta, lukemahetki 1 s, session-data

11.2.5 Testijalusta lukemahetki 15 sekuntia

Viimeinen RR-testi suoritettiin standardin suosittelemalle 15 sekunnin lukemahetkelle. Saatujen tulosten perusteella mittausprosessi ei kokonaisuudessaan parantunut

edelliseen verrattuna vaan mentiin jopa hieman huonompaan suuntaan. Parannusta tapahtui toleranssiin verrattuna kokonaisvaihtelussa ja hieman toistettavuuden kohdalla, sen sijaan uusittavuus huononi selkeästi sekä näytteiden välinen (Part-to-Part) vaihtelu laski huonompaan suuntaan. Uusittavuuden huonontuminen voidaan havaita helposti Arvo 15s jal. by Näyte -kuvaajasta (ks. kuvio 29). Kuvioista nähdään kuinka yksittäisten mittausten vaihtelu on selkeästi suurempaa verrattuna kuvion 27 vaihteluun nähden. Toleranssiin verrattuna mittaussysteemin kokonaisvaihtelu laski edelliseen verrattuna 222,02 %:iin. Kyseinen lasku johtuu tiukemmista valvontarajoista, jotka nähdään kuvion 29 R- ja Xbar -kuvaavista. Huomiona aikaisempaan, saatujen mittaustulosten vaihteluvälin keskiarvo laski 0,96 Shoresta 0,86 Shoreen sekä yleisesti saadut kovuusarvot olivat alhaisempia. Mikä johtuu mm. materiaalin viskoelastisista ominaisuuksista.

Yksi tekijä miksi prosessi ei parantunut aikaisempaan verrattuna saattaa olla näytteille tehdyt muutokset. Näytteistä sahattiin päädyistä palat pois, jolla pyrittiin siirtämään kaarevan näytepalan ns. huippukohtaa josta mittaukset mitattiin. Tällä pyrittiin minimoimaan se, etteivät aikaisemmat mittakärjen painaumet vaikuttaisi tuloksiin. Huonontuneen uusittavuuden ja Arvo 15s jal. by Näyte- sekä Näyte*Mittaaja Interaction -kuvaajien perusteella voidaan epäillä, että tehty toimenpide näytepaloille ei ollut onnistunut. Kuvaajista nähdään joidenkin näytteiden kohdalla yksittäisten mittaustulosten ja keskiarvojen välillä suurempaa vaihtelua kuin aikaisemmassa testissä lukemahetkellä 1 sekuntia.



Kuvio 29. Testijalusta, lukemahetki 15 s

Gage R&R

| Source | VarComp | %Contribution (of VarComp) |
|-----------------|----------|----------------------------|
| Total Gage R&R | 0,376178 | 68,68 |
| Repeatability | 0,250389 | 45,81 |
| Reproducibility | 0,125789 | 22,87 |
| Mittaaja | 0,01226 | 2,05 |
| Mittaaja*Näyte | 0,11433 | 20,82 |
| Part-To-Part | 0,171579 | 31,32 |
| Total Variation | 0,547687 | 100,00 |

Process tolerance = 2

| Source | StdDev (SD) | Study Var (6 * SD) | %Study Var (%SV) | %Tolerance (SV/Toler) |
|-----------------|-------------|--------------------|------------------|-----------------------|
| Total Gage R&R | 0,613309 | 3,67986 | 82,87 | 183,99 |
| Repeatability | 0,500888 | 3,00533 | 67,68 | 150,27 |
| Reproducibility | 0,353920 | 2,12352 | 47,82 | 106,18 |
| Mittaaja | 0,105954 | 0,63573 | 14,32 | 31,79 |
| Mittaaja*Näyte | 0,337688 | 2,02613 | 45,63 | 101,31 |
| Part-To-Part | 0,414173 | 2,48504 | 55,96 | 124,25 |
| Total Variation | 0,740059 | 4,44035 | 100,00 | 222,02 |

Kuvio 30. Testijalusta, lukemahetki 15 s, session-data

11.3 DOE- Taguchi -testi

DOE- Taguchi -koesuunnittelumenetelmällä pyrittiin selvittämään kolmen eri tekijän vaikutusta saatuihin kovuusarvoihin. Tavoite tässä testissä on päinvastainen kuin perinteisessä kokeessa. Tavoitteena on kokeen aikana saada vaihtelua, jotta vaihtelua aiheuttavat tekijät voidaan erotella ja niitä voidaan näin ollen ohjata paremmin prosessissa. Alkuperäinen suunnitelma oli käyttää L8-ortogonaalimatriisia, jossa tarkasteltaisiin neljän eri tekijän; mittarin, mittaajan, pinnanlaadun sekä olosuhteen, vaikutusta tuloksiin. Mittareita testissä olisi ollut neljä ja muiden tekijöiden tasoja olisi ollut kaksi.

Taulukko 4. L8-Ortogonaalimatriisi

| Mittari | Mittaaja | Pinnanlaatu | Olosuhde | ShD 1 | ShD 2 | ShD 3 | ShD 4 | ShD 5 |
|---------|----------|-------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | |
| 1 | 2 | 2 | 2 | | | | | |
| 2 | 1 | 1 | 2 | | | | | |
| 2 | 2 | 2 | 1 | | | | | |
| 3 | 1 | 2 | 1 | | | | | |
| 3 | 2 | 1 | 2 | | | | | |
| 4 | 1 | 2 | 2 | | | | | |
| 4 | 2 | 1 | 1 | | | | | |

Kysyttyäni neuvoa Minitabin ja DOE Taguchi -menetelmän käytöstä Quality Knowhow Karjalainen Oy:stä, joka järjestää mm. Metsolla Minitab- ja Lean Six Sigma -koulutuksia, päätin muuttaa L8-matriisin L4-matriisiksi. Tämä siksi, että käytettäessä eri mittareita samassa testissä, saattaa mittareista aiheutuva vaihtelu piilottaa muista tekijöistä aiheutuvan vaihtelun alleen. Tästä ilmiöstä oli aikaisempaa näyttöä vastaavanlaisissa testeissä, joten testi tehtiin jokaiselle mittarille erikseen L4-ortogonaalimatriisi käyttäen.

Taulukko 5. L4-Ortogonaalimatriisi

| Mittaja | Pinnanlaatu | Olosuhde | ShD 1 | ShD 2 | ShD 3 | ShD 4 | ShD 5 |
|---------|-------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 1 | 1 | | | | | |
| 1 | 2 | 2 | | | | | |
| 2 | 1 | 2 | | | | | |
| 2 | 2 | 1 | | | | | |

Mittaritekijän puuttuessa voitiin testiä pienentää L4-matriisiksi, jossa tutkitaan kolmen tekijän; mittaajan, pinnanlaadun ja olosuhteen, vaikutusta tuloksiin. Mittaajia testissä oli kaksi, mitaaja 1 ja mitaaja 2. Pinnanlaadussa oli niin ikään kaksi tasoa, karkea (1) pinta ja hiottu (2) pinta. Karkea pinta oli pinnankarheudeltaan (R_a) n. 2 μm ja hiottupinta n. 0,5 μm . Olosuhdetasot olivat kuiva pinta (1) sekä yön yli hiontanes-teessä ollut pinta (2). Testi suoritettiin pinnanpoistoon tulleen asiakkaan CalJaguar-komposiittikalanteritelan pinnalla, jonka tavoitekovuus on 91 ShD.

11.3.1 Mittari 1, CV-viisaridurometri

Ensimmäinen testattava mittari oli CV Instrumentsin viisarimallin durometri (ks. kuvio 17), jolla mitatut arvot mitattiin käsin. Testin tuloksia tarkasteltiin keskiarvon ja signaali-kohinasuhteen avulla, joka mittaa tavoitearvon ja hajonnan välistä suhdetta. Tuloksia analysoitiin Minitab-ohjelman muodostamien keskiarvo- ja signaalikohinakäyrien (S/N-käyrien) ja vastetaulukoiden perusteella niiden helpon käytön ja tulkinnan vuoksi.

Taguchi Analysis: ShD 1; ShD 2; ... versus Mittaaja; Pinnanlaatu; ...

Response Table for Signal to Noise Ratios
Nominal is best ($10 \cdot \log_{10}(\bar{Y}^2/s^2)$)

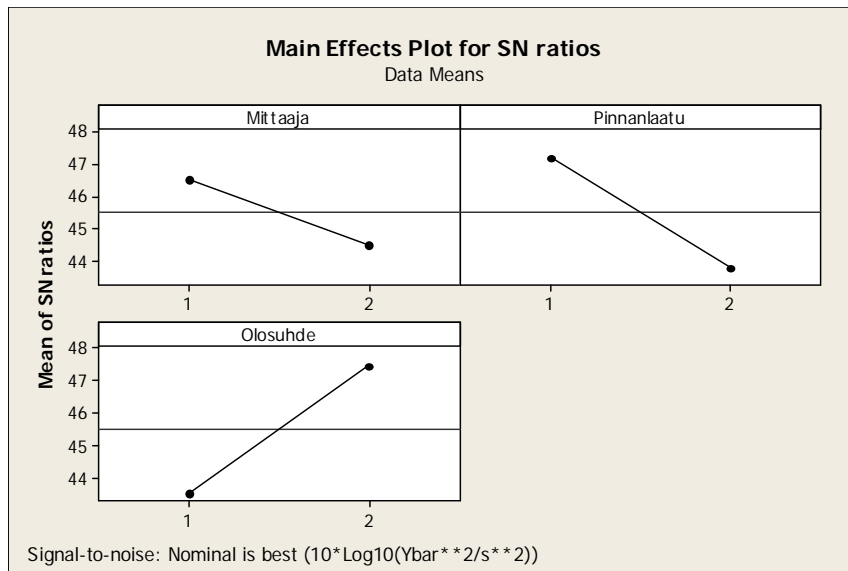
| Level | Mittaaja | Pinnanlaatu | Olosuhde |
|-------|----------|-------------|----------|
| 1 | 46,54 | 47,25 | 43,55 |
| 2 | 44,51 | 43,80 | 47,50 |
| Delta | 2,03 | 3,45 | 3,96 |
| Rank | 3 | 2 | 1 |

Response Table for Means

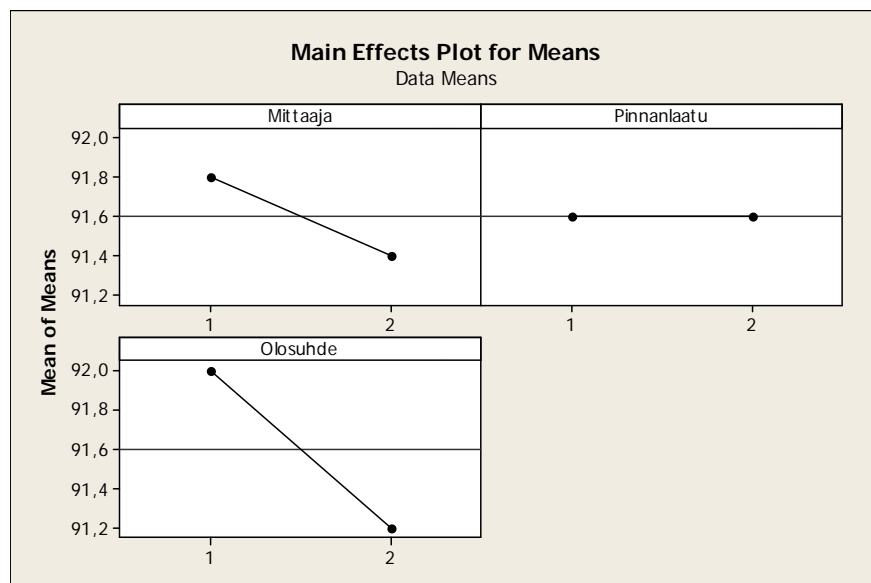
| Level | Mittaaja | Pinnanlaatu | Olosuhde |
|-------|----------|-------------|----------|
| 1 | 91,80 | 91,60 | 92,00 |
| 2 | 91,40 | 91,60 | 91,20 |
| Delta | 0,40 | 0,00 | 0,80 |
| Rank | 2 | 3 | 1 |

Kuvio 31. Vastetaulukko, CV-durometri

Vastetaulukon (kuvio 31) perusteella suurin vaikutus saatuihin tuloksiin oli olosuhteella, joka on asetettu molemmissa, niin signaali-kohinavastetaulukossa (Response Table for Signal to Noise Ratios) kuin keskiarvotaulukossa (Response Table for Means) 1:ksi eli eniten hajontaa aiheuttavaksi tekijäksi. Tavoitekovuus 91 ShD saavutettiin mittarilla testin perusteella valitsemalla jokaisen tekijän taso 2 eli mittaaja 2, pinnanlaatu hiottu, olosuhde hiontaneste. Pienin vaikutus tuloksiin keskiarvokäyrän mukaan oli pinnanlaadulla. Signaali-kohinasuhdetta tarkasteltaessa pienin vaikutus tuloksiin oli mittaajalla. Kuvion 32 ja 33 käyrät esittävät saman informaation kuin vastetaulukot, mutta ne havainnollistavat paremmin sen, mitkä tekijät vaikuttavat eniten tuloksiin. Mitä vaakasuorempi pisteiden väliin piirretty viiva on, sitä pienempi vaikutus kyseisellä tekijällä on tuloksiin.



