

Tampereen ammattikorkeakoulu
Paperitekniiikan koulutusohjelma
International Pulp and Paper Technology
Harri Heiskanen

Opinnäytetyö

PAPERIN PAKSUUDEN OPTINEN MITTAAMINEN

Työn ohjaaja
Työn tilaaja

Arto Nikkilä
Metso Automation Jussi Graeffe

Tampere 8/2009

Tampereen ammattikorkeakoulu

Paperitekniikan koulutusohjelma, International Pulp and Paper Technology

Tekijä	Harri Heiskanen
Työn nimi	Paperin paksuuden optinen mittaaminen
Sivumäärä	59 + 1 liitesivu
Valmistumisaika	elokuu 2009
Työn ohjaaja	Arto Nikkilä
Työn tilaaja	Metso Automation Oy valvojana Jussi Graeffe
Hakusanat	paksuus, optinen, laserkolmio, on-line mittaukset

TIIVISTELMÄ

Tässä työssä tutkittiin paperin paksuuden optista mittaamista. Optisena mittarina käytettiin Metson IQLaserCaliper mittaria, joka perustuu laserkolmiomenetelmään. Työn tavoitteena oli tutkia kuinka optinen mittari käyttäytyy eri paperilajeilla ja onko paperin ominaisuuksilla vaikutusta mittaustulokseen. Työn tavoitteena oli myös selvittää mahdolliset paperilajikohtaiset korjausarvot.

Työssä mitattiin paperin paksuutta optisesti sekä mikrometrillä ja näitä tuloksia verrattiin toisiinsa. Tuloksia selittävinä mittauksina mitattiin opasiteetti, karheus, kokoonpuristuvuus ja kiilto. Mitattavia paperilajeja oli suuri määrä ja tuloksista saatiin kattavia. Yleisimmät paperilajit olivat edustettuina ja tuloksia saatiin monelle erilaiselle paperityypille. Koska IQLaserCaliper on suunniteltu on-line mittariksi, ei laboratorio oloissa päästy samaan mittaustarkkuuteen kuin on-line mittauksessa. Kuitenkin saadut tulokset vahvistavat optisen menetelmän soveltuvuutta paperin paksuuden mittaamiseen.

Mittausten perusteella näyttäisi, että optinen paperin paksuuden mittaaminen soveltuu käytettäväksi jokaisella testatulla paperilajilla. Optinen mittaus tarvitsee paperilajikohtaisen korjauksen, joka tulee määrittää joka kerta erikseen. Pienin korjaus tarvitaan päällystetyillä ja sileillä lajeilla, kun taas päällystämättömillä karheilla lajeilla korjauksen tulee olla suurempi. Paperin ominaisuudet vaikuttavat mittauksen tulokseen, mutta niiden vaikutus ei näy selkeästi vasta ominaisuuksien mennessä normaalin ja yleisesti käytetyn tason ulkopuolelle. Optisen mittarin käyttäytymistä ei voida selittää pelkästään yhden paperin ominaisuuden avulla, vaan eri ominaisuudet vaikuttavat tulokseen omalla tavallaan. Ominaisuudet muuttuvat toistensa mukana samanaikaisesti, esimerkiksi kalanteroitaessa, joten niiden erottaminen toisistaan on hankalaa.

TAMK University of Applied Sciences
Department of Paper technology, International Pulp and Paper Technology

Writer	Harri Heiskanen
Thesis	Optical measurement of paper thickness
Pages	59 pages, 1 appendice
Graduation time	August 2009
Thesis supervisor	MSc Arto Nikkilä
Co-operating company	Metso Automation Oy Jussi Graeffe
Keywords	thickness, optical, laser triangulation, online measurement

ABSTRACT

This thesis was investigating optical paper caliper measurement. Metso Automations IQLaserCaliper was used in optical caliper measurement. IQLaserCaliper is a non-contacting method for measuring paper thickness and it uses the one-sided laser triangulation principle.

The target of this thesis was to study how the IQLaserCaliper behaves with different paper grades and if properties of paper have some influence on the results. The paper thickness was measured optically and with micrometer and results were compared. Some paper properties, like opacity, roughness, compressibility and gloss, were also measured to see if they have an effect on results. Seven different paper grades were tested to have vast and reliable results. Since IQLaserCaliper is designed for online measurement, the online situation accuracy could not be reached in the lab. Still the achieved results are confirming the applicability of the optical sensor for paper thickness measurement. According to results it seems that the optical method for measuring paper thickness can be used regardless of paper grade. Every paper grade needs its own offset value to correct the optical measurement result. With these offset values optical measurement is precise and reliable. The properties of paper have an effect on the result, but it is difficult to separate one property from the rest and tell how it affects because if you change one property it also changes other properties.

Esipuhe

Optisen paksuusmittauksen tutkiminen on ollut mielenkiintoista ja haastavaa. Tutkittavaa dataa oli suuri määrä ja aiheen rajausta sopivaksi oli hankalaa. Haasteista huolimatta sain kasattua kokoon laajan ja monipuolisen kuvauksen optisen mittarin toiminnasta erilaisilla paperilajeilla.

Haluan kiittää Metso Automaatiota tästä tilaisuudesta saada työskennellä osana heidän tutkimustiimiään ja erityisesti haluan kiittää Jussi Graeffea, hän toimi suurena apuna työtä tehtäessä.

Lisäksi haluan kiittää myös Miiaa, koska ilman hänen täyttä tukeaan ja kannustusta työn tekeminen olisi ollut paljon vaikeampaa.

Tampereella elokuussa 2009

Harri Heiskanen

Sisällysluettelo

1 Johdanto	7
2 Paksuus	8
3 Paksuuden on-line mittaus	9
3.1 Koskettava paksuusmittaus	9
3.2 Paksuuden laserkolmiomittaus	10
4 Mittaustulokseen vaikuttavia tekijöitä	13
4.1 Opasiteetti	13
4.2 Karheus	14
4.3 Kokoonpuristuvuus	16
4.4 Kiilto	17
4.5 Kalanterointi.....	18
5.1 Sanomalehtipaperi.....	21
5.2 SC.....	22
5.3 LWC & MWC.....	23
5.4 MFC	24
5.5 WFU	25
5.6 WFC	26
6 Mittaukset ja tulokset	27
6.1 Paksuusmittaukset	27
6.2 Opasiteetti	31
6.3 Karheus	33
6.4 Kokoonpuristuvuus	36
6.5 Kiilto	37
6.6 Kalanteroinnin vaikutus	37
6.6.1 Kalanteritesti LWC	39
6.6.2 Kalanteri SC.....	43
6.6.3 Kalanteri News.....	47
6.6.4 Kalanteritesti WFU	51
6.6.5 Kalanteritesti MWC	52
7 Virhearviointi	55

8 Yhteenveto	57
Lähteet	59
Liitteet	60
<i>Liite 1: Pilottikalanterin asetukset</i>	60

1 Johdanto

Paksuus (engl. thickness) on tärkeä ominaisuus sekä paperille että kartongille. Jäykkyys on verrannollinen paksuuden kolmanteen potenssiin, joten se on kriittinen ominaisuus varsinkin kartongeille. Normaaleille paino- ja kirjoituspapereille paksuus ei sinällään ole niin tärkeä, vaan paksuusprofiilin tulee olla tasainen. Epätasainen paksuusprofiili aiheuttaa paperiin rullissa pussimaisuutta, rynkkyjä ja repeilyä.

Bulkki, joka on paperille ja kartongille tärkeä ominaisuus, saadaan laskettua paksuuden ja neliömassan mukaan. Paksuuden kasvaessa ja neliömassan pysyessä samana bulkki kasvaa, mikä on toivottua lähes jokaiselle paperi- ja kartonkilajille.

Tämän työn tavoitteena on tutkia, kuinka Metson optinen paksuusmittari toimii eri paperilajeilla ja onko paperin ominaisuuksilla vaikutusta mittaustulokseen. Työssä käytetään laajaa valikoimaa eri paperilajeja, jotta tuloksista saataisiin mahdollisimman kattavat.

Työn mittaukset suoritettiin pääasiassa Metso Automaation Tampereen tiloissa, selittäviä mittauksia tehtiin Tampereen ammattikorkeakoulun paperilaboratorion tiloissa.

2 Paksuus

Paperin ja kartongin paksuudella on suuri merkitys varsinkin kartonkilajeille, ja jotkin kartonkilajit myydään neliömassan sijasta paksuuden mukaan. Paperilajeista paksuus on tärkeää muun muassa kirja- ja puhelinluettelopapereilla, joilla määrätyn sivumäärän tulee mahtua tehtyjen kansien väliin.

Paksuusprofiili on erittäin tärkeä varsinkin kokoonpuristumattomilla papereilla kuten päällystetyillä ja kiillotetuilla papereilla, joilla paksuusprofiilierot eivät tasaannu rullassa. Erot paksuusprofiilissa aiheuttavat rullissa pussimaisuutta, rynkkyjä ja repeämiä. Huono paksuusprofiili voi aiheuttaa ongelmia myös superkalanterilla, pituusleikkurilla sekä jatkojalostuksessa ja painokoneella. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003) Kalanterilla suoritetaan usein paksuuden poikkiprofiilin säätöä ja ohjaavana anturina voidaan käyttää esimerkiksi Metson optista paksuusmittaria. Paksuutta voidaan säädellä perälaatikon, puristinosan sekä kalanterin säädöillä. (Hägglom-Ahnger & Komulainen, 2003, 82)

Paperin ja kartongin paksuus mitataan ISO 534 -standardin mukaan mikrometrillä, jossa on 2 cm² halkaisijaltaan oleva mittapää ja se painaa pintaa 2 kg:n painolla, joka vastaa noin yhden ilmakehän painetta 100kPa. Pinopaksuutta, jossa mitataan usean päällekkäisen arkin paksuus ja jaetaan niiden lukumäärällä, käytetään yleensä paperilajien paksuutta mitattaessa. Kartonkilajeja mitattaessa mitataan yleensä vain yhden arkin paksuus. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 82)

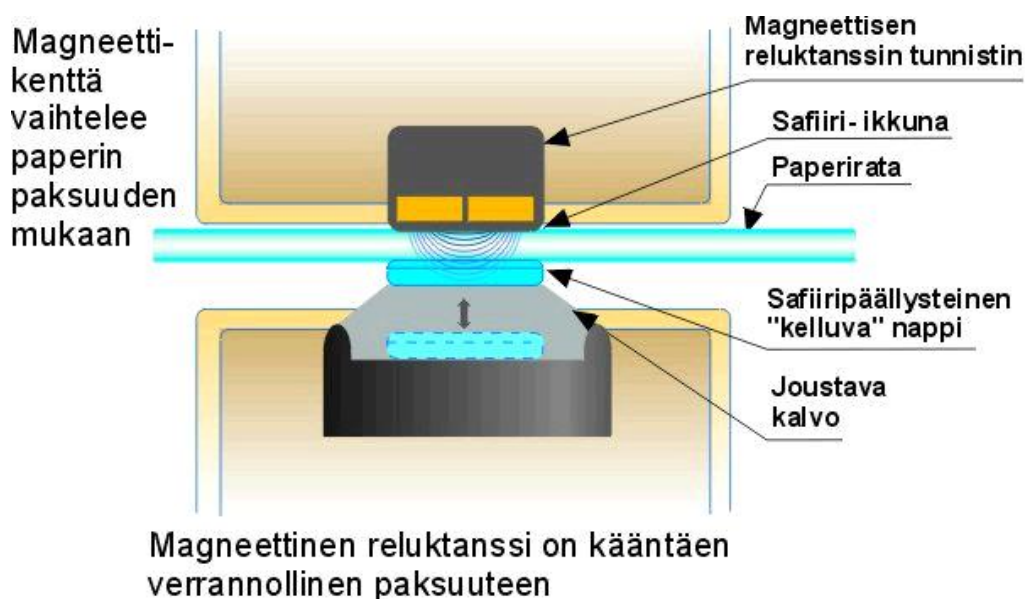
3 Paksuuden on-line mittaus

Paperin laatua mitataan jatkuvasti ajon aikana koneen rullaimella olevalla järjestelmällä, jonka tarkoitus on pitää paperin laatu hyvänä ja tasaisena. Mittaraami on osa tätä järjestelmää, johon kiinnitetyssä mittavaunussa tapahtuu monta eri paperin laadun mittausta, joista paksuusmittaus on yksi. Muita mitattavia suureita voivat olla esimerkiksi neliömassa, kosteus, tuhka, vaaleus ja päällysteen määrä. Mittavaunun tyypillinen radan ylitysaika on 10–15 sekuntia. Mittavaunut traversoivat paperiradan yli mitaten radan laatusuureita. Mittavaunu voidaan myös ohjata tiettyyn kohtaan rataa ja mitata radan konesuuntaisia ominaisuuksia. (Knowpap)

3.1 Koskettava paksuusmittaus

Paksuusmittaus on ollut yksi oleellisimmista on-line mittauksista aivan on-line mittausten syntyminen ajoilta 1940-luvulta lähtien. Ylivoimaisesti käytetyin paksuusmittaus tänäkin päivänä on koskettavaan anturiin perustuva mittaus, jollaisia on ollut markkinoilla jo 1960-luvulta lähtien. Koskettava paksuusmittari on erittäin tarkka ja luotettava, mutta se voi aiheuttaa kosketuksellaan ongelmia, kuten ratakatkoja ja reikiä rataan. Koneiden kehittyessä ja nopeuksien noustessa on kuitenkin jouduttu kehittämään uusia mittaustapoja ja kontaktiton paksuusmittaus on ollut paperin tekijöiden haaveena jo melkein pari vuosikymmentä.

Koskettavan paksuusmittauksen periaate on yksinkertainen eikä se eroa juurikaan eri valmistajien kesken (Kuvio 1). Paksuusmittarissa on magneettinen vastus, joka mittapään mukana liukuu pitkin paperin pintaa. Mittapään yläpäässä on magneettikela ja alapäässä ferriittilevy. Magneettikela on yhdistetty oskillisaattoriin, joka muuntaa kelan ja ferriittilevyn välillä syntyneen sähkövirran jännitepulsseiksi, jotka tietokone muuttaa paksuustuloksiksi. Tällaisen mittausperiaatteen tyypillinen mittaalue on 25 – 2000 μ m. (Knowpap)



Kuvio 1: Koskettavan paksuusanturin periaate. Ylä- ja alapuolen välille syntyy sähkövirta, jonka voimakkuus riippuu etäisyydestä ja sen mukaan voidaan laskea paperin paksuus. (Knowpap)

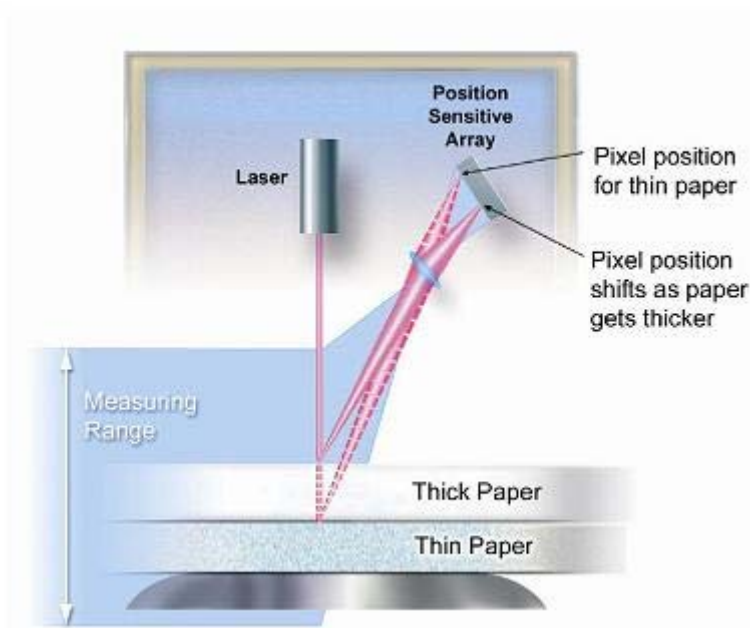
Paperikoneiden nopeuksien ja laatuvaatimusten noustessa, myös koskettavaa mittapäätä on kehitetty paljon ja kosketuspainetta on yritetty saada pienemmäksi. Paperiradan merkkauksesta ja likaantumisesta ei kuitenkaan ole päästy eroon. Erityisesti kierrätyskuidun lisääntynyt käyttö on lisännyt koskettavaan paksuusmittaukseen liittyviä haasteita.

3.2 Paksuuden laserkolmiomittaus

Koskettamaton paperin paksuusmittausmenetelmä on ollut jo pitkään paperintekijöiden haaveena. Vuonna 2005 Metso toi markkinoille ensimmäisen jatkuvaan automaattiseen paperin poikkiprofiilin on-line säätöön kykenevän optisen paksuusmittarin.

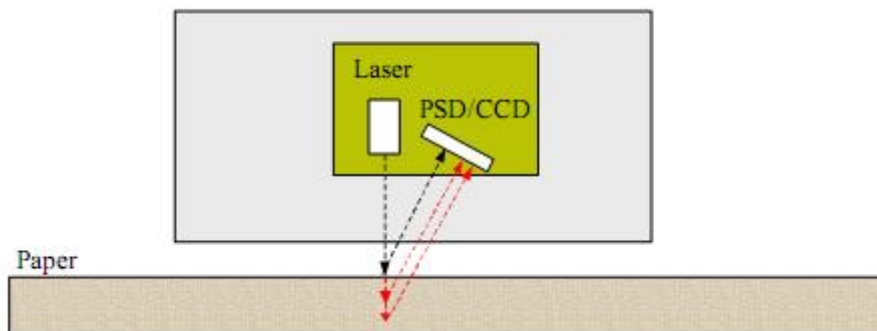
Metson optinen paperinpaksuusmittari perustuu yksipuoleiseen laserkolmiomittaukseen (kuvio2). Laser anturi mittaa optisesti paperin yläpinnan paikan kelan mitatessa paperin alapinnan kohdalla olevan levyn paikan. Näiden kahden tuloksen perusteella pystytään laskemaan paperin paksuus. Laserin mittauskulma muuttuu paperin paksuuden mukaan ja sensori havaitsee valon paperilla eri kohdassa riippuen kuinka paksua paperi on. Paperin alapinta imetään osittaisen tyhjiön avulla levyä vasten, jolloin se saadaan tasaiseksi ja pinta ei pääse elämään ja näin ollen vääristämään tulosta. Ilmapuhallus

pitää laitteen puhtaana pölystä ja sitä voidaan säätää automaattisesti, jotta kosketusvoima paperiin saataisiin pysymään mahdollisimman pienenä. Koska paperin pinta on toiselta puolen koko ajan kontaktiton, pääsevät mahdolliset paperin epäpuhtaudet kulkemaan vapaasti mittarin läpi aiheuttamatta merkkejä tai reikiä paperiin. (Graeffe & Nuyan 2005)



Kuvio 2: Laserkolmiomittaukseen perustuva paperin paksuusmittari. Sensori havaitsee laserin heijastuman eri kohdassa riippuen kuinka paksua paperi on. (Graeffe & Lindeman 2007)

Koska paperi ei ole täysin läpinäkymätöntä laserin valo tunkeutuu aina hiukan paperin sisään. Tämä ilmiö vääristää tulosta, kuten kuviosta 3 nähdään. Sensori luulee, että kaikki valo tulee paperin pinnasta, mutta todellisuudessa osa valosta heijastuu paperin sisältä osuessaan kuituihin ja täyteaineisiin.



Kuvio 3 Laserin valo ei heijastu täysin paperin pinnasta, vaan osa valosta heijastuu takaisin paperin sisältä vääristäen tulosta. (Graeffe & Nuyan 2005)

Dodson, Oba & Sampson (2001) tutkivat laboratorioarkeilla neliömassan, paksuuden ja tiheyden vaikutusta paperin paksuuden lasermittaukseen. He testasivat kolmea eri massatyypistä eri sakeuksilla ja kahta eri keskimääräistä neliömassaa. He vertasivat paperin kolmiolaserpaksuusmittausta ja standardin mukaista laboratorio paksuusmittausta mikrometrillä. Tuloksista käy ilmi että laser ja mikrometrimittaukset ovat lineaariset, lasermittarin tulosten näyttäessä jatkuvasti vähemmän kuin mikrometrin. Laserin ja mikrometrin erotus (offset) riippuu myös massatyypistä. Pinnan karheus ja opasiteetti vaikuttavat myös tähän eroon laserin ja mikrometrin välillä. Yamauchi (1987) toteaa tutkimuksessaan, että perinteinen laboratoriomikrometri mittaa paperista vain paksuimmat kohdat, kun taas kolmiolasermittaus kattaa koko paperin pinnan. Tämän takia varsinkin karheilla pinnoilla laser yleensä näyttää paperin ohuempana kuin koskettava mittari. Toisaalta erittäin kokoonpuristuvilla lajeilla koskettava mittaus saattaa puristaa paperia kasaan ja optinen mittaus voi näyttää paperin paksummaksi.

Näistä edellä mainituista syistä laserkolmiomittaus tarvitsee offset -arvon korjatakseen mittaustulosta. Offset arvo tarkoittaa laserkolmiomittauksen keskimääräistä eroa laboratoriopaksuusmittaukseen. Tämä offset arvo tulee määrittää jokaiselle paperilajille erikseen ja tässä työssä tutkimme millaisia offset -arvot ovat eri paperilajeilla.

4 Mittaustulokseen vaikuttavia tekijöitä

Työn kaksi tärkeintä mittausta ovat paperin paksuuden laboratorio- ja optinen mittausta. Laboratoriomittaukset toimivat referenssi arvoina ja niitä verrataan optisen paksuusmittauksen antamiin tuloksiin. Mittausten avulla tutkimme optisen mittarin luotettavuutta ja toimivuutta eri paperilajeille.

Näiden kahden päämittauksen lisäksi suoritettiin joukko tukevia mittauksia, joilla pyrittiin selittämään paksuusmittauksissa esille nousseet ilmiöt. Tuloksia selittäviä mittauksia ovat paperin optiset ominaisuudet Minolta Spectrophotometrillä mitattuna, tärkeimpänä opasiteetti sekä paperin karheus-, kokoonpuristuvuus- ja kiiltomittaukset.