Kuvio 32. S/N-käyrä, CV-durometri



Kuvio 33. Keskiarvo -käyrä, CV-durometri

11.3.2 Mittari 2, CV-durometri testijalustalla

Samoja tekijöitä ja tasoja käyttäen suoritettiin sama testi CV -durometrillä, mutta testissä mittari asetettiin sille suunnitellulle testijalustalle, jossa mittarin asento ja kuormitusvoima oli vakioitu. (ks. liite 2)

Taguchi Analysis: ShD 1; ShD 2; ... versus Mittaaja; Pinnanlaatu; ...

Response Table for Signal to Noise Ratios
Nominal is best ($10 \cdot \log_{10}(\bar{Y}^2/s^2)$)

| Level | Mittaaja | Pinnanlaatu | Olosuhde |
|-------|----------|-------------|----------|
| 1 | 44,45 | 52,20 | * |
| 2 | 52,20 | 44,45 | 48,32 |
| Delta | 7,75 | 7,75 | 0,00 |
| Rank | 1,5 | 1,5 | 3 |

Response Table for Means

| Level | Mittaaja | Pinnanlaatu | Olosuhde |
|-------|--------------|--------------|--------------|
| 1 | 91,70 | <u>91,55</u> | 92,00 |
| 2 | <u>91,55</u> | 91,70 | <u>91,25</u> |
| Delta | 0,15 | 0,15 | 0,75 |
| Rank | 2,5 | 2,5 | 1 |

Kuvio 34. Vastetaulukko, CV-durometri testijalustalla

Testi osoitti tässäkin tapauksessa keskiarvoa tarkasteltaessa merkittävimmän tekijän olleen olosuhde (ks. kuvio 34) Toisaalta S/N-suhdetta tarkasteltaessa olosuhteella on vähäisin merkitys tuloksiin, sillä ohjelma ei löytänyt signaalikohina-suhdetta olosuhdetekijän välillä. Ohjeiden mukaan analysoinnissa tulisi merkittävimmät tekijät valita signaali-kohinasuhteen perusteella, sillä se ottaa huomioon keskiarvon ja hajonnan välisen suhteen. Lähimmäksi tavoitearvo päästäisiin asetuksilla mittaaja 2, pinnanlaatu 1 (karkea) ja olosuhde 2 (hiontaneste).

Tarkasteltaessa mitattuja arvoja CV-viisarimallin durometrillä olivat arvojen väliset erot hyvin minimaalisia, joten johtopäätöksenä voidaan todeta testin pohjalta, ettei millään kolmella tekijällä ollut merkittävää vaikutusta tuloksiin. Tilanteeseen vaikuttaa osin mittarin karkea asteikko, jonka resoluutio oli 1 Shorea eikä tuloksia voitu arvioida silmämääräisesti kuin noin 0,5 Shoren tarkkuudella.

11.3.3 Mittari 3, Gibitre

Kolmas mittari oli sama Gibitre:n digitaalinen durometri, jolla aikaisempi R&R-testi suoritettiin (ks. kuvio 16, s. 43). CV-durometriin nähden mittari oli hankalampi käyttää telanpinnalla, sillä se oli selkeästi isompi kuin viisarimallindurometri ja kuormi-

tusvoima oli hankalampi kohdistaa mittariin. Näyttöresoluutioltaan se oli sen sijaan huomattavasti viisarimallia tarkempi, sillä mittarin resoluutio oli 0,1 Shorea. Minitabin analyysi suoritettiin mittarin antamaa maksimilukeman sekä lukemahetken 1 sekuntia arvoille.

Taguchi Analysis: ShD 1; ShD 2; ... versus Mittaaja; Pinnanlaatu; ...

Response Table for Signal to Noise Ratios
Nominal is best ($10 \cdot \log_{10}(\bar{Y}^2/s^2)$)

| Level | Mittaaja | Pinnanlaatu | Olosuhde |
|-------|----------|-------------|----------|
| 1 | 44,74 | 45,16 | 44,57 |
| 2 | 46,23 | 45,81 | 46,40 |
| Delta | 1,49 | 0,65 | 1,84 |
| Rank | 2 | 3 | 1 |

Response Table for Means

| Level | Mittaaja | Pinnanlaatu | Olosuhde |
|-------|--------------|--------------|--------------|
| 1 | <u>91,54</u> | <u>91,30</u> | 91,86 |
| 2 | 91,80 | 92,04 | <u>91,48</u> |
| Delta | 0,26 | 0,74 | 0,38 |
| Rank | 3 | 1 | 2 |

Kuvio 35. Vastetaulukko, Gibitre, maksimiarvo

Taguchi Analysis: ShD 1; ShD 2; ... versus Mittaaja; Pinnanlaatu; ...

Response Table for Signal to Noise Ratios
Nominal is best ($10 \cdot \log_{10}(\bar{Y}^2/s^2)$)

| Level | Mittaaja | Pinnanlaatu | Olosuhde |
|-------|----------|-------------|----------|
| 1 | 40,28 | 39,51 | 38,40 |
| 2 | 40,15 | 40,92 | 42,04 |
| Delta | 0,13 | 1,41 | 3,65 |
| Rank | 3 | 2 | 1 |

Response Table for Means

| Level | Mittaaja | Pinnanlaatu | Olosuhde |
|-------|--------------|--------------|--------------|
| 1 | 90,12 | 89,98 | <u>90,43</u> |
| 2 | <u>90,27</u> | <u>90,41</u> | 89,96 |
| Delta | 0,15 | 0,43 | 0,47 |
| Rank | 3 | 2 | 1 |

Kuvio 36. Vastetaulukko, Gibitre, lukemahetki 1 s.

Testistä saadut tulokset olivat hyvin samansuuntaiset kuin CV-mittarilla suoritetuissa, joissa olosuhde muodostui merkittävimäksi tekijäksi, mutta jolla ei ollut kuitenkaan merkittävää vaikutusta saatuihin tuloksiin. Kuten jo R&R-testi osoitti, käyttämällä mittarin maksimiarvoa ovat saadut kovuudet selvästi korkeampia, mutta maksimiarvoa käytettäessä suurimman ja pienimmän arvон erotus on useasti isompi kuin lukemahetkellä 1 sekuntia. Maksimiarvoa käytettäessä lähimmäksi tavoitearvo 91 Shorea päästään valitsemalla mittaaja 1, pinnanlaatu 1 eli karkea sekä olosuhde 2 eli hiontaneste. Vastaavasti lukemahetkellä 1 sekuntia vastaavat tasot olisivat 2, 2 ja 1

11.3.4 Mittari 4, Barcol

Viimeinen testissä käytetty mittari oli Bareissin digitaalinen Barcol-mittari (ks. kuvio 13, s 27), joka näyttää mittaustulokset Barcol-asteikolla. Barcol-asteikkoa käytetään pääasiassa komposiittirakenteiden kovettumisreaktion todentamiseen, eikä niinkään laadunvalvonnan mittauksissa, mutta testissä haluttiin selvittää mittarin soveltuvuutta laadunvalvonnan mittauksiin. Mittarin resoluutio oli varsin karkea 1 Barcolia, vaikka kyseessä oli digitaalimittari.

Taguchi Analysis: HBa 1; HBa 2; ... versus Mittaaja; Pinnanlaatu; ...

Response Table for Signal to Noise Ratios
Nominal is best ($10 \cdot \log_{10}(\bar{Y}^2/s^2)$)

| Level | Mittaaja | Pinnanlaatu | Olosuhde |
|-------|----------|-------------|----------|
| 1 | 32,13 | 32,15 | 31,31 |
| 2 | 31,93 | 31,91 | 32,75 |
| Delta | 0,20 | 0,24 | 1,44 |
| Rank | 3 | 2 | 1 |

Response Table for Means

| Level | Mittaaja | Pinnanlaatu | Olosuhde |
|-------|----------|-------------|----------|
| 1 | 49,30 | 49,40 | 51,20 |
| 2 | 51,40 | 51,30 | 49,50 |
| Delta | 2,10 | 1,90 | 1,70 |
| Rank | 1 | 2 | 3 |

Kuvio 37. Vastetaulukko, Barcol

Signaali-kohinasuhteen mukaan merkittävin tekijä tämänkin mittarin tapauksessa oli olosuhde, eli oliko pinta kuiva vai hiontanesteestä kostea. Keskiarvoa tutkimalla merkittävimmäksi tekijäksi nousi mittaaja. Shore-mittareihin verrattuna keskiarvoa tutkimalla nähdään tulosten hajonnan olevan suurempia Barcol-mittarilla. Toisaalta suoraa vertailua ei voida näiden kahden kesken tehdä eri asteikon takia. Suurempaan hajontaan vaikutti osaltaan Shore-mittareihin nähden suurempi vaadittu kuormitusvoima, joka oli käsinmittauksessa hankalaa toistaa joka kerta samalla tavalla, varsinkin telan pinnalta mitattaessa.

12 Tulokset

12.1 R&R-testi

Suoritetut R&R-testit osoittivat, että käsin mittaamalla lähes kaikki prosessissa ilmenevä vaihtelu aiheutui itse mittaussysteemistä (ks. kuvio 38). Toisin sanoen mittaussysteemi ei pystynyt käsin mittaamalla erottelemaan mittaussysteemistä ja itse pinnoitusprosessista aiheutuvaa vaihtelua toisistaan. Testijalustan avulla suoritettuisissa mittauksissa mittaussysteemistä aiheutuva vaihtelu oli noin 50 % kokonaisvaihtelusta ja loput vaihtelusta aiheutui näytteiden välisistä eroista, mikä on peräisin itse prosessin vaihtelusta. Tulosten perusteella voidaan todeta, että mittaussysteemin aiheuttama vaihtelu on liian suuri verrattuna pinnoitusprosessista aiheutuvaan vaihteluun sekä asetettuihin toleranssirajoihin nähden, jotta mittaussysteemiä voitaisiin pitää suorituskykyisenä.

Käsinmittaus, maksimiarvo

| | Vaihtelu komp. (%) | Vaihtelu (%) | Toleranssi (%) |
|------------------|--------------------|--------------|----------------|
| Gage R&R | 99,25 | 99,62 | 319,48 |
| Toistettavuus | 89,9 | 94,81 | 304,07 |
| Uusittavuus | 9,35 | 30,57 | 98,04 |
| Näytevaihtelu | 0,75 | 8,69 | 27,86 |
| Kokonaisvaihtelu | 100 | 100 | 320,7 |

Käsinmittaus, lukemahetki 1 s.

| | Vaihtelu komp. (%) | Vaihtelu (%) | Toleranssi (%) |
|------------------|--------------------|--------------|----------------|
| Gage R&R | 100 | 100 | 334,3 |
| Toistettavuus | 73,36 | 85,65 | 286,34 |
| Uusittavuus | 26,64 | 51,61 | 172,53 |
| Näytevaihtelu | 0 | 0 | 0 |
| Kokonaisvaihtelu | 100 | 100 | 334,3 |

Mittausilta vaadittava kyvykkyy Six Sigmassa

| | Vaihtelu komp. (%) | Vaihtelu (%) | Toleranssi (%) |
|-------------|--------------------|--------------|----------------|
| Erinomainen | < 1 % | < 10 % | < 10 % |
| OK | 1 % - 9 % | 10 % - 30 % | 10 % - 30 % |
| Huono | > 9 % | > 30 % | > 30 % |

Vaihtelu komp. tarkasteltaessa suorituskykyisessä mittaussysteemissä näytevaihtelun osuus tulisi olla mahdollisimman suuri.