4.1 Opasiteetti

Opasiteetti on paperin läpinäkyvyyden mitta. Opasiteetti ilmaistaa mustaa pintaa vasten mitatun heijastusluvun ja rajaheijastusluvun suhteena. Mitä pienempi opasiteetti, sitä läpinäkyvämpää paperi on.

Opasiteetti on tärkeää varsinkin painopaperilajeille, joilla huono opasiteetti voi vaikeuttaa kuvien ja tekstin lukemista, kun paperin toiselle puolelle painettu teksti kuuluu läpi. Opasiteetin tärkeyttä on nykyaikana lisännyt myös pyrkimys pienentämään papereiden neliömassoja. (Knowpap)

Opasiteettiin voidaan vaikuttaa monella tapaa eri tuotantoprosessin vaiheissa. Massojen valinnalla ja täyteaineiden käytöllä voidaan vaikuttaa opasiteettiin. Myös paperikoneen muuttujilla ja kalanteroinnilla voidaan säädellä opasiteettia. Opasiteettiin vaikuttaminen ei kuitenkaan ole yksinkertaista, koska yleensä opasiteetti kulkee käsi kädessä muiden ominaisuuksien kuten lujuuden kanssa. Lujuuksia saadaan paremmaksi lisäämällä pitkäkuituista sellua, joka puolestaan huonontaa opasiteettia ja lyhyt kuituinen sellu parantaa opasiteettia, mutta huonontaa lujuuksia. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 101 - 103)

Opasiteetti lasketaan Y-arvon avulla standardin SCAN-P8 mukaisesti. Y-arvo mitataan valolla, jolla on intensiteettimaksimi näkyvän alueen keskellä eli tarkalleen vihreän valon aallonpituudella 557 nm. Y-arvo kuvaa paperin heijastusta koko spektrin alueella. Kun Y-arvon mittausta tehdään yhdestä arkista täysin mustaa taustaa vasten, saadaan toinen heijastusluku Y_0 . Opasiteetti lasketaan näiden kahden arvon avulla kaavalla:

$$\text{Opasiteetti}\% = \frac{Y_0}{Y} * 100\% \quad (1)$$

jossa

Y = Y-arvo mitattuna standardivalolla.

Y_0 = yksittäisen arkin Y-arvo samoissa olosuhteissa mitattuna täysin mustaa taustaa vasten. (Vaarasalo 1998)

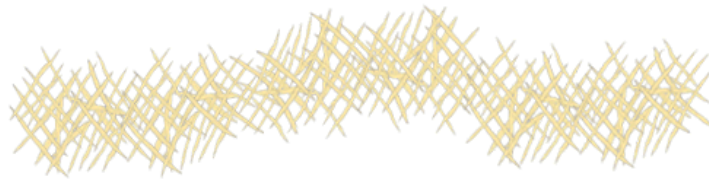
Opasiteetti on tärkeässä roolissa paperin paksuuden lasermittauksessa, koska laser tunkeutuu paperin sisään sitä enemmän mitä huonompi opasiteetti on. Laserin tunkeutuminen paperin sisään voi vääristää tulosta, koska takaisin heijastunut valo ei tule enää kokonaan paperin pinnasta vaan osa tulee paperin sisältä ja näin ollen laser luulee, että paperin pinta on alempana kuin se oikeasti on.

4.2 Karheus

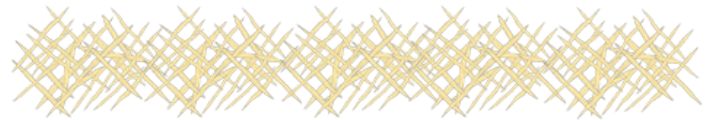
Paperin sileys on tärkeää varsinkin syväpainopapereilla, joilta vaaditaan hyvää kontaktia paperin pinnan ja painosylinterin välillä. Karhea paperi aiheuttaa muun muassa puuttuvia pisteitä ja huonontaa näin ollen painolaatua. (Knowpap)

Karheus voidaan jakaa mittakaavansa mukaan makro-, mikro- sekä optiseen karheuteen (Kuvio 4). Makro- ja mikrokarheudella on vaikutusta painatusjälkeen, kun taas optisella karheudella on suuri vaikutus kiiltoon. Makrokarheutta mitataan perinteisillä ilmapuotomittareilla ja mikrokarheutta voidaan mitata profilometrisin menetelmin. Optista karheutta voidaan mitata atomivoimamikroskoopilla. (Knowpap)

Karheuden komponentit



Makrokarheus (100 μm \rightarrow) ~ formaatio



Mikrokarheus (1 μm \rightarrow 100 μm) ~kuidut



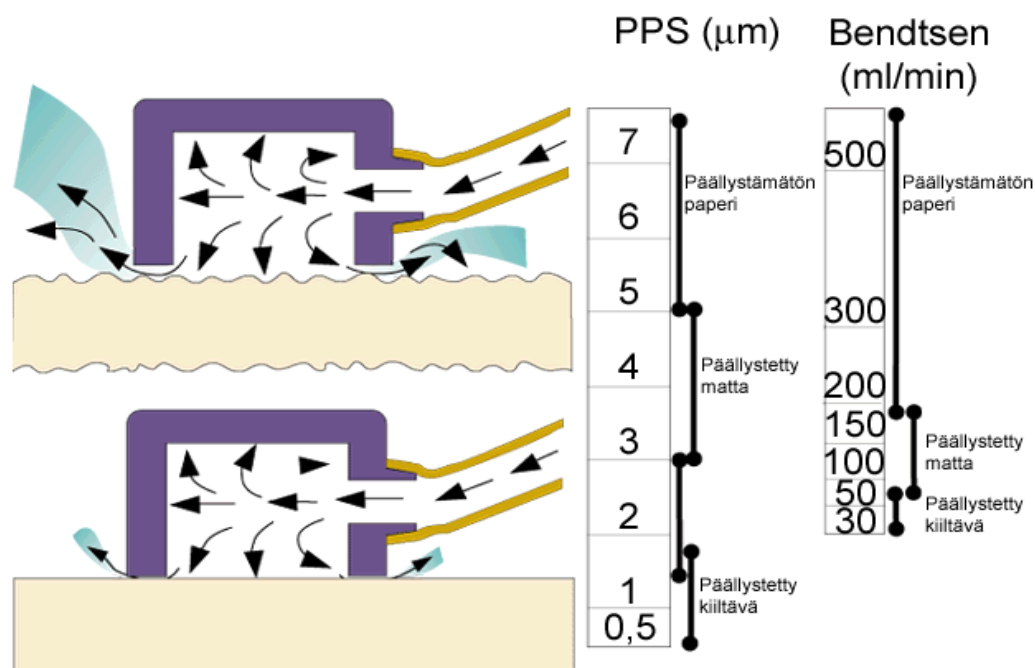
Optinen karheus (\rightarrow 1 μm) ~ pigmentti

Kuvio 4: Paperin pinnankarheuden eri mittakaavojen mukaiset komponentit. (Knowpap)

Parhaiten pinnankarheuteen voidaan vaikuttaa kalanteroinnilla ja päällystyksellä. Muita pinnankarheuteen vaikuttavia tekijöitä ovat formaatio, viiranpinnan tasaisuus sekä märkäpuristuksessa puristavan pinnan tasaisuus. (Knowpap)

Yleisimmin paperin pinnan sileyttä/karheutta mitataan ilmavirran avulla. Mittauksessa mitataan kuinka paljon tai kuinka nopeasti ilma virtaa paperin ja sileäksi hiotun pinnan välisestä raosta, kuten kuvioista 5 nähdään. Sileyttä voidaan mitata myös optisesti ja profiilometrisillä menetelmillä. (Knowpap)

Pinnan karheus



Kuvio 5: Paperin pinnankarheuden mittauksen periaate PPS- ja Bendtsen-mittareilla (Knowpap)

Paperin paksuutta koskettavalla mittarilla mitattaessa paperin pinnan karheus ei vaikuta tulokseen kovinkaan paljon, koska mitta-anturi painaa paperin pintaa vakiopaineella eikä tulos muutu karheuden vaihdellessa. Optisesti mitattaessa mittalaser myötäilee paperin pintaa ja jos paperi on kovin karhea, niin tuloksen hajonta kasvaa, koska paperin pinta ei ole tasainen.

4.3 Kokoonpuristuvuus

Kokoonpuristuvuus mittaa kuinka paljon paperi tai kartonki painuu kasaan eli litistyy, kun sitä puristaa tietyllä voimalla. Varsinkin paksuilla kartonkilajeilla ja aaltopahvilla kokoonpuristuvuus on tärkeää. Normaalit paino- ja kirjoituspaperit ovat yleensä niin ohuita ja tiiviitä ettei kokoonpuristuvuutta juurikaan ole havaittavissa.

Kokoonpuristuvuutta voidaan mitata pinnankarheuden mittalaitteilla kuten PPS- ja Bendtsen-mittareilla. Kokoonpuristuvuus ilmoitetaan kahdella eri puristusaineella suoritettujen mittausten suhteena esimerkiksi PPS-karheusmittarilla seuraavan kaavan mukaan:

$$\text{Kokoonpuristuvuus}\% = \frac{PPS10 - PPS20}{PPS10} * 100\% \quad (2)$$

jossa

PPS10 = PPS karheus mittaus paineella 1 kPa.

PPS20 = PPS karheus mittaus paineella 2 kPa.

Paperin paksuuden optinen mittaus ei purista paperia ollenkaan toisin kuin perinteinen koskettava mittaustapa, jolloin eroavuuksia voi syntyä, jos paperin pinta puristuu kasaan koskettavaa mittaria käytettäessä.

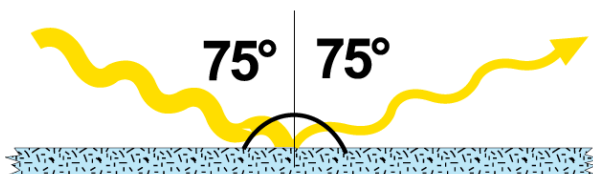
4.4 Kiilto

Paperin kiilto on sen kyky heijastaa tuleva valo takaisin samassa kulmassa, jossa se osuu paperin pintaan. Paperin kiilto ei useimmissa tapauksissa ole tavoitteena sinänsä, vaan tavoitteena on painojäljen ja erityisesti monivärikuvien kiilto. Luettavassa tekstissä paperin kiilto on enemmänkin haitta kuin hyöty. Kiilto on kuitenkin hyödyllinen paperin ominaisuus, jota voidaan käyttää painojäljen ennustamiseen. Paperin kiilto on merkki siitä, että paperin pinta on sileä. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 104)

Yleisin menetelmä kiillon mittaamiseen perustuu valon heijastukseen paperin pinnasta tulo- ja mittauskulman ollessa samat. Hunterin kiiltomittari käyttää tätä periaatetta ja se on usein otettu standardiksi. Kuvioista 6 näkee, että tässä menetelmässä tulo- ja mittauskulma on 75° pintaan nähden. Valo heijastuu paperin pinnasta ja detektoidaan samassa kulmassa. Mitä alhaisempi paperin kiilto on sitä enemmän valo siroaa eri kulmissa ja näin ollen standardikulmassa heijastuneen valon intensiteetti on suoraan verrannollinen paperin kiiltoon, joka ilmaistaan kiiltoyksikköinä 1...100. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 104)

Kiilto

%



Kuvio 6: Kiillon mittaamiseen periaatteen mukaan tulo- ja mittauskulma ovat yhtä suuret 75° paperin pintaan nähden (Knowpap)

Optinen paksuuden mittaus perustuu valon heijastukseen paperin pinnasta, joten tässä työssä tutkitaan myös kuinka suuri merkitys kiillolla on paksuusmittauksen tuloksen tulkinnassa.

4.5 Kalanterointi

Kalanterointi on paperinvalmistusprosessin viimeisin vaihe, jolla voidaan merkittävästi vaikuttaa paperin ominaisuuksiin. Kalanteroinnissa paperia puristetaan kahden tai useamman telan välissä, jotka voivat olla joko kovia tai pehmeitä. Kalanteroinnin aikana paperi muuttuu muotoaan niin tason kuin paksuuden suunnassa puristusvoimien sekä kitka- ja leikkausvoimien vaikutuksesta (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 204 - 217)

Kalanteroinnilla on suuri vaikutus paperin paksuuteen. Kalanteroinnin aikana paperin paksuus voi pudota jopa puoleen. Kalanteria käytetäänkin paksuusprofiilin hallintaan. Painopaperien kalanteroinnissa päätehtävänä on paperin pintaominaisuuksien muokkaaminen painomenetelmän vaatimusten mukaiseksi. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 204 - 217)

Kuten kaikessa paperin valmistuksessa myös kalanteroitaessa joudutaan usein tekemään kompromisseja haluttujen ominaisuuksien välillä. Voimakas kalanterointi parantaa paperin sileyttä ja kiiltoa, mutta samaan aikaan paperin paksuudesta riippuvat suureet

kuten jäykkyys, lujuudet ja optiset ominaisuudet heikkenevät (taulukko 1). (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 204)

Taulukko 1: Kalanteroinnin vaikutukset paperin ominaisuuksiin.

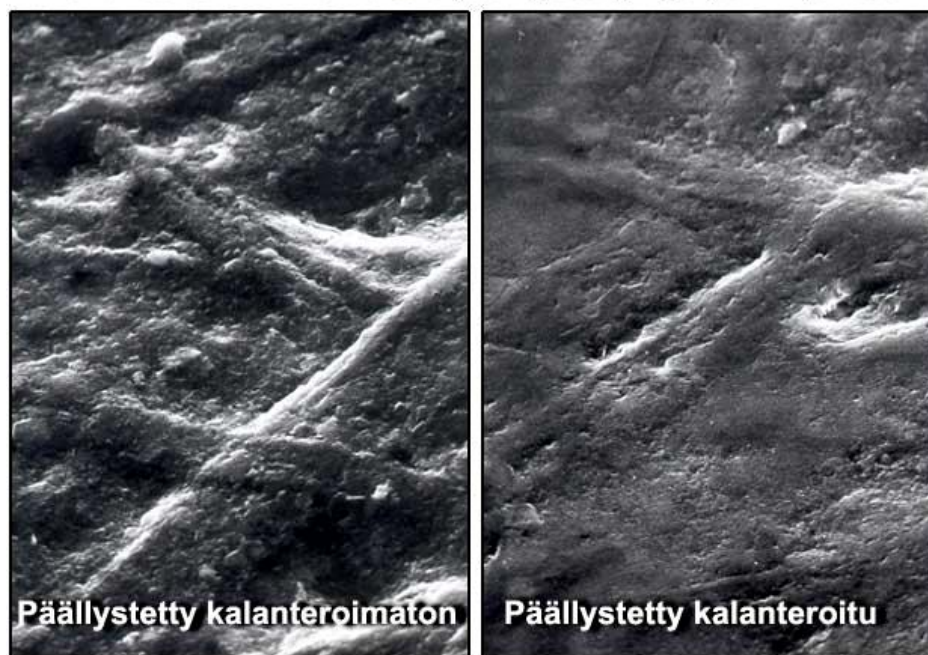
Suotuisat muutokset		Haitalliset muutokset	
Sileys	+++	Tiheys	+++
Kiito	+++	Paksuus	---
ilmanläpäisevyys	---	Jäykkyys	---
Öljynabsorptio	---	Kokoonpuristuvuus	---
Toispuolisuus	-	Opasiteetti	---
		Vaaleus	-
		Repäisylujuus	---
		Vetolujuus	-

+++ = kasvaa paljon

- = laskee hiukan

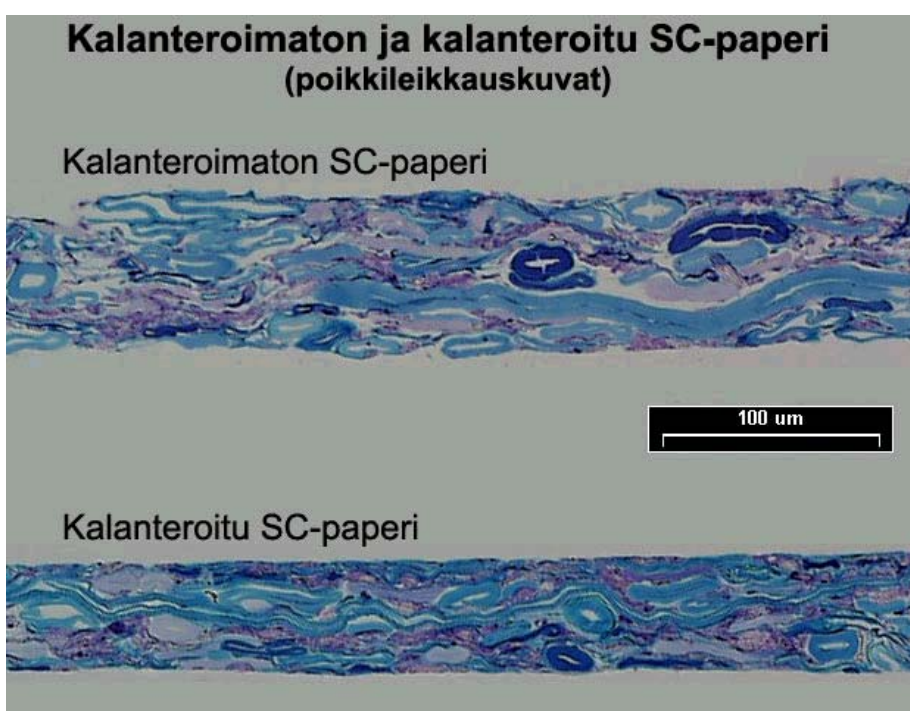
Kalanteroinnilla on suuri merkitys moneen ominaisuuteen, joiden uskotaan vaikuttavan optiseen paksuudenmittaukseen. Kalanterointi muuttaa paperin pintaa merkittävästi ja paperin tiheys muuttuu. Optinen lasermittari myötäilee paperin pintaa tarkemmin kuin koskettava paksuusmittari ja näin ollen kalanteroitaessa tapahtuva pinnanmuutos voi aiheuttaa eroja mittaustulokseen. Kuviosta 7 nähdään hyvin kuinka kalanterointi vaikuttaa paperin pintaan. Kalanteroinnin jälkeen päällystetyn paperin pinta on paljon sileämpi ja korkeuserot ovat tasaantuneet.

Kalanteroinnin vaikutus päällystetyn paperin pintaan



Kuvio 7: Kalanteroinnin vaikutus päällystetyn paperin pintarakenteeseen. (Knowpap)

Kuviossa 8 on esitetty poikkileikkauskuva siitä kuinka kalanterointi tiivistää ja tasoittaa paperin pintaa. Kalanterointi ei pelkästään tasoita paperin pintaa vaan se muokkaa myös paperin sisintä tiivistäen paperia. Kun paperin tiheys kasvaa huononevat paperin tiheyteen (paksuuteen) riippuvat suureet kuten lujuuudet ja opasiteetti.



Kuvio 8: Kalanteroinnin vaikutus SC-paperin tiheyteen ja pinnan sileyteen. (Knowpap)

5 Mitattavat paperilajit

Työssä mitattavat paperinäytteet pyrittiin valitsemaan siten, että mahdollisimman moni paperilaji olisi mukana, jotta tuloksista saataisiin kattavat ja luotettavat. Näytejoukossa on mukana päällystettyjä ja päällystämättömiä, puupitoisia sekä puuvapaita paperilajeja. Yhteensä näytesarjoja on 30 kappaletta. Jokaisesta näytesarjasta valittiin ainakin neljä eri neliömassaa. Näytteiden neliömassat pyrittiin pitämään melko pienenä, jotta mittaukseen vaikuttavien tekijöiden, kuten opasiteetin vaikutus saatiin hyvin näkyviin. Neliömassat vaihtelevat välillä 40 - 180 g/m².

5.1 Sanomalehtipaperi

Sanomalehtipaperia valmistetaan tonneissa mitattuna eniten koko maailmassa. Se on tyypillinen bulkkituote, jota käytetään suuria määriä. Se on raaka-aineiltaan, neliömassaltaan sekä laatuominaisuuksiltaan pitkälti standardisoitu. Suurin osa sanomalehtipaperista käytetään sanomalehtiin, mutta sitä käytetään myös vähemmän vaativissa mainosjulkaisuissa sekä ilmaisjakeluissa. Sanomalehtipaperilta vaaditaan hyvää painettavuutta ja ajettavuutta nopeilla paperi- ja painokoneilla sekä asiakkaan vaatimaa ulkonäköä. Sanomalehtipaperin vakio neliömassat ovat 45 g/m² ja 42,5 g/m², mutta myös 48,8 g/m² ja 40 g/m² neliömassoja käytetään. Kuljetus-, käsittely- ja varastointikustannusten säästöjen toivossa on neliömassoja pyritty pienentämään, mutta lisääntynyt kierrätyskuidun käyttö on hillinnyt tätä trendiä. Sanomalehtipaperi on päällystämätöntä paperia, mutta viime aikoina neliömassojen alentuessa sitä on alettu pigmentoida haluttujen ominaisuuksien saavuttamiseksi. Pigmentointi on kuitenkin melko harvinaista (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 61 - 63)

Sanomalehtipaperin pääraaka-aineena käytetään valkaisematonta mekaanista havupuumassaa, hioketta, painehioketta tai kuumahierrettä. Sanomalehtipaperi sisältää tyypillisesti yli 90 % mekaanista massaa ja alle 10 % kemiallista massaa. Mekaanisen massan freeness on tavallisesti välillä 90 - 100 ml CSF, joka antaa paperille hyvät painettavuus- ja ajettavuusominaisuudet. Kemiallisen massan lisääminen parantaa lujuusominaisuuksia, mutta vaikuttaa muihin tärkeisiin ominaisuuksiin, kuten opasiteettiin ja valonsirontaan, negatiivisesti. Sellun lisääminen myös nostaa tiheyttä ja heikentää absorptiokykyä. Kemiallinen massa on myös kalliimpaa kuin mekaaninen

massa, joten kemiallisen massan osuus pyritään pitämään mahdollisimman pienenä, jotta kustannukset eivät nousisi. Valmistuskustannukset ovat ratkaisevia sanomalehtipaperin kaltaiselle bulkkituotteelle. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 61 - 63)