Testijalusta, maksimiarvo

| | Vaihtelu komp. (%) | Vaihtelu (%) | Toleranssi (%) |
|------------------|--------------------|--------------|----------------|
| Gage R&R | 49,11 | 70,08 | 191,08 |
| Toistettavuus | 38,66 | 62,18 | 169,53 |
| Uusittavuus | 10,45 | 32,33 | 88,15 |
| Näytevaihtelu | 50,89 | 71,34 | 194,5 |
| Kokonaisvaihtelu | 100 | 100 | 272,65 |

Testijalusta, lukemahetki 1 s.

| | Vaihtelu komp. (%) | Vaihtelu (%) | Toleranssi (%) |
|------------------|--------------------|--------------|----------------|
| Gage R&R | 48,83 | 69,88 | 180,91 |
| Toistettavuus | 44,03 | 66,36 | 171,78 |
| Uusittavuus | 4,8 | 21,91 | 56,72 |
| Näytevaihtelu | 51,17 | 71,53 | 185,17 |
| Kokonaisvaihtelu | 100 | 100 | 258,87 |

Testijalusta, lukemahetki 15 s.

| | Vaihtelu komp. (%) | Vaihtelu (%) | Toleranssi (%) |
|------------------|--------------------|--------------|----------------|
| Gage R&R | 68,68 | 82,87 | 183,99 |
| Toistettavuus | 45,81 | 67,68 | 150,27 |
| Uusittavuus | 22,87 | 47,82 | 106,18 |
| Näytevaihtelu | 31,32 | 55,96 | 124,25 |
| Kokonaisvaihtelu | 100 | 100 | 222,02 |

Kuvio 38 R&R-testin tulokset

Suurimmat ongelmat mittaussysteemissä löytyivät toistettavuudesta eli vaihtelusta, joka aiheutuu mittalaitteesta. Mittaussysteemistä aiheutuva vaihtelu koostui pääasiassa toistettavuusvirheistä. Parhaisiin tuloksiin päästiin testien perusteella, kun näytteet mitattiin testijalustan avulla ja lukemahetkenä käytettiin 1 sekuntia. Kyseisessä testissä toistettavuusvirheistä aiheutuvan vaihtelun osuus oli noin 90 % mittaussysteemistä aiheutuvasta (Gage R&R) vaihtelusta. Uusittavuusvirheen osuus mittaussysteemistä aiheutuvasta vaihtelusta oli loput noin 10 %, ja kokonaisuudessaan uusittavuusvirheen osuus prosessin kokonaisvaihtelusta oli vain noin 5 %. Toistettavuusongelmat johtuvat useasti pienistä tekijöistä kuten mittalaitteen sisäisistä kitkoista, välyksistä, asentovaihteluista ja mittausvoiman vaihteluista. R&R-testien aikana testijalustaa käyttämällä toistettavuusvirhettä saatiin laskettua käsinmittaukseen verrattuna, kun mittarinasento ja kuormitusvoima vakioitiin. Testijalustan avulla toistettavuusvirheen osuus saatiin lähes puolitettua, mutta siltikään mittaussysteemin suorituskykyä ei saatu nostettua vaatimusten tasolle. Syyt mistä suuri toistettavuusvirhe aiheutuu testijalustaakin käytettäessä, ovat suurimmaksi osaksi itse menetelmästä aiheutuvia. Mittalaite ja itse mittausmenetelmä ei kykene mittaamaan yksittäisiä mittauksia tarpeeksi tarkasti ja toistettavasti mittauksesta toiseen. Nyrkkisäännön mukaan kohde tulisi mitata menetelmällä, jossa mittausepävarmuus on korkeintaan 10 % asetetusta toleranssista eli tässä tapauksessa mittalaitteesta aiheutuva virhe

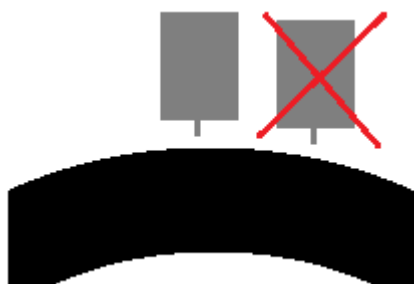
saisi olla korkeintaan 0,2 Shorea. Komposiittipinnoitteiden kohdalla mittausepävarmuutta lisää sekin, että mittauksissa liikutaan komposiittipinnoitteiden osalla käyteen asteikon aivan yläpäässä. Optimaalinen mittausalue Shore D -menetelmälle on 20–80 ShD välillä, kun mitattavat kovuudet ovat tällä hetkellä 85–95 ShD välillä.

Uusittavuusvirheen eli mittaajasta aiheutuvan hajonnan osuus mittaussysteemistä aiheutuvasta hajonnasta oli merkittävästi pienempi kuin toistettavuusvirheen osuus. Mittaajien välillä havaittiin selvää johdonmukaisuutta mittauksissa, jotka suoritettiin testijalustaa hyödyntäen. Testijalustankaan avulla uusittavuusvirhettä ei saatu poistettua kokonaan, sillä näytteen asettelu ja vaihtelut kuormitusnopeudessa eri mittaajien kesken aiheuttivat pientä vaihtelua.

Materiaalin sisäisen vaihtelun ja epähomogeenimaisuuden vaikutusta ei sovi unohtaa arvioidessamme saatujen tulosten hajontaa. Näytteiden sisäinen vaihtelu oli jo ennen testejä tiedostettu ongelma ja tiedettiin, että se tulee hankaloittamaan mittausepävarmuuden määrittämistä. R&R-testiä suoritettaessa havaittiin, että samasta testipalasta otetut mittaukset käsinmittaamalla saattoivat vaihdella keskenään jopa 4–5 Shorea ja testijalustallakin 2–3 Shorea. Osa tästä vaihtelusta johtui mittaussysteemistä, mutta osa puhtaasti materiaalin sisäisistä kovuuseroista, mikä näkyy heikompana toistettavuutena. Mittauksissa mittaajan tulisikin olla tietoinen tavoitearvosta ja vaihteluvälistä, jotta mittaaja voi mittauksen yhteydessä arvioida onko tulos luotettava, vai onko mittaus kenties suoritettu väärin tai materiaalin kohdasta, jossa on esimerkiksi huokoisuutta. Mittaustulosten pohjalta karkeana hajonta alueena voidaan pitää noin 2–3 Shorea. Mikäli yksittäiset tulokset vaihtelevat yli 3 Shorea keskiarvosta tai muista mittaustuloksista tulisi mittaus suorittaa uudestaan.

Mittausten yhteydessä havaittiin myös, että mittausmenetelmä on varsinkin testijalustalla mitattaessa hyvin herkkä näytepalan oikeaoppiselle asetelulle. Näytepala tulisi asettaa alustalle siten, että mittakärki painautuu näytepalan kaarevan pinnan ns. huippukohtaan (ks. kuvio 39). Mikäli näytekappaletta ei ollut aseteltu oikein, näkyi se huomattavasti alhaisimpina tuloksina, sillä mittalaitteen paininjalan kosketus näytepalan pintaan esti mittapään tunkeutumisen näytepalaan. Havaitulla seikalla saattaa olla merkittäväkin vaikutus mittaussysteemin suorituskykyä arvioitaessa, ja syy siihen miksi testijalustallakaan toistettavuusvirhettä ei saatu pienennettyä enem-

pää. Telanpinnalta mitattaessa vastaava ilmiö havaittiin, mikäli testijalustaa ei ollut asetettu keskelle telan lakipistettä. Optimaalisessa tilanteessa mittaukset tulisikin suorittaa täysin tasaiselta pinnalta, mutta komposiittiteloja mitattaessa se ei ole mahdollista, joten mittajaan tulee huolehtia mittalaitteen ja jalustan oikeaoppisesta asettamisesta.



Kuvio 39. Näytekkappaleen ja mittakärjen asemointi

RR-testin tuottaman mittausaineiston perusteella voitiin arvioida lukemahetken vaikutusta saatuihin tuloksiin. Standardi suosittelee Shore D -asteikon kohdalla käytettävän 15 sekunnin lukemahetkeä sekä maksimilukemaa. Mitattua maksimiarvoa vertaessa lukemahetken 1 sekuntia ja 15 sekuntia kovuusarvoihin, havaittiin kovuuden laskevan maksimiarvoon nähden yhden sekunnin aikana noin 1 Shorea ja 15 sekunnin aikana 2 Shorea. Suoritetun testin mukaan pienin kokonaisvaihtelu saatiin aikaiseksi lukemahetkellä 1 sekuntia. R&R-testin tulosten pohjalta olisi suositeltavaa käyttää testijalustan avulla suoritettavissa mittauksissa lukemahetkenä ennemmin 1 sekuntia kuin maksimiarvoa tai lukemahetkeä 15 sekuntia. Mikäli mittaukset joudutaan suorittamaan käsin, on maksimiarvon käyttäminen perusteltua etenkin viisarimallin mittaria käytettäessä jo käytännönsyistä. Käsinmittauksessa ja maksimiarvoa käytettäessä tulee kuitenkin huomioida nopeus, jolla paininjalka ja painin painetaan testattavaan pintaan. Mikäli kuormitus on ns. iskumainen, näkyy se heti suurempina tuloksina maksimiarvo käytettäessä. Paininjalka tulisi painaa kappaleeseen mahdollisimman nopeasti aiheuttamatta iskumaista kuormitusta, ja käyttämällä juuri sen verran painetta, että saavutetaan kiinteä kosketus paininjalan ja kappaleen välillä.

Standardi suosittelee, että ilmoitettu kovuus olisi viiden kovuusmittauksen keskiarvo. Metsolla on käytössä käytäntö, että jokaisesta mitattavasta telasta suoritetaan 12 mittausta, joista suurin ja pienin arvo jätetään pois ja jäljellä olevista 10 mittausluksesta lasketaan keskiarvo, joka on telan ilmoitettu kovuus. Kyseinen käytäntö piilottaa alleen yksittäisten mittausten vaihtelun, mutta ei poista sitä tosiasiaa, että annettuun komposiittipinnoitteen toleranssiin (± 1 ShD) nähden menetelmä ei ole tarpeeksi suorituskykyinen toistettavien mittausten suorittamiseen. Liitteessä 5 on havainnollistettu mittausten vaihteluvälin ja keskihajonnan avulla kuinka suuri ero saadaan aikaiseksi mikäli hajontaa ja vaihteluväliä tarkastellaan yksittäisten tulosten ja yhdeksän mittauksen keskiarvon mukaan. Testien tuottamien kaikkien mittaustulosten keskihajonta oli 0,91 ShD ja vaihteluväli oli 5,2 ShD. Laskemalla vastaavat luvut näytteistä mitattujen yhdeksän mittauksen keskiarvon mukaan oli keskihajonta 0,47 ShD ja vaihteluväli 2 ShD.

12.2 DOE- Taguchi -testi

DOE Taguchi -testin tarkoituksena oli selvittää määritettyjen kolmen eri tekijän vaikutusta saatuihin tuloksiin sekä tulosten hajontaan. Testeissä kävi ilmi, että suurin yksittäinen vaikutus tuloksiin oli pinnan olosuhteella, eli oliko pinta kuiva vai oliko se märkä. Verrattaessa olosuhteen vaikutusta mittaustulosten keskiarvoihin, havaittiin tulosten olleen märällä pinnalla jokaisessa neljässä tapauksessa alhaisempia kuin kuivalla. Testin perusteella voidaan todeta, että komposiittipinnan kovuus laskee, mikäli se altistetaan kosteudelle. Kovuuden lasku testin tapauksessa oli noin 0,5–0,8 Shorea. Lämpötilan vaikutusta pinnan kovuuteen testissä ei tarkasteltu, sillä eri lämpötila vyöhykkeiden valmistelu isolle telapinnalle oli hieman haasteellista. Teoriatietoon ja aikaisempiin havaintoihin tukeutuen voidaan kuitenkin olettaa, että korkeammassa lämpötilassa mitatut tulokset olisivat olleet niin ikään alhaisempia.