Mekaanisten massojen ja valmistusprosessien kehitys on vähentänyt kemiallisen massan tarvetta, mutta pyrkimys alempiin neliömassoihin on lisännyt kemiallisen massan käyttöä. Kierrätyskuitua käytetään nykyään yhä enemmän sanomalehtipaperin valmistukseen ja sen osuus voi olla jopa 100 %. Kuiduksi kelpaa hyvin normaalista kotikeräyspaperista valmistettu uusiomassa, eikä sellua tarvitse yleensä lisätä. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 61 - 63)

Täyteaineita ei ole tyypillisesti käytetty sanomalehtipaperin valmistukseen, koska niillä on lujuuksia heikentävä vaikutus. Kierrätyskuitu kuitenkin sisältää täyteaineita jonkin verran, minkä vuoksi täyteaineita on alettu lisäämään myös perinteiseen sanomalehtipaperiin. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 61 - 63)

Nykyaikaisessa sanomalehtipaperikoneessa on kitaformerit, jotka takaavat symmetrisen rakenteen paperille, sekä suuret tuotantonopeudet. Riittävän sileyden ja tasaisen paksuusprofiilin aikaansaamiseksi sanomalehtipaperi usein konekalanteroidaan tai nykyään yhä useammin käytetään softkalanteria. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 61 - 63)

5.2 SC

SC-paperi (Super Calendered) on superkalanteroitu, päällystämätön puupitoinen paperi. SC-paperia käytetään aikakauslehdissä ja se eroaa sanomalehtipaperista siinä, että sen massa on hienompaa ja vaaleampaa sekä superkalanteroinnin takia tiiviimpää ja kiiltävämpää. SC-paperin neliöpainot ovat tyypillisesti välillä 40 - 80 g/m². SC-paperin raaka-aineena käytetään pääosin mekaanista massaa 70 - 90 % kuidusta sekä 10 - 30 % kemiallista armeerausmassaa. Kemiallisen sellun osuus pyritään pitämään mahdollisimman pienenä, koska se heikentää painettavuutta, sekä nostaa valmistuskustannuksia. Sellua täytyy käyttää kuitenkin jonkin verran, että paperin lujuusominaisuudet pysyisivät riittävällä tasolla. Mekaanisen massan freeness on välillä

30 - 70 ml CSF, joten se on hienompijakoista kuin sanomalehtipaperin valmistuksessa käytetty mekaaninen massa. Parempien painettavuusominaisuuksien aikaansaamiseksi SC-paperissa käytetään paljon täyteaineita, joiden osuus on yleensä 20 - 35 %. SC-paperia käytetään syväpainossa, mutta viime vuosina menestystä on saanut myös offset SC-paperi, joka kilpailee lähinnä päällystettyjen paperilajien kanssa. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 63 - 65)

SC-paperi on saanut nimensä superkalanteroinnin mukaan ja kalanteroinnilla onkin suuri rooli paperin viimeistelyssä. Superkalanteroinnilla paperiin saadaan korkealaatuinen pinta, jotta painatuksesta saataisiin riittävän hyvälaatuinen. SC-paperilta vaaditaan hyviä painatus- sekä ajettavuusominaisuuksia. Tärkeimmät painatukseen liittyvät optiset ominaisuudet ovat kiilto, opasiteetti ja vaaleus. Hyvä kiilto lisää painoväriin tummuutta ja parantaa näin kuvan kontrastia. Korkea vaaleustaso parantaa sävyntoistoa ja opasiteetin täytyy olla riittävän korkealla tasolla läpikuullon estämiseksi. Optisten ominaisuuksien riittävän tason lisäksi, ominaisuuksien hajonnan ja toispuoleisuuden tulee olla mahdollisimman pieni. Paperin puolten symmetrisyyden ja ajonopeuksien takia kitaformerit ovat tyypillinen viiraosaratkaisu SC-paperikoneella. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 63 - 65)

Optisten ominaisuuksien lisäksi ajettavuusominaisuudet ovat tärkeässä roolissa SC-papereilla. Suuri osa painokoneilla tapahtuvista katkoista on paperin mekaanisen vian, kuten rynkkyjen, reikien tai reunarisojen, aiheuttamia. Syväpainatus vaatii SC-paperilta riittävää kokoonpuristuvuutta, sileyttä sekä pientä huokoisuutta. Offset-painatuksen kannalta tärkeimpiä ominaisuuksia ovat pölyämättömyys sekä pintalujuus. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 63 - 65)

5.3 LWC & MWC

LWC (Light Weight Coated) ja MWC (Medium Weight Coated) ovat puupitoisia päällystettyjä papereita, joita käytetään hyvää painojälkeä vaativissa julkaisuissa, kuten aikakauslehdissä, mainospainotuotteissa, suoramainontatuotteissa sekä myyntiluetteloissa. Päällystettyjen papereiden tärkeimmät painomenetelmät ovat heatset-offset sekä syväpaine. Offset paperilajin päällyspastassa on noin kaksinkertainen määrä sideainetta, jotta painettaessa saavutettaisiin riittävä pintalujuus. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 65 - 66)

LWC-paperi on yksi paperiteollisuuden voimakkaimmin kasvavista tuotteista. Se on painojäljen laadultaan, kiilloiltaan ja vaaleudeltaan parempaa kuin SC-paperi. LWC-paperin pääraaka-aineena käytetään mekaanista massaa jota on yleensä 45–80 %. Mekaanisen massan lisäksi LWC-paperissa käytetään valkaistua havupuusellua 55 – 20% sekä täyteainetta tuhkapitoisuuden maksimoimiseksi 6-10 %. Kemiallisen massan osuus pyritään pitämään mahdollisimman pienenä kalliimman hinnan ja huonompien paino-ominaisuuksien takia. Pohjapaperin pitää kuitenkin kestää päällystysprosessin aikaiset rasiot, joten kemiallisen massan osuus on suurempi kuin päällystämättömissä lajeissa, jotta saavutetaan riittävät lujuusominaisuudet. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 65 - 66)

LWC-paperin neliömassa on tyypillisesti 40–60 g/m², mutta myös kevyempiä ja painavampia laatuja löytyy välillä 30–70 g/m². LWC-paperi on kertaalleen päällystettyä ja päällysteen määrä on yleensä 4 - 12 g/m² per puoli. Päällystys voidaan suorittaa joko erillisellä päällystykoneella tai paperikoneen yhteydessä olevalla päällystysasemalla. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 65 - 66)

MWC-paperi on raaka-aineiltaan hyvin lähellä LWC-paperia, mutta raskaampaa, tyypillisesti neliömassa on välillä 70–130 g/m². MWC-paperi on kaksoispäällystettyä ja päällysteen määrä on yhteensä 12–24 g/m² per puoli. Kaksoispäällystykseen ansiosta MWC-paperi on homogeenisempaa ja tiiviimpi rakenteista kuin LWC-paperi. Kaksoispäällystykseen ansiosta myös vaaleutta on helppo parantaa. Pigmenttimäärän kasvu usean päällystyskerran takia kasvattaa paperin tiheyttä, minkä seurauksena erityisesti arkkipainopapereille tärkeä jäykkyys huononee. Myös paperin lujuusominaisuudet ja venymä ovat kriittisiä moninkertaisen paperin kostutuksen ja kuivatuksen vuoksi. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 65 - 66)

5.4 MFC

MFC-paperi (Machine Finished Coated) on paperikoneella päällystetty ja viimeistelty paperilaji. MFC-paperi on puupitoinen, mattapintainen ja kevyesti päällystetty paperi. Mekaaninen massa on MFC-paperin pääraaka-aineena ja sitä on 75 - 90 %. Pitkäkuituista sellua käytetään armeerausmassana ja sen osuus on 10 - 25 %. Sopivan tuhkapitoisuuden varmistamiseksi valmistuksessa lisätään myös täyteaineita 5 - 10 %.

MFC-paperin neliömassa voi olla niinkin alhainen kuin 45 g/m² tai 48 g/m², mutta tyypillisesti se on kuitenkin 51–80 g/m². MFC-paperia ei ole kalanteroitu niin voimakkaasti kuin LWC-paperia ja näin ollen sen bulkki on korkeampi. MFC-paperi on siten jäykempi kuin LWC-paperi ja himmeäpintainen. Himmeä pinta ja korkea vaaleus tekevät siitä hyvän pohjan tekstin painatukselle ja MFC-paperia käytetään paljon kirjojen painatukseen. Muita käyttökohteita ovat erikoisaikakauslehdet, mainospainotuotteet, luettelot ja opetuskirjallisuus. Yleisimmin käytetty painomenetelmä on heatset-offset. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 66)

5.5 WFU

WFU-paperi (Wood Free Uncoated) paperi on nimensä mukaan puuvapaapaperi ja se on valmistettu useimmiten 100 prosenttisesti sellusta. Puuvapaanpaperin, jota usein myös hienopaperiksi kutsutaan, raaka-aineina käytetään havupuu- ja lehtipuusellua. Sellujen suhde riippuu vaadituista paperin ominaisuuksista ja niiden suhde voi vaihdella 20 - 80% välillä ja niissä on 5 - 25 % täyteaineita. Lehtipuusellulla vaikutetaan optisiin ja painatusominaisuuksiin ja havupuusellua käytetään lähinnä armeerausmassana, kuten puupitoisilla papereillakin. WFU-papereita käytetään paino-, kirjoitus ja piirustuspapereina, sekä toimisto- ja kirjekuoripapereina. Täysin puuvapaiden papereiden arkistoitavuus on hyvä, koska ne eivät sisällä ollenkaan ligniiniä ja näin ollen ne eivät kellastu juuri ollenkaan UV-valossa. WFU-papereiden neliömassat vaihtelevat suuresti loppukäytöstä riippuen neliöpaino voi olla 70–200 g/m². (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 66 - 67)

Puuvapaille papereille on tyypillistä hyvin korkea vaaleus. Käytettäessä valkaistua sellua sekä kalsiumkarbonaattia täyteaineena saadaan vaaleus selvästi mekaanista massaa sisältäviä papereita paremmaksi. Käytettäessä pitkälle valkaistuja selluja ja oikeita täyteaineita saavutetaan yli 90 %:n ISO-vaaleuden taso. Optisia kirkasteita voidaan myös käyttää pyrittäessä yhä korkeampiin vaaleustasoihin. Bulkki on tietyille WFU-papereille, kuten kopiopaperille erittäin tärkeä ominaisuus. Bulkki lisää jäykkyyttä, jota tarvitaan kopiokoneissa sekä bulkki parantaa opasiteettia, joka on kopiopaperin tärkeimpiä ominaisuuksia. Puuvapaat päällystämättömät paperit vaativat usein pintaliimauksen ja ne kalanteroidaan paperikoneella, joko kovalla konekalantarilla tai softkalanterilla. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 66 - 67)

5.6 WFC

WFC-paperit (Wood Free Coated) ovat päällystettyjä puuvapaita papereita, jotka on tarkoitettu vaativaan painatukseen. Päällystemäärä, kiillotusaste ja muut ominaisuudet voivat vaihdella suuresti ja ne määräytyvät käyttötarkoituksen asettamien vaatimusten mukaan. WFC-paperi voi olla 1 - 3 kertaa päällystetty ja laadultaan parasta paperia kutsutaan taidepainopaperiksi, jota käytetään korkealuokkaisten taidekirjojen, vuosikertojen ja mainosmateriaalin painamiseen. Kevyemmin päällystettyä paperia käytetään muun muassa aikakauslehtiin, luetteloihin, esitteisiin, kirjoihin ja mainosjulisteisiin. Suurimmillaan päällysteen määrä voi olla jopa 40 g/m². Monipäällysteinen paperi yleensä esipäällystetään paperikoneella on-line päällystyskoneella ja loput kerrokset päällystetään erillisellä päällystyskoneella. Päällystyksen jälkeen paperi voidaan kalanteroida haluttujen ominaisuuksien mukaan joko mattapintaiseksi tai kiiltäväksi. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 66 - 67)

WFC-paperien massaseos sisältää lehtipuusellua 30–70% ja havupuusellua 30–70 %. Mekaanista massaa voidaan käyttää hieman, mutta kaikissa tapauksissa se on alle 10 %. Taidepainopaperin tärkeimmät ominaisuudet liittyvät painettavuuteen. Vaaleus ja ajo-ominaisuudet ovat myös tärkeitä. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 66 - 67)

6 Mittaukset ja tulokset

Mitattavien paperilajien joukko pyrittiin valitsemaan mahdollisimman laajaksi, jotta saataisiin kattavat ja luotettavat tulokset. Näytearkkien vähäisistä määristä johtuen, osissa mittauksia jouduttiin hieman soveltamaan standardeja. Esimerkiksi opasiteetin ja karheuden mittauksessa arkkeja ei leikattu standardin mukaiseen kokoon vaan ne mitattiin A4-arkkikoossa.

Erilainen ja laaja näytejoukko antaa kattavat ja luotettavat tulokset. Näytearkkien erilaisuudesta johtuen mittaustulosten saamiseksi vertailukelpoiseksi keskenään tuli kiinnittää erityistä huomiota. Esimerkiksi PPS-karheusmittari on parempi vaihtoehto sileille papereille ja Bentdsen-karheusmittari on parempi vaihtoehto karheille lajeille. Jotta tulokset olisivat vertailukelpoiset, valittiin karheusmittariksi PPS-karheusmittari, koska se antaa luotettavia tuloksia myös karheille papereille. Tämän työn yksi päätarkoitus on selvittää mitkä ovat mahdolliset offset arvot laserkolmiomittausmenetelmällä eri paperilajeille. Offset arvolla tarkoitetaan laboratorio- ja laserpaksuusmittauksen erotusta ja sitä tarvitaan korjaamaan optisen mittarin tulosta. Jokaisen paperinäytteen paksuudet mitattiin laboratoriossa sekä laserkolmiomenetelmällä. Näiden lisäksi valittiin joukko muita mittauksia, kuten opasiteetti, karheus ja kokoonpuristuvuus, joiden avulla pyrittiin selittämään paksuusmittauksissa havaittuja ilmiöitä. Toinen tärkeä tulos tässä työssä on kalanteroinnin vaikutus optisen paksuuden mittauksen tuloksiin.

6.1 Paksuusmittaukset

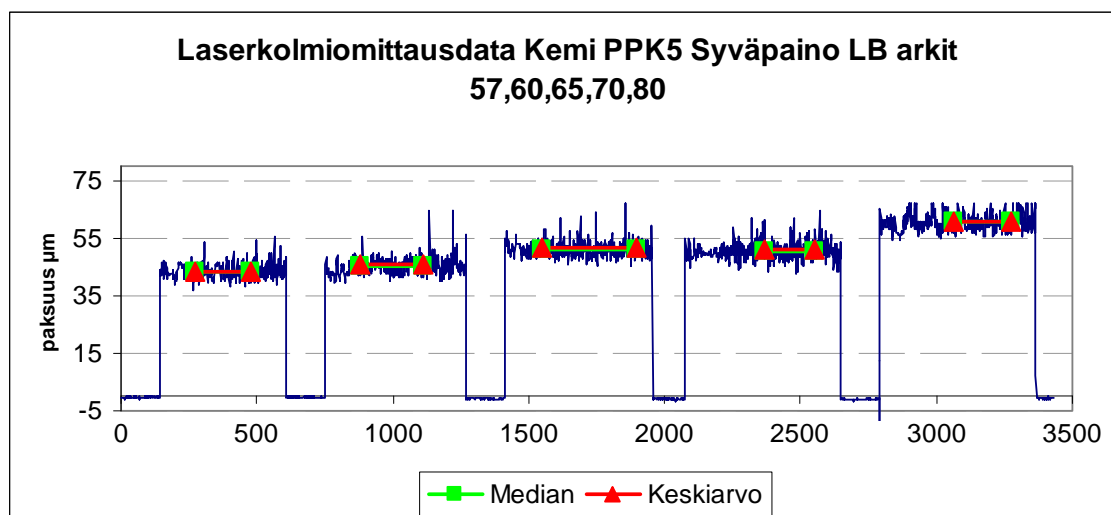
Näytteiden laboratoriopaksuudet mitattiin Lorentzen&Wettren mikrometrillä. Mittaus suoritettiin standardin ISO 534 mukaisesti muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta. Paperinäytteitä ei leikattu standardin mukaiseen kokoon ja pinopaksuuden sijaan mitattiin arkin paksuutta. Laite painaa mittapään paperin pintaa vasten 100 kPa:n paineella ja mittaa paperin paksuuden mekaanisesti. Näytteet mitattiin yksi arkki kerrallaan, koska tarkoitus oli mitata juuri tietyn arkin paksuus eikä suinkaan paperilajin paksuutta. Jokainen arkki mitattiin kahdeksasta eri kohdasta ja näistä laskettiin keskiarvo.

Jokainen paperilaji mitattiin omana sarjanaan, jotta pystyttiin eliminoimaan mahdolliset laserin asetusten muutokset. Paperinäytteet mitattiin useaan otteeseen, jotta saatiin toistettavuutta ja luotettavuutta mittauksille. Paperinäytteitä mitattiin myös sarjana toisten lajien kanssa, jotta lasermittarin parametrien vaihtelu saataisiin minimoitua. Näissä usean paperilajin samanaikaisissa mittaamisissa valittiin jokin tunnettu arkki kiintopisteeksi ja muita tuloksia verrattiin sen tuloksiin.

Paperin optinen paksuusmittaus on laboratorio-oloissa herkkä erilaisille muuttujille. Esimerkiksi taustalevyn pinnan laatu vaikuttaa mittarin nollakohdan määrittämiseen. Myös laserin asetukset tulee olla tarkasti määritetyt, jotta saataisiin mahdollisimman tarkat tulokset.

Paperin laserkolmiopaksuusmittaus suoritettiin Metson optisella paksuusmittarilla IQLaserCaliper-mittarilla. Mittaus suoritettiin laboratorio-oloihin mukautetulla onlinemittarilla, joka on toimintaperiaatteeltaan täysin samanlainen kuin Metson mittaraamista löytyvä optinen paksuusmittari.

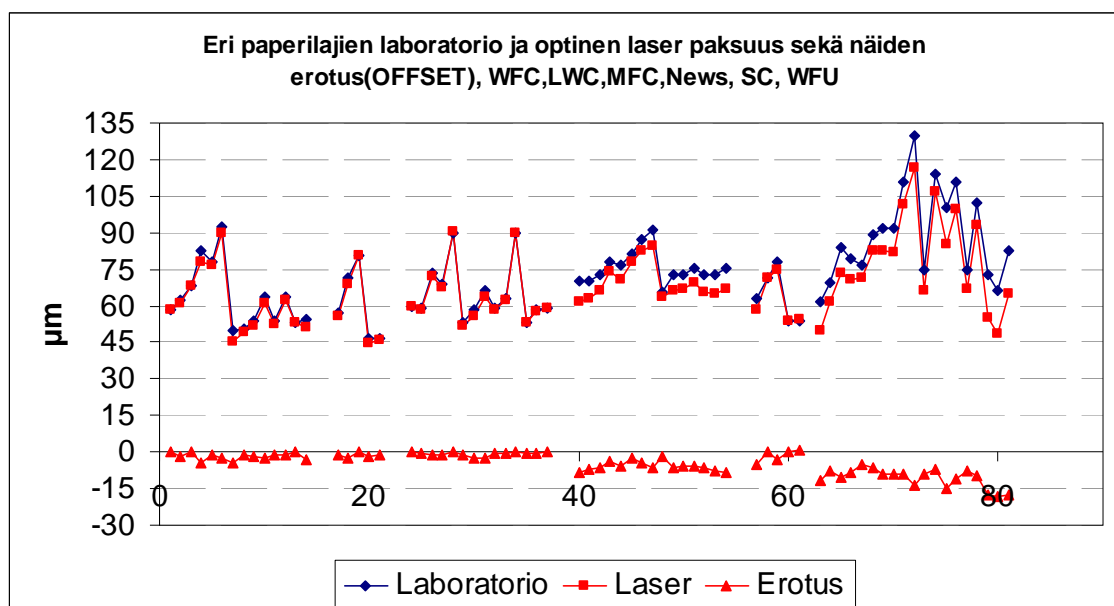
IQLaserCaliper-mittari antaa suuren määrän mittausdataa jokaista mittauskertaa kohden. Mittapisteitä voi olla useita tuhansia ja tämän takia mittausdataa täytyy muokata, jotta paperin paksuus saadaan laskettua. Kuvioista 9 huomaa kuinka paljon dataa kertyy yhdellä mittauskerralla ja kuinka suurta datan vaihtelu on. Arkkien vaihtuessa laser näyttää paksuuden nollana, kuten pitääkin, mutta joissain kohdin nollakohta elää hiukan ja tämä pitää ottaa huomioon lopullista tulosta ilmoitettaessa. Kuvioon 9 on piirretty median ja keskiarvokäyrät, jotka on saatu laskemalla kyseiset arvot viivan näyttämällä alueella mittapisteistä. Koska paperi heiluu jonkin verran näytettä mitattaessa, täytyy jokaisen arkin kohdalla miettiä mitkä pisteet ovat oikeita ja mitkä johtuvat paperin heilahtelusta ja muista virhetekijöistä. Tämän työn mittauksissa on käytetty median arvoa keskiarvon sijaan, koska se ei ole niin herkkä virhetekijöistä johtuville piikeille.