Pinnanlaadun kohdalla havaittiin vastaavanlainen ilmiö kuin kosteuden kohdalla. Mikäli mittaus suoritettiin karkealta pinnalta, oli saadut kovuusarvot yhtä tapaukselta luokkaan ottamatta alhaisempia kuin hiotulta pinnalta saadut tulokset. Poikkeavan tapauksenkin kohdalla saadut kovuusarvot olivat keskiarvon mukaan täsmälleen samat.

Havainto tukee R&R-testin yhteydessä esiinnoussutta arviota siitä, että karheammalta pinnalta mitatut arvot ovat alhaisempia kuin sileältä pinnalta mitatut arvot.

Testin mukaan kahden eri mittaajan välillä ei ollut suurta vaikutusta saatuihin tuloksiin. Kahdessa testissä mittaajan 1 saamat arvot oli keskiarvon mukaan suurempia kuin mittaajan 2, kun kahden muun testin kohdalla tilanne oli toisinpäin. Mittaajien välisen eron pienuuteen vaikutti merkittävästi se, että molempien mittaajien mittaustekniikat olivat hyvin samanlaisia. Merkittävämpiä eroja olisi saatu aikaan, mikäli mittaajien käyttämät mittaustekniikat olisivat eronneet toisistaan merkittävästi. Kyseiseen havaintoon perustuen olisikin suositeltavaa, että ainakin yrityksen sisällä käytetyt mittaustekniikat yhtenäistettäisiin eri mittaajien kesken. Mittaajasta aiheutuvaa mittausepävarmuustekijää voidaan tässäkin tapauksessa vähentää testijalustan avulla.

Testin aikana ja sen tulosten pohjalta voitiin arvioida viisarimallin durometrille suunnitellun testijalusta vaikutusta tuloksiin ja tulosten hajontaan. Testistä saatujen tulosten mukaan testijalustalla ei ollut niin merkittävää vaikutusta saatuihin tuloksiin tai niiden hajontaan kuin aikaisemmin odotettiin. Käsinmittaamalla saadut tulokset vaihtelivat 91–93 ShD välillä, kun testijalustalla arvot vaihtelivat 91–92 ShD välillä. Mikäli käytössä olisi ollut lukematarkkuudeltaan tarkempi mittari, olisi testijalustalla saavutettu etu voinut osoittautua selkeämmäksi. Testijalustan käytöllä voidaan kuitenkin minimoida mittaajasta ja kuormitusvoimasta aiheutuvaa epävarmuustekijää, ja näin ollen mittausten yhteydessä voidaan keskittyä muiden mittausepävarmuutta aiheuttavien tekijöiden arviointiin ja niiden minimoimiseen.

Testi osoitti, että tarkasteluilla tekijöillä on vaikutusta saatuihin tuloksiin. Yksittäisen tekijän vaikutus tuloksiin ei välttämättä ole yksistään suuri, mutta jos mittauskäytännöt poikkeavat eri mittauspisteissä saattaa tulokset poiketa merkittävästikin. Esimerkiksi jos mittauspisteessä 1 mittaukset suoritetaan märältä ja karhealta pinnalta ja mittauspisteessä 2 hiotulta ja kuivalta pinnalta saattaa saadut tulokset poiketa jopa yli 2 Shore:a. Materiaalista ja mittaolosuhteista aiheutuvaa mittaustulosten hajontaa ei voida poistaa kokonaan, mutta vakioimalla mittaustapahtumaa ja olosuhteita voidaan vaikuttaa tulosten hajontaan ja aikaansaada vertailukelpoisia tuloksia. Testin tuottaman aineiston pohjalta olisi suositeltavaa, että mittaukset suoritettaisiin aina

kuivalta, mahdollisimman viimeistellyltä pinnalta. Mittauksen tulisi suorittaa kokenut mittaaja, joka tuntee menetelmän, tavoitearvon ja tuloksiin vaikuttavat epävarmuus-tekijät.

12.3 Testijalusta Shore -durometrille

Opinnäytetyön aikana nousi esiin ajatus testijalustasta, jota voitaisiin hyödyntää pinnoitettujen telojen kovuuden mittauksessa. Markkinoilta löytyvät mallit on suunniteltu pienten testipalojen mittaukseen, eikä niitä voitu suoraan soveltaa isojen telapintojen mittaukseen, joten jalusta tuli suunnitella itse. Alkuperäisenä ideana oli hyödyntää jo markkinoilta löytyviä ratkaisuja, joita muokkaamalla jalusta olisi soveltunut telapintojen kovuuden mittaukseen. Markkinoilta ei kuitenkaan löytynyt tarpeeksi hyvää ja taloudellista ratkaisua, jota testijalustassa olisi voitu hyödyntää, joten jalusta päätettiin rakentaa alusta loppuun asti itse. Suunnittelussa testijalustassa yhdistettiin perinteisen testijalustan (ks. kuvio 7) rakenne ja ns. päältämittauslaite (ks. liite 3), josta otettiin mallia testijalusta jalkoihin. Testijalustan suunnittelusta vastasi lisäksi, työnohjaaja Jouni Ryyänen sekä Rautpohjan mittalaite- ja kalibrointiasiantuntija Markku Arvonen. Testijalusta valmistettiin suunnitelmien pohjalta Rautpohjan protopajalla.

Lopputuloksena syntyi testijalusta (ks. liite 2) tuotannossa käytössä olevalle viisari-malliselle Shore-durometrille (ks. kuvio 17, s. 44). Testijalustan käytön tarkoituksena on vakioida käytettävä kuormitusvoima sekä mittarinasento, jotta mittaajasta aiheutuva mittausepävarmuus voitaisiin minimoida. Mittaria kuormitetaan mittauksen aikana ISO 868 -standardin suosittelemalla 5 kg:n punnuksella, jota liikutetaan punnuksen vieressä olevalla epäkeskopyörällä. Näin ollen kuormitusvoima saadaan vakioitua mittauksesta toiseen. Epäkeskomekanismin avulla voidaan vähentää myös iskumaisesta kuormitusliikkeestä aiheutuvia liian suuria kovuusarvoja. Alun perin ajatuksena oli, että jalustaa voitaisiin käyttää myös Barcol-mittarin (ks. kuvio 13, s. 27) kanssa, mutta testimittaukset osoittivat, että 5 kg:n punnus oli liian kevyt sille mittarille. Shore A -mittaria käytettäessä tulee kuormitusvoimana käyttää standardin suosittellemaa 1 kg:n punnusta.

12.4 Käsikirja kertamuovien kovuudenmittaukseen

Työn varsinaisena lopputuloksena oli tarkoitus teoriamateriaalin, testimittausten sekä työn aikana nousseiden havaintojen perusteella laatia ns. käsikirja tai ohjeistus pehmeiden materiaalien kovuudenmittaukseen. Rautpohjan yksikkö keskittyy pääasiassa polyuretaani- ja komposiittitelojen pinnoitukseen, joten käsikirja on kohdistettu tämän takia polyuretaani- ja komposiittipinnoitteille. Polyuretaanipinnoitteiden kovuudenmittaukseen pätevät hyvin pitkälti samat lainalaisuudet kuin komposiittipinnoitteille, mutta polyuretaanipinnoitteiden ollessa pehmeämpiä on mm. lämpötilalla ja kosteudella suurempi vaikutus saatuihin tuloksiin. Polyuretaanipinnoitteiden kovuudenmittausta oli tutkittu Rautpohjassa aikaisemmin, ja tutkimusten pohjalta PU-pinnoitteiden kovuudenmittausta varten oli kehitetty oma mittalaite (ks. kuvio 6). Toisaalta pinnoitusten hiontoja suoritetaan myös muissa halleissa, joissa käytössä on kuvion 5 mukaiset P&J -mittalaitteet, joten ohjeistuksessa pureuduttiin tämän mittarin oikeaoppiseen käyttöön.

Käsikirjasta haluttiin mahdollisimman tiivis eikä siitä haluttu tekstin täyteistä kirjaa, vaan ydinasiat esiintuova ohjeistus komposiittipinnoitteiden Shore D -mittauksesta ja PU-pinnoitteiden P&J-mittauksesta. Käsikirjassa esitellään lyhyesti yleisiä asioita kertamuovien kovuudenmittauksesta, tuodaan esiin asioita joita mittauksissa tulisi huomioida sekä ohjeistetaan suoritettavia Shore D- ja P&J-mittauksia. P&J-mittausten kohdalla ohjeistus pohjautuu pääasiassa aikaisempiin tutkimuksiin, standardiin sekä käytettävien mittalaitteiden käyttöohjeisiin. Opinnäytetyön raportti toimii käsikirjan tukena. Raportista voidaan tarkemmin selvittää, mistä käsikirjassa esiintuodut havainnot ovat peräisin.

13 Pohdinta

Työn tavoitteena oli tutustua polymeerimateriaalien kovuuden mittaukseen, selvittää mittaustapahtumaan vaikuttavia tekijöitä sekä Gage R&R- ja DOE- Taguchi -testin avulla selvittää, mistä tekijöistä käytössä olevan mittausmenetelmän mittausepä-

varmuus ja tulosten hajonta muodostuu. Teoria-aineiston sekä testimittausten tulosten pohjalta lopputuloksena tuli koostaa käsikirja kertamuovipinnoitteiden kovuuden mittauksesta.

Työn alussa asetetut tavoitteet saavutettiin ja lopputuloksena syntyi käsikirja tai pikemminkin ohjeistus polyuretaani- ja komposiittipinnoitteiden mittaukseen. Työssä onnistuttiin löytämään merkittävimpiä tekijöitä, jotka vaikuttavat yksittäisiin mittaus-tuloksiin sekä löytämään keinoja, joilla pystytään jatkossa vähentämään yksittäisten mittausten hajontaa komposiittipinnoitteiden kovuuden mittauksen kohdalla. Suoritet- tujen mittausten perusteella osoitettiin, ettei käytössä olevalla menetelmällä kye- tä mittaamaan yksittäisiä mittauksia komposiittipinnoitteista tarpeeksi tarkasti ja toistettavasti asetettuihin toleransseihin nähden. Työn aikana nousseiden havainto- jen perusteella suunniteltiin ja valmistettiin testijalusta tuotannossa käytössä olevalle kovuusmittarille. Suunnitellun testijalustan avulla voidaan vähentää mittaajasta ai- heutuvaa epävarmuustekijää komposiittitelojen kovuusmittausten aikana ja näin aikaansaada tarkempia ja toistettavia tuloksia.

Rajallisen ajan takia työssä ei ehditty perehtymään tarkemmin polyuretaanipinnoit- teiden kovuuden mittaamiseen P&J-menetelmällä. Toimeksiantaja halusi kuitenkin sisällyttää käsikirjaan myös PU-pinnoitteiden kovuuden mittausta käsittelevän osan. Tämän johdosta PU-pinnoitteiden mittausta koskeva osuus käsikirjassa jäi hieman pintapuolisemmaksi kuin komposiittipinnoitteiden osuus. PU-pinnoitteiden kohdalla ohjeistuksessa jouduttiin tyytymään pääosin standardiin sekä mittalaittevalmistajien ohjeisiin. Toisaalta PU-pinnoitteiden kovuudenmittausta oli tutkittu yrityksessä jo aikaisemmin. Tutkimusten pohjalta oli kehitetty automaattinen P&J-menetelmään perustuva PU- ja kumipinnoitteiden kovuudenmittauslaite, jonka avulla voidaan vä- hentää ulkoisista tekijöistä ja mittaajasta aiheutuvia epävarmuustekijöitä.