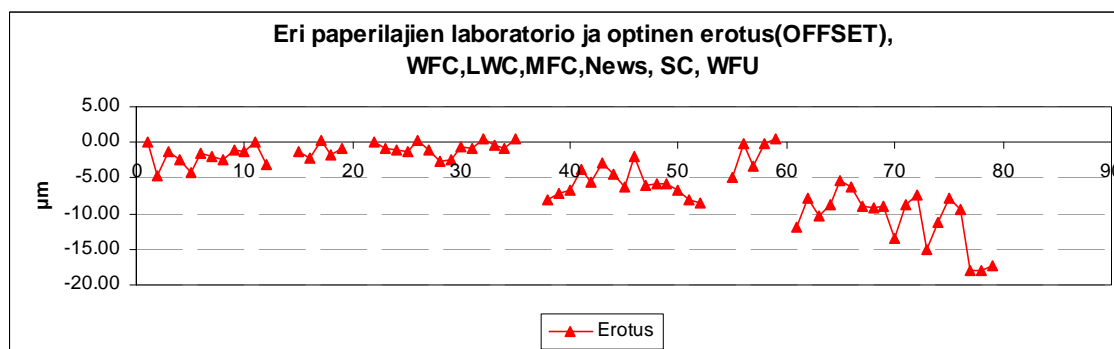
Kuvio 9: Laserkolmiomittauksen esimerkkidata. Median ja keskiarvo esitettynä.

Kuviosta 10 nähdään millaisia tuloksia eri paperilajeille saatiin. Näytejoukossa on suuri määrä eri paperilajeja ja useita eri paksuuksia jokaisesta lajista. Kuviosta 10 huomaa, miten hyvin lasermittaus vastaa laboratorio mittauksia päällystetyillä lajeilla paksuudesta riippumatta. Nämä mittauspisteet on koottu useasta eri mittauskerrasta, joten voidaan myös todeta, että laserilla tehdyt mittaukset ovat myös hyvin toistettavia,. SC paperin kohdalla laserin ero laboratorio arvoon nähden pysyy myös hyvin samanlaisena. Päällystämättömillä papereilla erot laboratorioarvoihin ovat suuremmat ja hajontaa esiintyy enemmän.

Kuviossa 11 on esitettyä laboratorio ja laserpaksuusmittauksen erotus. Kuviosta näkee, että päällystetyillä lajeilla WFC, LWC ja MFC sekä superkalanteroiduilla SC lajeilla erot ovat melko pieniä, vain 0 - 5 μm . Päällystämättömillä ja vähemmän kalanteroiduilla lajeilla, kuten News ja WFU, laserin ero laboratorioarvoihin on suurempi ja vaihtelee enemmän kuin päällystetyillä ja kalanteroiduilla lajeilla. News-lajeilla offset on välillä 3 - 10 μm ja WFU lajeilla välillä 6 - 18 μm .



Kuvio 10: Laboratorio ja optiset laboratoriopaksuudet sekä näiden erotukset



Kuvio 11: Laserkolmiomittauksen offset laboratorioarvoihin nähden

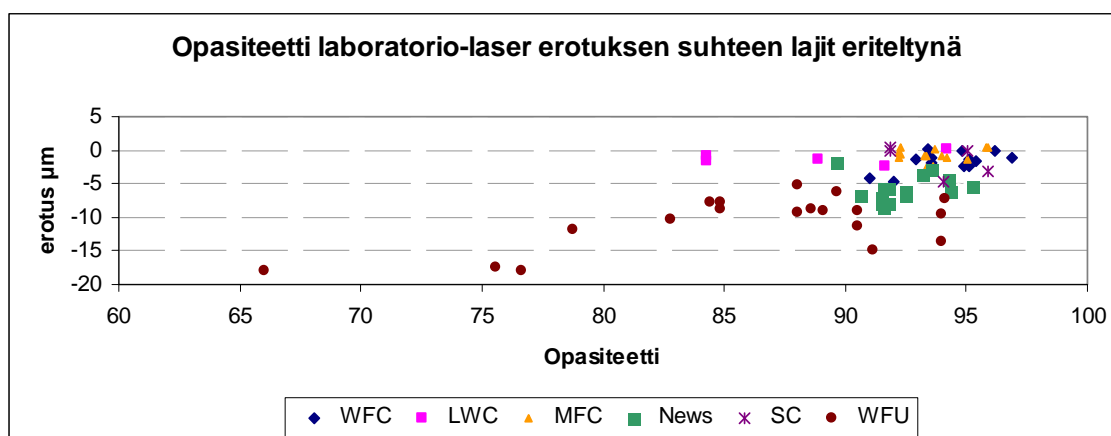
Tuloksista huomataan, että päällystetyillä ja kalanteroiduilla lajeilla lajikohtaisia korjauskertoimia ei tarvita tai ne ovat hyvin pienet. Pieni vaihtelu arvoissa voi johtua mittauksissa muuttuvista tekijöistä, kuten laserin arvojen vaihtelusta ja inhimillisestä tekijästä, mutta myös paperinäytteiden erilaisista ominaisuuksista kuten opasiteetista ja karheudesta. News- ja WFU-lajeilla offsetin vaihtelu on suurempaa ja näillä lajeilla paperin ominaisuudet ovat suuremmassa roolissa kuin päällystetyillä, koska esimerkiksi opasiteetin ja karheuden vaihtelut ovat suurempia kuin päällystetyillä ja SC-lajeilla. On myös huomattava, että mekaanista massaa sisältäville lajeille kuten LWC ja MFC näyttää olevan pienempi tarve lajikohtaiseen korjauskertoimeen kuin sellupohjaisilla WFC-lajeilla. News-lajeilla, jotka on myös valmistettu mekaanisesta massasta, on tulosten perusteella pienempi korjauksen tarve kuin vastaavilla sellupohjaisilla WFU-lajeilla. Syynä tähän eroon mekaanisten ja sellupohjaisten paperien välillä voidaan

selittää esimerkiksi opasiteetilla, joka on yleisesti ottaen korkeampi mekaanisesta massasta valmistetuilla papereilla.

6.2 Opasiteetti

Opasiteetti mitattiin standardin ISO 2470:1999(E) mukaisesti. Mittauksessa oli tarkoitus selvittää nimenomaan kyseisen arkin opasiteetti, eikä paperilajin opasiteettia yleensä. Mittaukset suoritettiin Minolta Photospectrillä. Opasiteetin vaikutusta optiseen paksuusmittaukseen tutkittiin vertaamalla paperiarkin opasiteetin ja laboratorio- ja optisenpaksuusmittauksen erotusta toisiinsa.

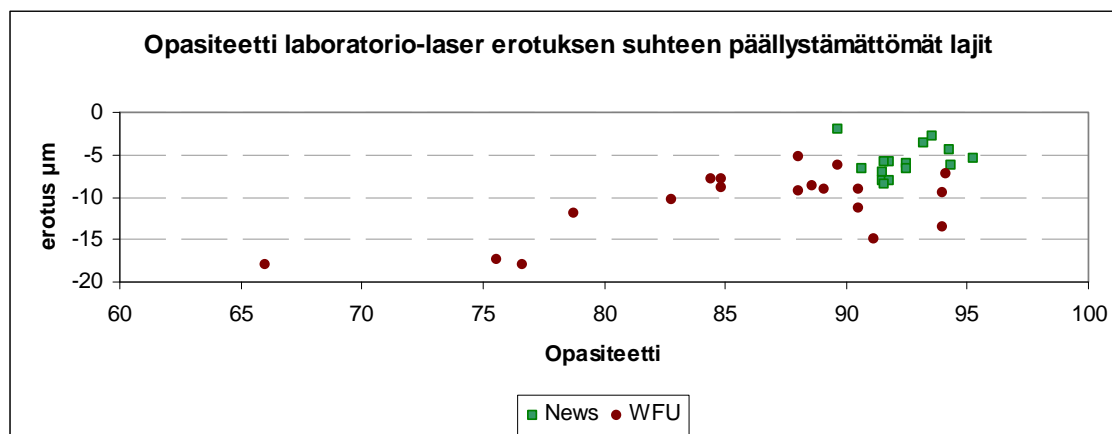
Kuviossa 12 on jokainen paperilaji merkattu omalla värillään. Opasiteetin ollessa noin 90 ja enemmän ei varsinaista trendiä ole huomattavissa, mutta opasiteetin selvästi huonontuessa voidaan hienoinen trendi erottaa. WFU on ainut laji jolla nähdään selvää trendiä opasiteetin huononemisen ja laboratorioerotuksen (offsetin) kasvamisen välillä. Mutta tämä trendi on havaittavissa vasta kun opasiteetti on huonompi kuin 85 sitä suuremmilla arvoilla ei ole WFU lajeillakaan havaittavissa selvää yhteyttä. Normaalissa toimintaympäristössä opasiteetti on yleensä yli 90 jolloin tämän perusteella opasiteetilla yksinään ei voi selittää havaittuja paksuuseroja yksikäsitteisesti.



Kuvio 12: Opasiteetti laboratorio ja laser erotuksen suhteen. Eri lajit merkattu omilla värein.

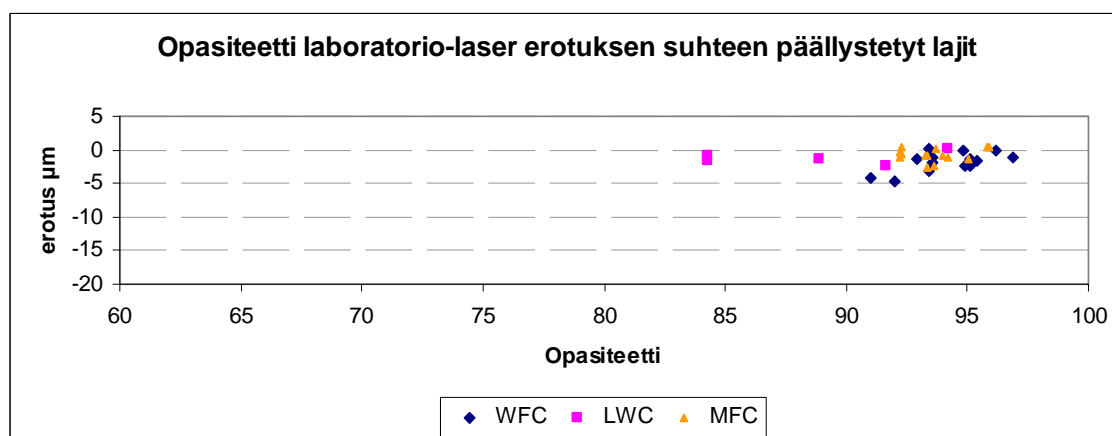
Kuviossa 13 on esitetty opasiteetti laboratorioerotuksen suhteen ja mukaan on otettu vain päällystämättömät lajit. News lajien opasiteetti pysyy kaikilla yli 90 ja näissä

tuloksissa ei olekaan huomattavissa suoraa yhteyttä opasiteetin ja erotuksen suhteen. WFU lajeilla trendin voi havaita kun opasiteetti laskee alle 85:n jolloin erotus näyttäisi kasvavan sitä suuremmaksi mitä huonommaksi opasiteetti menee.



Kuvio 13: Opasiteetti laboratorio ja laser erotuksen suhteen, päällystämättömät lajit.

Kuvioon 14 on koottu opasiteetti mittauksen päällystettyjen lajien tulokset laboratorioerotuksen suhteen. Päällystettyjen lajien laserin offset on pientä. Opasiteetin ja laboratorio erotuksen suhteen ei ole havaittavissa trendiä.