Saatuja tuloksia tarkasteltaessa tulee muistaa, että kaikkiin mittauksiin liittyy mitta- usepävarmuutta, myös mittausepävarmuuden määrittämiseen. Mittausten kannalta oli tärkeää, että R&R-testissä käytetty mittalaite oli uusi ja vasta kalibroitu, joten mit- taustulosten luotettavuutta arvioitaessa kalibroinnilla ei pitäisi olla suurta vaikutusta. Tulosten arviointia varsinkin R&R-testin kohdalla hankaloitti vertailumateriaalin puu- te. DOE- Taguchi -testin kohdalla tulosten arviointi oli helpompaa, sillä suurin osa

esiin nousseista huomioista olosuhteiden vaikutuksesta mittaustuloksiin oli aikaisempaa näyttöä. Tuloksia tarkasteltaessa täytyy huomioida, että esimerkiksi R&R-testissä saadut tulokset ovat vertailukelpoisia vain kyseiselle mittalaitteelle. Mikäli jatkossa halutaan arvioida muiden mittalaitteiden suorituskykyä, tulee kyseinen testi suorittaa tarkastellulle mittarille erikseen.

R&R-testissä käytetyt näytteet oli kerätty neljästä eri projektista saatujen pantanäytteistä, joiden pinnanlaatu ei vastannut aivan sitä, mitä se autenttisisissa mittauksissa olisi. Mikäli käytössä olisi ollut tavoitearvoa vastaavat ja pinnankarheudeltaan paremmat näytteet, olisi saatuja tuloksia ollut helpompi verrata aikaisemmin mittaauksiin. R&R-testin kohdalla tulee muistaa, että testissä on tarkasteltu mittalaitteen täsmällisyyttä (precision) eli vaihtelua. Mikäli jatkossa halutaan selvittää mittalaitteen tarkkuus (accuracy) eli se, kuinka monen Shoren tarkkuudella mittalaite kykenee mittaamaan kappaleita, täytyisi mittalaitteelle suorittaa ns. bias-testi. Bias-testissä selvitetään referenssipaloja käyttämällä mittalaitteesta aiheutuva poikkeama asetettuun tavoitearvoon nähden. Käytettävien referenssipalojen tulee olla testissä sellaisia, että palojen tavoitearvo tiedetään tarkasti ja ettei näytteissä esiinny sisäistä vaihtelua. Syntyvä poikkeama ja vaihtelu voidaan näin ollen kohdistaa suoraan mittalaitteelle. Gage R&R -testin aikana kyseistä tutkimusta ei voitu suorittaa, sillä käytetyt näytepalat eivät vastanneet pinnoitteen tavoitearvoa, eikä mittausten yhteydessä voitu osoittaa, johtuiko poikkeama itse mittalaitteesta vai materiaalin sisäisestä vaihtelusta. Oletettavasti testissä havaittuun poikkeamaan vaikuttivat molemmat tekijät.

Yrityksen käyttöön jäävän ohjeistuksen avulla tuodaan mittaajien tietoon merkittävimpiä kovuudenmittaukseen ja sen tuloksiin vaikuttavat tekijät, jotka tulisi huomioida mittausten yhteydessä. Ohjeistuksen ja työn raportissa nousseiden huomioiden avulla mittaustapahtumaa voidaan vakioda, jotta eri mittaajien ja eri mittauspaiikkojen välisistä eroista aiheutuvaa mittaustulosten hajontaa voidaan pienentää. Valmistetun testijalustan avulla voidaan vähentää käytössä olevien viisarimallisten durosometrien mittaajasta aiheutuvaa epävarmuustekijää ja aikaan saada hajonnaltaan pienempiä tuloksia. Se, kuinka aktiivisesti yksittäinen mittaaja noudattaa ja toteuttaa ohjeistusta riippuu mittaajasta itsestään ja siitä, kuinka mittaaja motivoidaan suorittamaan mittaukset tarkasti ja huolellisesti.

Työn aikana nousi esiin joitain asioita, joihin jatkossa tulisi kiinnittää huomiota. Työn aikana havaittiin, että eri valmistajien mittareiden käyttö mittauksissa aiheuttaa it- sessään jo tulosten hajontaa. Suositeltavaa olisikin, että mittaustapahtuman ja olo- suhteiden vakioinnin lisäksi yrityksessä yhtenäistettäisiin myös käytettävä mittauskalusto eri mittauspaiikkojen kesken. Mittareiden säännöllisestä tarkistuksesta, huollosta ja kalibroinnista tulisi pitää parempaa huolta, jotta voidaan varmistua mittaustulosten täsmällisyydestä. Jokaisen mittaajan tulisi olla myös tietoinen mitattavan pinnan tavoitearvosta ja yksittäisten tulosten hajonnasta, jotta mittaaja voi mittausten yhteydessä arvioida, onko mittausta suoritettu asianmukaisesti. Pitemmällä aikavälillä voidaan miettiä, onko kovuudenmittaus kohteen ja materiaalin hankaluuden sekä karkean mittaamenetelmän johdosta paras mahdollinen myynnin käyttämä spesifikaatio tai määrittely eri telapinnoille. Myynnin yhtenä vaihtoehtona voitaisiin ajatella mahdollisuutta, että komposiittipinnoitteiden kovuuden kohdalla luovuttaisiin toleranssien käytöstä kokonaan. Kovuus ilmoitettaisiin vain ns. nimelliskovuutena. Mikäli yrityksessä tukeudutaan jatkossakin Shore-mittaamenetelmään, on mittausepävarmuuden kanssa tultava toimeen, ainakin siihen asti, kunnes jokin korvaava ja tarkempi menetelmä löydetään. Työn aikana suoritettujen tiedusteluiden pohjalta, tällä hetkellä markkinoilla ei ole tarkempaa Shore-menetelmän korvaavaa mittaamenetelmää komposiittimateriaalille. Ja toisaalta, vaikka uusi mittaamenetelmä löydetäisiin, sen sisäänajaminen vuosikautia käytössä olleen menetelmän ja juurtuneiden käytäntöjen tilalle olisi haastavaa. Maailmalta löytyy kuitenkin esimerkkejä mittaussjärjestelmistä, jotka eivät täytä R&R-testin asettamia vaatimuksia, mutta joita on käytetty vuosikautia ja pidetty erittäin suorituskykyisinä. Näissä tapauksissa prosessin vaihtelun sijaan onkin keskitytty mittaussjärjestelmän vaihtelun mittaamiseen. Mittaustuloksia tulisikin jatkossa analysoida jatkuvasti käyttämällä tilastollisen prosessinvalvonnan työkaluja, kuten valvontakortteja, joiden avulla voidaan arvioida saatuja tuloksia sekä joiden avulla voidaan havaita prosessissa ja mittaussjärjestelmässä tapahtuvia muutoksia.

Opinnäytetyö oli kaiken kaikkiaan melko haastava, sillä aiheesta ei ole tehty juuri aikaisempia tutkimuksia, joihin omia havaintoja olisi voinut verrata. Tämän lisäksi suurin osa käytettävistä lähteistä oli hankalasti saatavilla ja aineisto oli suurimmaksi osaksi englanninkielistä. Työn aikana sain kuitenkin kattavan kuvan kovuudenmitta-

uksesta sekä siihen vaikuttavista tekijöistä. Testimittaukset opettivat Gage R&R- ja DOE- Taguchi -koesuunnittelumenetelmien suorittamista sekä Minitab-ohjelmiston käyttöä sekä tulosten analysointia. Työ osoitti myös, minkälaisia mahdollisuuksia tilastollisella prosessinvalvonnalla ja Lean Six Sigma -työkaluilla voidaan aikaansaada laaduntuotossa ja valvonnassa.

Lähteet

Airasmaa, I., Kokko, J., Komppa, V & Saarela, O. 1991. Muovikomposiitit. Jyväskylä. Muoviyhdistys.

Barcol hardness tester HPE II. n.d. Bareiss. Viitattu 28.3.2013.

http://www.bareiss.de/english/produkte/haertepruefung/BARCOL_PUSEY/barcol_tester.html.

Barrentine, L. B. 2003. Concepts for R&R studies. 2nd edition. Milwaukee Wisconsin, USA: American Society for Quality.

Brown R. 2002. Handbook of Polymer Testing. Short-Term Mechanical Tests. Shawbury, United Kingdom: Rapra Technology.

Grellmann W. & Seidler S. 2007. Polymer testing. Munich: Carl Hanser Verlag.

Guidelines on the Estimation of Uncertainty in Hardness Measurements. 2011. Calibration Guide. EURAMET. European Association of National Metrology Institutes. Viitattu 2.4.2013.

http://www.euramet.org/fileadmin/docs/Publications/calguides/EURAMET_cg-16_v_2.0_Hardness_Measurements_01.pdf.

Frank S. 2005. Mobile Hardness Testing. Application Guide for Hardness Testers. General Electric Company. Viitattu 25.3.2013. http://www.gemcs.com/download/hardness-testing/TIV/GEIT-21001-sd299EN_ht-appguide.pdf

Herrmann K. 2011. Hardness Testing. Principles and Applications. United States of America. ASM International.

Hiltunen, E., Linko, L., Hemminki, S., Hägg, M., Järvenpää, E., Saarinen, P., Simonen, S. & Kärhä, P. 2011. Laadukkaan mittaamisen perusteet. Mittatekniikan keskus. Metrologianneuvottelukunta. Viitattu 2.4.2013.

http://www.mikes.fi/documents/upload/laadukkaan_mittaamisen_perusteet_www_final.pdf

- Jokio, M. 1999. Finishing. Papermaking Part 3. Papermaking Science and Technology. Book 10. Jyväskylä: Gummerus.
- Jyväskylän huoltoteknologiakeskus. 2013. Powerpoint-esitys. Metso Paperin sisäinen materiaali. Sähköinen tietokanta. Viitattu 17.5.2013.
- Kaufmann, E. 2003. Characterization on materials volume 1. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Karjalainen, E. 1989. Tuotteen ja prosessin optimointi koesuunnittelulla Taguchi-menetelmä. Tekninen tiedotus. Helsinki: Metalliteollisuuden kustannus.
- Karjalainen, E. 1992. Teollinen koesuunnittelu. Esimerkkejä Suomessa toteutetusta kokeellisesta tuotteen ja prosessin suunnittelusta Taguchi- menetelmällä. MET- julkaisu 9/1992. Helsinki: Metalliteollisuuden Kustannus.
- Karjalainen, E. & Karjalainen T. 2002. Six Sigma – Uuden sukupolven johtamis- ja laatumenetelmä. Hollola: Quality Knowhow Karjalainen Oy.
- Karumaa, A. 2013. Kannettavat kovuuden mittalaitteet komposiitille. Sonar Oy. Sähköpostiviesti 19.3.2013. Vastaanottaja J. Kakkonen. Sonar Oy:n tuotepäällikön suositukset komposiittimateriaalien kovuuden mittauksesta
- Kettunen, H. 2012. Tuotantotehokkuutta telapinnoitteilla. Metson telapinnoitekatalogi. Metso Paper Oy.
- Kopeliovich, D. n.d. Shore hardness test. Viitattu 28.3.2013.
http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=shore_durometer_hardness_test.
- Kovuusmittauksen perusteita. n.d. Finfocus Instruments Oy. Viitattu 18.3.2013.
<http://www.finfocus.fi/fi/tuotteet/kovuus-ym-mittarit/kovuusmittauksen-perusteita>.
- Kuhn, H. & Medlin, D. 2000. ASM Handbook volume 8. Mechanical Testing and Evaluation. United States of America: ASM International.
- Lindegren, M. 2010. Guidelines on the Estimation of Uncertainty in Hardness Measurements. Application Notes. Struers A/S. Viitattu 3.4.2013.
http://www.struers.com/resources/elements/12/144460/Application_Note_Hardness_Testing_English.pdf.

Manual Digital Hardness Tester. n.d. Gibitre Instrumenst. Viitattu.

<http://www.gibitre.it/Eng/Products/78.html>.

Measurement System Analysis. 2002. Reference Manual. 3rd edition. General Motors Corporation.

Metso Annual Report. 2012. Metso Corp. Viitattu 16.5.2013.

http://www.metso.com/reports/2012/assets/files/PDF/download_center/metso_annual_report_2012.pdf.

Perehdyttämisopas. 2012. Metso Paper. Viitattu 16.5.2013. Kesäharjoittelijoille jaettu nide.

Pusey & Jones Hardness tester. n.d. Zwick/Roell. Viitattu 28.3.2013.

<http://www.zwick.fi/fi/tuotteet/kovuusmittauskoneet-ja-laitteet/shore-ja-irhd-kovuusmittarit/zwick-3108-pusey-jones-hardness-tester.html>.

Ranjit, R.K. 2001. Design of Experiments Using The Taguchi Approach: 16 Steps to Product and Process Improvement. United States of America, New York: John Wiley & Sons Inc.

Rosato, D. V & Rosato, D. V. 2004. Reinforced Plastics Handbook. 3rd Edition. UK, Oxford: Elsevier Ltd.

Ruben 005 kumin kovuuden mittalaite. n.d. Tieto-Oskari Oy. Viitattu 23.8.2013.

<http://www.tieto-oskari.com/tuotteet/ruben>.

Salomäki, R. 1999. Suorituskykyiset prosessit. Hyödynnä SPC. MET- julkaisu. 9/1999. Helsinki: Metalliteollisuuden Kustannus Oy.

Sauter TH-D Manual hardness test stand. n.d. Sauter. Viitattu 22.8.2013.

<http://sauter.eshop.t-online.de/Sauter-TH-D/en>.

SFS-EN ISO 868. 2003. Muovit ja eboniitit. Tunkeumakovuuden määrittäminen durometrillä (Shore- kovuus). 2. p. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS 3912. 1982. LM-tuotteet. Barcol-kovuuden määrittäminen. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

Shewhart. W.A. 1931. Economic control of quality of manufactured product. New York, USA: D. Van Nostrand Company.

Shore D- durometri. n.d. NDT-tukku. Viitattu 3.4.2013. http://www.ndt-tukku.com/product_details.php?p=1490.

Shore hardness tester. n.d. Innovatest. Viitattu 15.5.2013. http://www.innovatest-europe.com/uk/products/category/Shore_portable_hardness_testers/.

Shore Hardness Testing of Plastics. n.d. MatWeb. Material Property Data. Viitattu 28.3.2013. <http://www.matweb.com/reference/shore-hardness.aspx>.

Seppälä, J. 1997. Polymeeritekniikan perusteet. Espoo: Otatieto.

The Impressor Hand-Held Portable Hardness Tester. 2002. Instruction Manual. Barber-Colman Company. Viitattu 28.3.2013. <http://www.barcol-impresor.com/download/impresorinst.pdf>.

Liitteet

Liite 1. R&R testipaikka ja testijalusta



Liite 2. DOE- Taguchi testipaikka ja suunniteltu testijalusta



Liite 3. Päättämittauslaite



Liite 4. Keskiarvon käyttö kovuuden määrittämisessä

| Mitattu kovuus | | | | | | | | | ka. |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 89,7 | 89,5 | 91,4 | 90,4 | 90,5 | 89,8 | 91,2 | 89,2 | 89,7 | 90,2 |
| 89,1 | 90,1 | 90,1 | 87,6 | 90,3 | 89,7 | 89,9 | 89,7 | 89,7 | 89,6 |
| 89,6 | 90,1 | 90 | 90,1 | 89,4 | 88,8 | 90,8 | 89,7 | 89,7 | 89,8 |
| 90,4 | 87,5 | 89 | 88,7 | 88,9 | 88,4 | 87,9 | 87,3 | 89,2 | 88,6 |
| 90,1 | 89,6 | 90,4 | 87,5 | 90,2 | 89,5 | 90,3 | 90,3 | 90,1 | 89,8 |
| 87,7 | 90,5 | 89,9 | 89,8 | 90,2 | 90,6 | 91,2 | 90,6 | 90,7 | 90,1 |
| 90,1 | 90,1 | 89,9 | 88,4 | 90,7 | 89,4 | 89,4 | 90,9 | 89,1 | 89,8 |
| 89,5 | 90,2 | 90,8 | 89,6 | 90 | 90,1 | 90,7 | 89,6 | 90,8 | 90,1 |
| 90,8 | 91,2 | 89,3 | 90,1 | 90,1 | 89,2 | 90,5 | 90,5 | 88,1 | 90,0 |
| 90,4 | 88,8 | 89,4 | 90,4 | 87,5 | 88,9 | 90,5 | 89,3 | 88,1 | 89,3 |
| 88,9 | 89,9 | 90,7 | 89,7 | 90,8 | 90,3 | 89,4 | 90,4 | 89,7 | 90,0 |
| 89,3 | 90,5 | 90,2 | 91 | 89,7 | 89 | 90 | 90,1 | 89,6 | 89,9 |
| 87,7 | 89,8 | 90,1 | 89 | 89,6 | 90 | 87,3 | 89,6 | 89,5 | 89,2 |
| 88,6 | 89,7 | 90 | 90,1 | 89,4 | 88,6 | 88,9 | 89,8 | 89,7 | 89,4 |
| 89,6 | 90,1 | 90,4 | 88,4 | 90,1 | 90,2 | 87,5 | 88,8 | 89,9 | 89,4 |
| 88,6 | 89,3 | 89,5 | 90,4 | 90,1 | 90,3 | 88,8 | 90,6 | 90,6 | 89,8 |
| 90,3 | 88,5 | 90,2 | 88,8 | 88,2 | 88,9 | 88,6 | 88,6 | 90,5 | 89,2 |
| 89 | 89,9 | 88,9 | 88,4 | 90,8 | 89,7 | 89,6 | 88,9 | 90 | 89,5 |
| 89,9 | 88,7 | 89,2 | 89,4 | 89,9 | 89,4 | 90,1 | 90,5 | 89,9 | 89,7 |
| 88,7 | 90,3 | 90,4 | 90,5 | 90 | 90,4 | 88,5 | 90,4 | 90 | 89,9 |
| 88,8 | 90,3 | 89,6 | 90,3 | 90,7 | 89,1 | 88,3 | 90 | 90,1 | 89,7 |
| 88,5 | 87,3 | 89,3 | 89,1 | 87,9 | 88,2 | 86,2 | 87,9 | 89,3 | 88,2 |
| 89,7 | 89,7 | 88,5 | 86,3 | 88,9 | 89,2 | 88,1 | 90,1 | 88,3 | 88,8 |
| 88,7 | 88,8 | 89,5 | 90,4 | 88,1 | 89,4 | 89,7 | 87,7 | 90 | 89,1 |
| 90,5 | 90,2 | 90,9 | 89,2 | 90,3 | 91,2 | 88,5 | 89,2 | 90,3 | 90,0 |
| 88,7 | 89,6 | 89,3 | 89,9 | 87,8 | 89,2 | 89,3 | 90,2 | 88,1 | 89,1 |
| 90,7 | 90 | 89,2 | 90,3 | 89,6 | 90,1 | 88,6 | 89,2 | 88,1 | 89,5 |
| 88,9 | 90,2 | 89,9 | 88,8 | 89,8 | 89,7 | 89 | 90,2 | 90,2 | 89,6 |
| 89,2 | 90 | 89 | 87,8 | 90,1 | 89 | 89,5 | 90,2 | 89,3 | 89,3 |
| 88,9 | 90,3 | 91,1 | 90,8 | 89,6 | 89,3 | 88,6 | 89,5 | 90 | 89,8 |

| | Kaikki mittaukset | Keskiarvo | |
|--------------|-------------------|-----------|-----|
| Maksimiarvo | 91,4 | 90,2 | ShD |
| Miniarvo | 86,2 | 88,2 | ShD |
| Vaihteluväli | 5,2 | 2,0 | ShD |
| Keskihajonta | 0,91 | 0,47 | ShD |

Liite 5. Käsikirja, Kertamuovipinnoitteiden kovuudenmittaus Rautpohjan telatuotannossa

Kertamuovipinnoitteiden kovuudenmittaus Rautpohjan telatuotannossa

Sisältö

| | | |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. | Kertamuovien kovuudenmittaus (polyuretaani, komposiitti) | 87 |
| 2. | Tunkeumakovuuden määrittäminen Shore A/D- durometrillä - ISO 868:2003 | 87 |
| 2.1. | Ennen mittauksia tarkista: | 88 |
| 2.2. | Mittauksissa huomioon otavat tekijät: | 88 |
| 2.3. | Vastaavuus- ja vertailutaulukot | 90 |
| 3. | Polyuretaani- ja kumipinnoitteiden kovuuden määrittäminen P&J- menetelmällä – ISO 7267-3 | 91 |
| 3.1. | Ennen mittauksia tarkista: | 92 |
| 3.2. | Mittauksissa huomioon otavat tekijät: | 92 |
| 3.3. | Mittauksen suorittaminen Bareiss P&J- kovuusmittarilla | 93 |
| 3.4. | Vastaavuus- ja vertailutaulukot | 95 |
| | Kuva 1 Valmistettavat telapinnoitteet | 86 |
| | Kuva 2 Toleranssit | 86 |
| | Kuva 3 Shore D- durometri | 88 |
| | Kuva 4 Shore A vs. Shore D vertailutaulukko | 90 |
| | Kuva 5 Bareiss P&J-mittalaite ja Ruben 005 P&J- mittalaite | 91 |
| | Kuva 6 Bareiss P&J- mittalaitteen osat | 93 |
| | Kuva 7 Shore A vs. P&J vertailutaulukko | 95 |
| | Kuva 8 Pinnoitteet kuvina | 96 |
| | Kuva 9 Testijalusta | 97 |

|  | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------|--------------------------------------|-------------|---------------|------------------|---------------|
| MOD ID | Kauppanimi | Sovellus | Materiaali | Väri | Kovuus (min-max) | Pinnankarheus |
| | | Soft- ja superkalanterit | Komposiitti | Keltainen | 91 ShD | < 0,4 |
| | | On-line kalanterit | Komposiitti | Vihreä | 92 ShD | < 0,6 |
| | | Soft- ja superkalanterit | Komposiitti | Vihreä | 91 ShD | < 0,6 |
| | | Soft-, super- ja moninippikalanterit | Komposiitti | Punainen | 92 ShD | < 0,6 |
| | | Softkalanterit | Komposiitti | Punainen | 88 ShD | < 0,6 |
| | | Vastatelat (pinnoitus) | PU | Tumman vihreä | 55 (25-55) P&J | 0,6 - 1,0 |
| | | Pintaliimaus ja filmipäällystystelat | PU | Vihreä | 45 (25-65) P&J | 1,0 - 1,4 |
| | | Johto- ja ohjaustelat | Komposiitti | Mintun vihreä | 89 ShD | < 3,2 (< 1,0) |
| | | LNP- telat | PU | Violetti | 12 P&J | < 2,0 |
| | | Uritetut puristintelat | PU | Punainen | 5 (5 - 25) P&J | < 2,0 |
| | | Puristintelat (paperi) | PU | Punainen | 25 (10 - 25) P&J | < 2,0 |
| | | Keskitelat | Komposiitti | Mintun vihreä | 91 ShD | 1,0 - 1,3 |
| | | Tampuuritelat | PU | Sininen | 12 - 20 P&J | < 6,0 |
| | | Puristinimutelat | PU | Punainen | 5 (5-25) P&J | < 2,0 |
| | | Puristinimutelat (paperi) | PU | Punainen | 25 (10 - 25) P&J | < 2,0 |
| | | Uritetut puristintelat | Komposiitti | Valkoinen | 87 ShD | < 2,0 |
| | | Rullaussylinterit | PU | Sininen | 90 ShA | < 1,6 |
| | | Sizer- aplikaatiotelat | PU | Sininen | 30 - 40 P&J | 1,0 - 1,4 |
| | | Filmipäällystystelat | PU | Sininen | 35 (25-45) P&J | 1,0 - 1,4 |

Kuva 1 Valmistettavat telapinnoitteet

| Toleranssit | | |
|------------------------|-----|---|
| P&J | | |
| 3 - 15 | P&J | ➔ |
| 16 - 49 | P&J | ➔ |
| 50 - 60 | P&J | ➔ |
| 61 - 70 | P&J | ➔ |
| 71 - 80 | P&J | ➔ |
| 81 - 90 | P&J | ➔ |
| 91 - 100 | P&J | ➔ |
| 101 - 150 | P&J | ➔ |
| 151 - 250 | P&J | ➔ |
| ShD | | |
| kalanteriteloilla | | |
| puristinteloilla | | |
| ohjausteloilla | | |
| kumilla | | |
| ShA | | |
| kaikissa sovelluksissa | | |

Kuva 2 Toleranssit

1. Kertamuovien kovuudenmittaus (polyuretaani, komposiitti)

- Kertamuovit ovat yleisesti kovia ja hauraita, joita ei voida uudelleen muovata tai sulattaa.
- Kertamuovit ovat metalleja herkempiä mm. lämpötila muutoksille sekä kosteudelle.
- Mittausten aikana esiintyy plastisia, elastisia ja viskoelastisia muodonmuutoksia.
- Muodonmuutokset ovat vahvasti riippuvaisia materiaalista ja kuormitusajasta.
- Kertamuovien kovuuden ja materiaalin muiden ominaisuuksien välillä ei ole mitään yksiselitteistä riippuvuutta, joten kovuutta ei tulisi yksin käyttää materiaalin ominaisuuksien arviointiin.

2. Tunkeumakovuuden määrittäminen Shore A/D- durometrillä - ISO 868:2003

- Mittaus suoritetaan painamalla durometrin painin ja paininjalka testattavan materiaalin pintaan, jonka jälkeen kovuusarvo luetaan määritetyn lukemahetken tai maksimiarvon mukaan mittarin näytöltä.
- Tunkeumakovuus on kääntäen verrannollinen tunkeumaan ja riippuvainen materiaalin kimmomoduulista ja viskoelastisista ominaisuuksista
- Mittapään muoto, painamiseen käytetty voima ja painamisen kesto aika vaikuttavat tulokseen, joten ei ole olemassa mitään yksinkertaista riippuvuutta erityyppisillä durometreillä tai muuntotyypisillä laitteilla saatujen kovuusmittausten välillä.
- Shore- arvo ilmoitetaan välillä 0-100 Shore:a. (suurempi arvo = suurempi kovuus)
- A- tyyppin durometri soveltuu parhaiten pehmeille materiaaleille kuten kumille ja polyuretaanille ja D- tyyppin durometri soveltuu koville muoveille ja komposiitille.
- D-tyypin durometriä suositellaan käytettäväksi, kun A- tyyppin durometrin lukema on yli 90, ja A-tyypin durometriä, kun D-tyypin durometrin lukema jää alle arvon 20.
- Menetelmä on kokeellinen menetelmä jota käytetään ensisijaisesti valvontatarkoituksiin.
- Durometrit tulisi huoltaa ja kalibroida vähintään kerran vuodessa.
- Telapintojen kovuutta määritettäessä suoritetaan 12 mittausta, joista suurin ja pienin arvo jätetään huomioimatta. Jäljellä olevista 10 mittaustuloksesta lasketaan keskiarvo, joka on ilmoitettu kovuus.
- Mittaajien tulisi olla tietoisia mittausten tavoitearvosta sekä tulosten hajonnasta. Mikäli yksittäiset mittaukset vaihtelevat yli 3 Shore:a keskiarvosta tai muista mittaustuloksista, tu-

lisi mittaus suorittaa uudestaan eri kohdasta kappaletta ja varmistaa, että mittaus suoritetaan asianmukaisesti.



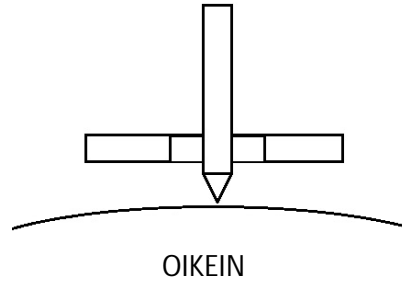
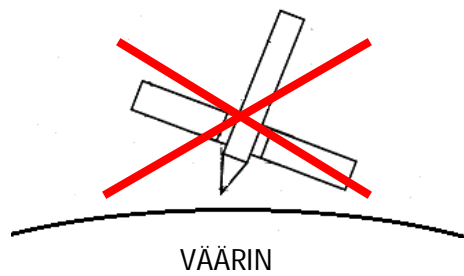
Kuva 3 Shore D- durometri

2.1.Ennen mittauksia tarkista:

- Mittarin yleinen kunto
 - Tarkista ettei mittarissa tai mittakärjessä näy ulkoisia vaurioita.
- Nolla-asetus
 - Tarkista että mittarin lukema näyttää kuormittamattomana nollaa.
- Kalibrointi
 - Tarkista durometrin kalibrointi ennen mittauksia standardin mukaisten tarkistuspa-
lojen avulla.

2.2.Mittauksissa huomioitavat tekijät:

- Mittarinasento
 - Mittauksessa tulee varmistaa, että mittarin mittakärki ja paininjalka painetaan koh-
tisuorassa pintaa nähden.
 - Mittarin asentovaihteluista aiheutuvia mittausvirheitä voidaan vähentää **testijalus-
tan** avulla. (ks. kuva 9)



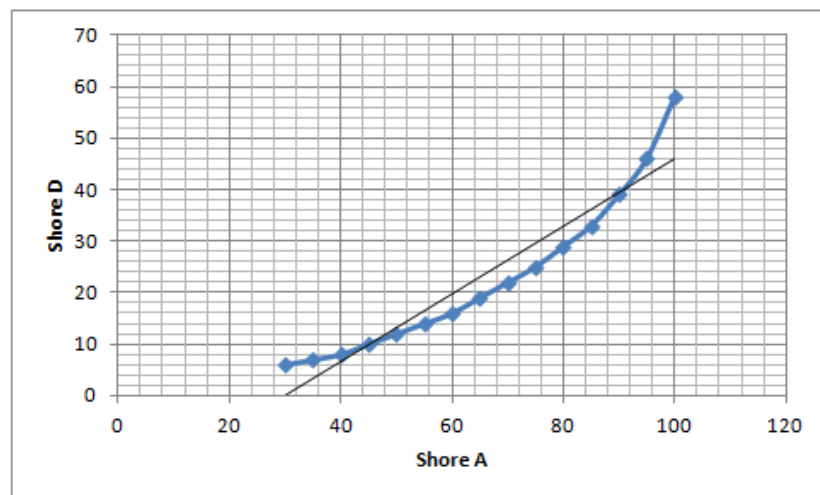
- Kuormitusvoima
 - Kuormitusvoiman suuruus tulisi olla juuri sen verran, että saavutetaan kiinteä kosketus paininjalan ja kappaleen välillä.
 - Kuormitusvoiman tulisi olla mittauksesta toiseen samansuuruinen.
 - Kuormitusvoima voidaan vakioida **testijalustaa** avulla. (ks. kuva 9)
- Kuormitusnopeus
 - Paininjalka tulisi painaa kappaleeseen mahdollisimman nopeasti **aiheuttamatta iskumaista** kuormitusta. Iskumainen kuormitus voi aiheuttaa virheellisen suuria kovuusarvoja.
- Testikuorman pitoaika – lukemahetki
 - Näyttölaitteen lukema luetaan asteikolta 1 s:n kuluessa, siitä kun paininjalka on kiinteässä kosketuksessa koekappaleen kanssa. Mikäli durometri rekisteröi maksimilukeman, käytetään sitä. (HUOM! maksimilukemaa käytettäessä välttä iskumaista kuormitusta!)
 - Mikäli mittari mahdollistaa molempien, maksimilukeman ja määritetyn hetkellisen lukeman rekisteröinnin otetaan molemmat tulokset ylös.
- Painimen sijainti
 - Mittaukset tulee suorittaa vähintään 9mm:n päästä kaikista reunoista sekä vähintään 6mm:n päästä muista mittauspisteistä. Koekappaleita käytettäessä koekappaleen paksuus tulee olla vähintään 4mm.
- Ulkoiset olosuhteet
 - Mittaukset tulisi suorittaa mahdollisimman vakioiduissa olosuhteissa.
 - Korkea lämpötila ja kosteus alentavat saatuja kovuusarvoja.

- Mittaukset tulisi suorittaa kuivalta pinnalta, nimellisen testaus lämpötilan ollessa n. 18–30 °C:sta.
- Pinnankarheus
 - Mittaukset tulisi suorittaa mahdollisimman viimeistellyltä pinnalta.
 - Karkea pinta saa aikaan alhaisempia kovuusarvoja.

2.3.Vastaavuus- ja vertailutaulukot

- Shore A ja Shore D- arvojen väliltä löytyy karkeita vastaavuus- ja vertailutaulukoita. Vastavuustaulukot ovat tapauskohtaisia ja ovat vahvasti riippuvaisia materiaalista ja käytettävästä mittarista.
- Suoraa vertailu tulisi välttää ja käytettävät vertailutaulukot tulisi muodostaa materiaali- ja tapauskohtaisesti.

| ShA | ShD |
|-----|-----|
| 100 | 58 |
| 95 | 46 |
| 90 | 39 |
| 85 | 33 |
| 80 | 29 |
| 75 | 25 |
| 70 | 22 |
| 65 | 19 |
| 60 | 16 |
| 55 | 14 |
| 50 | 12 |
| 45 | 10 |
| 40 | 8 |
| 35 | 7 |
| 30 | 6 |



Kuva 4 Shore A vs. Shore D vertailutaulukko

3. Polyuretaani- ja kumipinnoitteiden kovuuden määrittäminen P&J- menetelmällä – ISO 7267-3



Kuva 5 Bareiss P&J-mittalaite ja Ruben 005 P&J- mittalaite

- P&J (Pusey & Jones) kovuuden mittausmenetelmä on tarkoitettu pääasiassa kumin ja kumimaisten materiaalien, kuten paperiteollisuuden kumitelosten kovuuden mittaukseen.
- Kumien ja polyuretaanien kovuuden mittaukseen käytetään P&J- menetelmän lisäksi Shore A- menetelmää, mutta ensisijaisena mittausmenetelmänä käytetään P&J- menetelmää.
- Poiketen tavanomaisista mittausmenetelmistä pienempi P&J- arvo ilmaisee kovempaa materiaalia.
- 1 P&J vastaa 0,01 mm:n tunkeumaa. Mitatut kovuudet vaihtelevat 0 - 250 P&J välillä.
- Mittauksia varten on kehitetty automaattinen P&J- mittari Ruben 005, jonka avulla voidaan vähentää mittaajasta aiheutuvaa mittausepävarmuutta.
- Pinnoitteen paksuus vaikuttaa saatuihin tuloksiin varsinkin pehmeiden kumipinnoitteiden kohdalla. Todellisen lukeman varmistamiseksi tulisi noudattaa alla olevaa taulukkoa.

| Mittalaitteen lukema (P&J) |
|-------------------------------|
| 0-40 |
| 40-100 |
| 100-200 |
| 200-300 |

| Pinnoitteen minimipaksuus (mm) |
|-----------------------------------|
| 6 |
| 10 |
| 12 |
| 20 |

3.1. Ennen mittauksia tarkista:

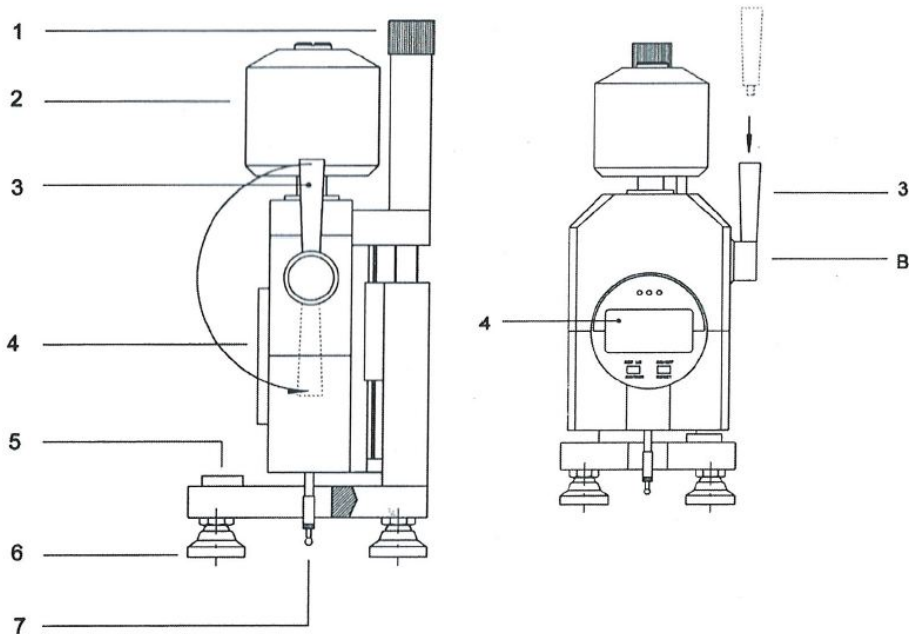
- Mittarin yleinen kunto
 - Tarkista ettei mittarissa tai mittakärjessä näy ulkoisia vaurioita.
- Kalibrointi
 - Mittarin kalibrointi tulisi tarkistaa säännöllisin väliajoin kalibrointilevyn avulla. (Levy löytyy STC- hallin tuotannon laboratorion läheisyydestä)

3.2. Mittauksissa huomioitavat tekijät:

- Mittarin asento
 - Varmista että mittari ja mittapää ovat mittauksissa kohtisuorassa mitattavaan pintaan nähden.
 - Mittari tulee asettaa telanpinnalle mahdollisimman keskelle telan vaaka-akselia. Mittarin asemointi tulee tarkistaa vesivaa'asta.
- Kuormitusnopeus
 - Kuormitusvipu tulee laskea reippaan tasaisesti ja toistettavasti ala-asentoon mittauksen aloittamiseksi. (Bareiss P&J- mittalaite)
- Painimen sijainti
 - Mittaukset tulee suorittaa vähintään 6 mm päästä toisista mittauspisteistä.
- Ulkoiset olosuhteet
 - Lämpötila on merkittävin tuloksiin vaikuttava tekijä varsinkin kumien ja pehmeiden polyuretaanien kohdalla.
 - Mittaukset tulisi suorittaa mahdollisimman vakioituissa olosuhteissa mittauspaikasta riippumatta.
 - Tarkimmat mittaukset saavutetaan kun mittaukset suoritetaan 21 ± 3 °C lämpötilassa.
 - Mikäli mittaukset suoritetaan poikkeavissa olosuhteissa, tulee ne kirjata mittauspöytäkirjaan.

- Pinnanlaatu
 - Mittaukset tulee suorittaa tasaiselta poraamattomalta/urittamattomalta pinnalta.

3.3. Mittauksen suorittaminen Bareiss P&J- kovuusmittarilla



Kuva 6 Bareiss P&J- mittalaitteen osat

1. Ruuvaa kuormitusvipu (3) poraukseen (B).
2. Varmista että kuormitusvipu (3) on yläasennossa.
3. Aseta mittari varovasti mitattavalle pinnalle ja varmista asemointi vesivaa'asta (5).
4. Paina numeronäytön (4) etupaneelissa olevaa ON/OFF- nappia, jotta laite menee päälle.
5. Varmista mittarinnäytöltä (vasen alareuna), että mittayksikkö on asetettu millimetreiksi (mm). Mittayksikön vaihto tapahtuu "MODE"- näppäimellä.
6. Nollaa mittarin lukema painamalla "RESET"/"SET"- nappia
7. Käännä mittarin säätöruuvia (1) myötäpäivään, kunnes lukema on n. 3,0mm (300 P&J). Mittapää (7) liikkuu alaspäin ja kuormittuu näytteeseen 3mm:n syvyyteen.
8. Nollaa mittarin lukema uudestaan painamalla "RESET"/"SET"- nappia.
9. Laske paino (2) laskemalla kuormitusvipu (3) ala-asentoon reippaan tasaisesti ja toistettavasti mittauksen aloittamiseksi.

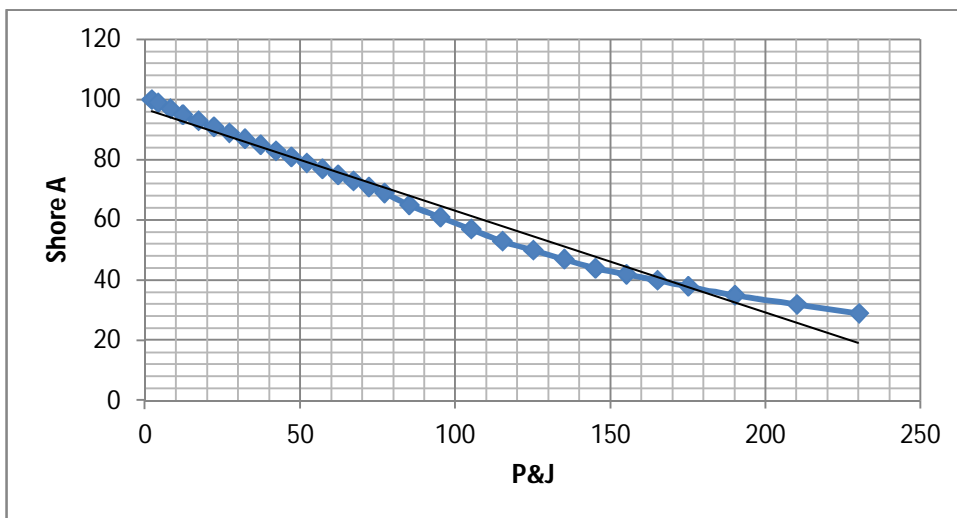
10. Lue mittaustulos mittarinnäytöltä (4) 60 sek. kuluttua mittauksen aloittamisesta. Mittaustulos saadaan millimetreinä mittarista riippuen kahden tai kolmen desimaalin tarkkuudella. Mittauspöytäkirjaan tulos merkitään 0,5 P&J:n tarkkuudella. **(Huom! Tämän kovuusmittarin rungon jouston aiheuttama virhe on 0,01 eli 1 P&J. Tämä lukema pitää vähentää saadusta kovuuslukemasta.)**
11. Nosta kuorma (2) kääntämällä kuormitusvipu (3) alkuasentoon.
12. Seuraavaa mittausta varten nosta mittapää testikappaleen pinnasta (7) pyörittämällä säätöruuvia (1) vastapäivään + 3,0mm, varmista vielä että mittapää on irti kappaleen pinnasta. Siirrä mittari seuraavaan mittauspisteeseen ja toista mittaus suorittamalla kohdat 6-11.
13. Viimeisen mittauksen jälkeen pyöritä säätöruuvia (1) 3,0mm lisäksi 10 täyttä kierrosta, jotta varmistutaan, ettei mittapää (7) vahingoitu mittaria liikuteltaessa.
14. Sammuta laite pitämällä ON/OFF- nappia pohjassa kunnes näyttö sammuu.

Esimerkki: Mittaustulos: - 0,47 mm (huom! jätä miinus-merkki huomioimatta); vähennetään runkovirhe 0,01 mm; pöytäkirjaan merkittävä kovuus: 0,47 mm - 0,01 mm = 0,46 mm pyöristys 0,46 mm → 46,0 P&J (0,01 mm = 1 P&J)

- Mittauksissa suoritetaan 12 mittausta, joista suurin ja pienin arvo jätetään huomioimatta. Jäljellä olevista 10 mittauksesta lasketaan keskiarvo, joka on ilmoitettu kovuus.

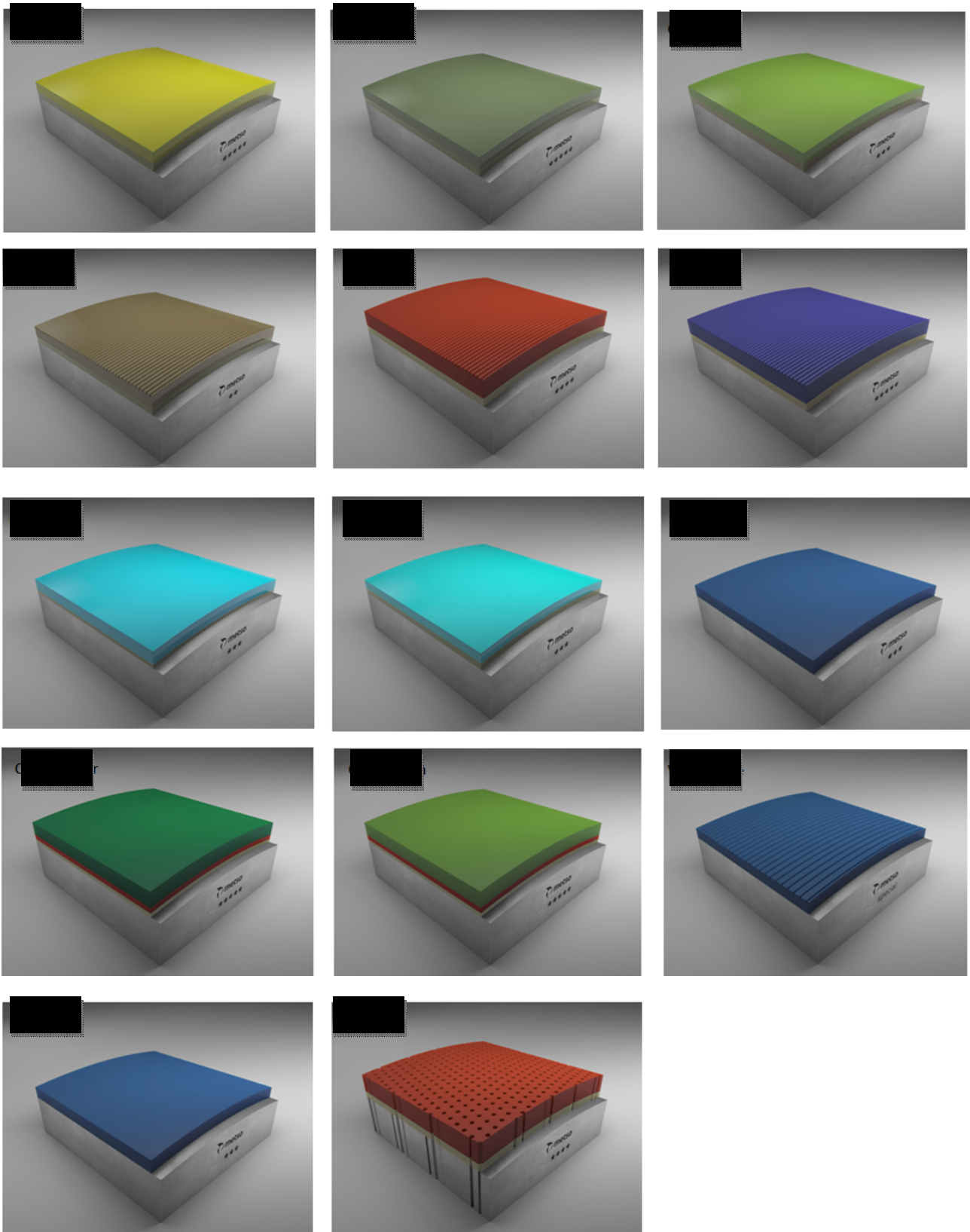
3.4.Vastaavuus- ja vertailutaulukot

- Shore A ja P&J- mittausmenetelmien väliltä löytyy suuntaa-antavia vastaavuus- ja vertailutaulukoita.
- Suoraa vertailua tulisi kuitenkin välttää, sillä taulukot ovat materiaali- ja mittalaittekohtaisia.
- Mikäli mittauksissa vaaditaan molemmat arvot, tulisi kummatkin arvot mitata omalla mittalaitteella.



| ShA | P&J | ShA | P&J |
|-----|---------|-----|-----------|
| 100 | 0 - 3 | 71 | 70 - 75 |
| 99 | 3 - 5 | 69 | 75 - 80 |
| 97 | 5 - 10 | 65 | 80 - 90 |
| 95 | 10 - 15 | 61 | 90 - 100 |
| 93 | 15 - 20 | 57 | 100 - 110 |
| 91 | 20 - 25 | 53 | 110 - 120 |
| 89 | 25 - 30 | 50 | 120 - 130 |
| 87 | 30 - 35 | 47 | 130 - 140 |
| 85 | 35 - 40 | 44 | 140 - 150 |
| 83 | 40 - 45 | 42 | 150 - 160 |
| 81 | 45 - 50 | 40 | 160 - 170 |
| 79 | 50 - 55 | 38 | 170 - 180 |
| 77 | 55 - 60 | 35 | 180 - 200 |
| 75 | 60 - 65 | 32 | 200 - 220 |
| 73 | 65 - 70 | 29 | 220 - 240 |

Kuva 7 Shore A vs. P&J vertailutaulukko



Kuva 8 Pinnoitteet kuvina



Kuva 9 Testijalusta