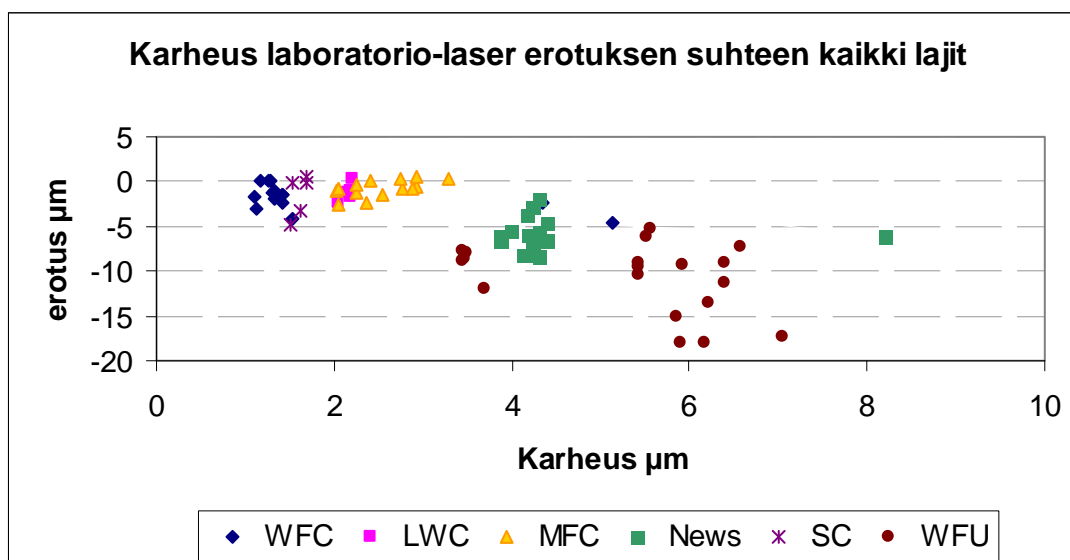
Kuvio 14: Opasiteetti laboratorio ja laser erotuksen suhteen, päällystetyt lajit.

Kuvioiden perusteella näyttäisi, että opasiteetin ollessa yli 85 ei sillä voi yksinään selittää tarvittavia offset arvoja. Tämä pätee varsinkin päällystetyillä lajeilla, joiden opasiteetti on yleensä 90 tai yli. Opasiteetin laskiessa alle 85:n voidaan huomata yhteys offsetin ja opasiteetin välillä. Opasiteetin ollessa yli 85 ei paperilajilla näyttäisi olevan merkitystä laserin mittaustulokseen.

Mitattavissa näytteissä useammalla lajilla olisi saanut olla huono opasiteetti, jotta tuloksiin olisi saanut lisää luotettavuutta. Koska mitatut näytteet olivat valmiita papereita tehtailta suoraan, niin on ymmärrettävää, että niihin on haluttu saada paras mahdollinen opasiteetti ja varsinkin päällystetyillä lajeilla on harvinaista, että opasiteetti on alle 85. Yli 85 opasiteetin omaavia mittauspisteitä on kuitenkin suuri määrä ja näistä tuloksista nähdään, että opasiteetilla on vaikutus tulokseen, mutta tulosta ei voi selittää pelkän opasiteetin avulla. Opasiteetin ollessa 85 ja parempi, kuten yleensä normaaleilla kirjoitus- ja painopapereilla on, ei tarvita opasiteetista johtuvia offset korjauksia.

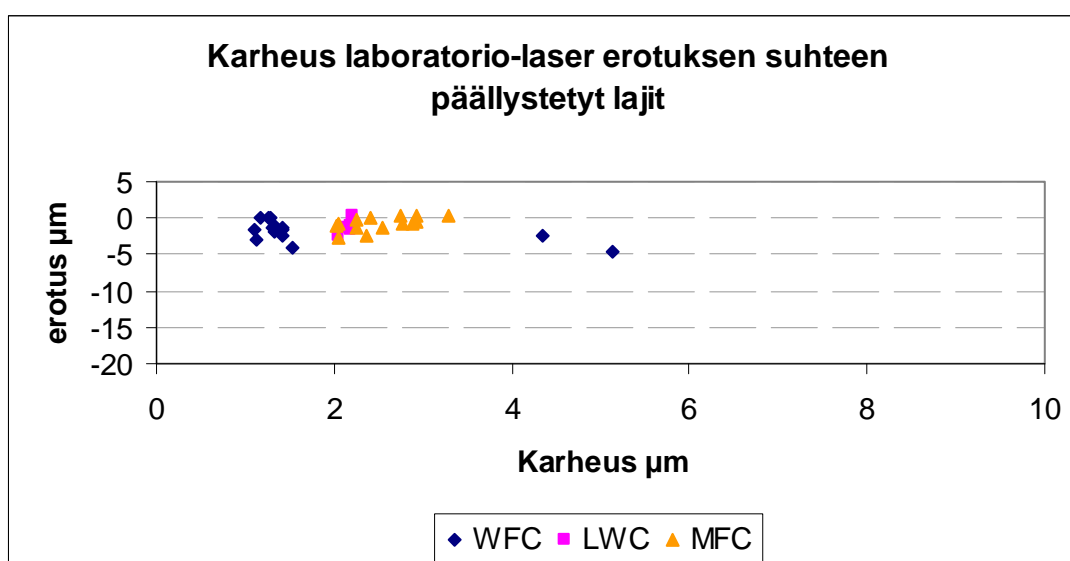
6.3 Karheus

Karheus mitattiin Parker Print Surf karheusmittarilla standardin ISO 8791-2:1990 mukaisesti. Tarkoituksena oli mitata jokaisen näytearkin karheus. Jotta tuloksista saatiin vertailukelpoisia keskenään, suoritettiin jokainen mittaus PPS-mittarilla, vaikka Bentdsen karheusmittaus olisi yleisesti ottaen parempi vaihtoehto karheille lajeille. Kuvioon 15 on merkitty kaikkien lajien karheudet eriteltyinä. Karheuden kasvaessa erotus laboratorio- ja laserpaksuusmittauksen välillä näyttäisi myös kasvavan. Tämä trendi ei kuitenkaan ole kovin vahva ja se korostuu vasta paperin karheuden ollessa 4 μm ja enemmän. Karheuden ollessa välillä 1-3 μm offsetillä ei näyttäisi juurikaan olevan suoraa yhteyttä karheuden suuruuteen. Kuviosta huomaa kuinka jokainen laji näyttäisi olevan omana ryppäänään. Päällystetyt lajit ja SC ovat sileitä papereita ja näiden erotus on melko pieni, lajista riippumatta. News ja WFU lajit ovat paljon karheampia ja näillä lajeilla myös eroa löytyy enemmän ja virheen hajonta on suurempaa. Kuviota katsomalla voisi sanoa, että karheuden ja offsetin välillä olisi yhteys, mutta kun tuloksia tarkastelee lajikohtaisesti, ei trendejä ole havaittavissa.



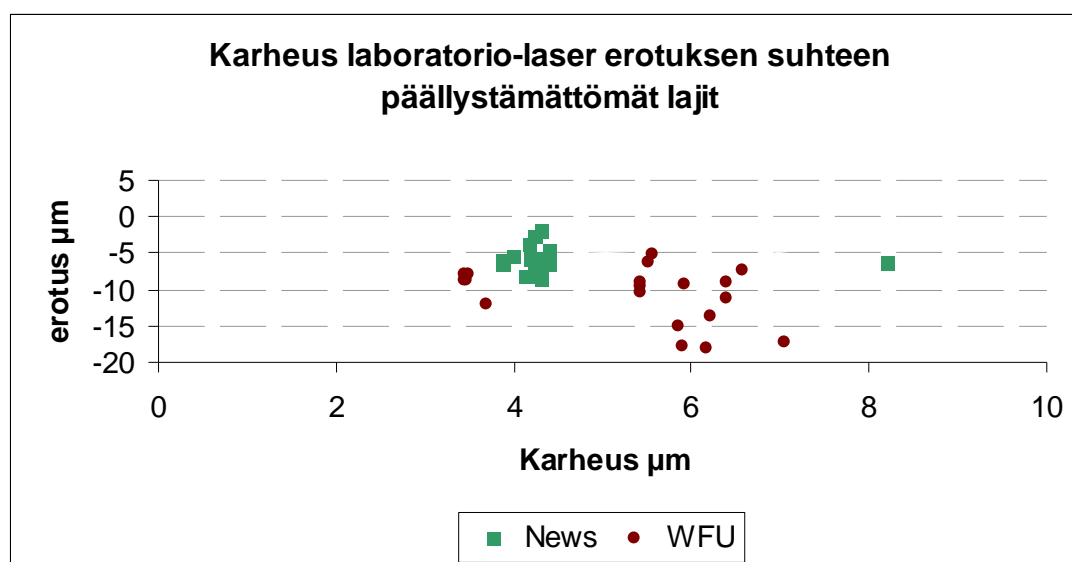
Kuvio 15: Näytearkkien karheus laboratorio-laser erotuksen suhteen, lajit eriteltyinä.

Kuviossa 16 on mukana pelkästään päällystetyt lajit. Kaikilla lajeilla erotus pysyy 0-5 μ m välillä. WFC lajeilla sileys on kaikkein parasta, muutamaa karheampaa näytettä lukuun ottamatta, mutta näilläkään pisteillä ei virhe ole sen suurempi kuin sileämmillä näytteillä. LWC ja MFC lajit ovat hiukan WFC lajeja karheampia, mutta erotus on näilläkin lajeilla pieni. Karheuden ja laboratorio – laser erotuksen välillä ei ole havaittavissa minkäänlaista nousevaa tai laskevaa trendiä päällystetyillä lajeilla, eikä tarvittavaa offsetiä pysty selittämään yksinään karheuden avulla mitattuna.



Kuvio 16: Näytearkkien karheus laboratorio-laser erotuksen suhteen, päällystetyt lajit

Kuviossa 17 on mukana pelkästään päällystämättömät lajit. Päällystämättömät lajit ovat paljon karheampia kuin päällystetyt lajit erotus laboratorio- ja lasermittauksen välillä on myös suurempi. News ja WFU lajit löytyvät kuviosta omina selkeinä kasautuminaan. News lajeilla karheus pysyy melko samana vaihdellen vain hiukan. $4\mu\text{m}$:n molemmin puolin ja offset vaihtelee välillä $3\text{--}9\mu\text{m}$. Yksi News näyte on selvästi karheampaa kuin muut, yli $8\mu\text{m}$, mutta tämänkin näytteen offset on kuitenkin noin samansuuruinen kuin muilla News näytteillä. WFU lajien karheus vaihtelee enemmän kuin News lajeilla ollen välillä $3.5\text{--}7\mu\text{m}$ ja samoin myös erotus vaihtelee enemmän välillä $5\text{--}18\mu\text{m}$. Sileämmillä näytteillä offset arvo näyttäisi olevan samaa suuruusluokkaa kuin karheammillakin näytteillä. Kuvion perusteella näyttäisi, että kummallakaan lajilla ei ole havaittavissa trendiä karheuden ja offsetin välillä.

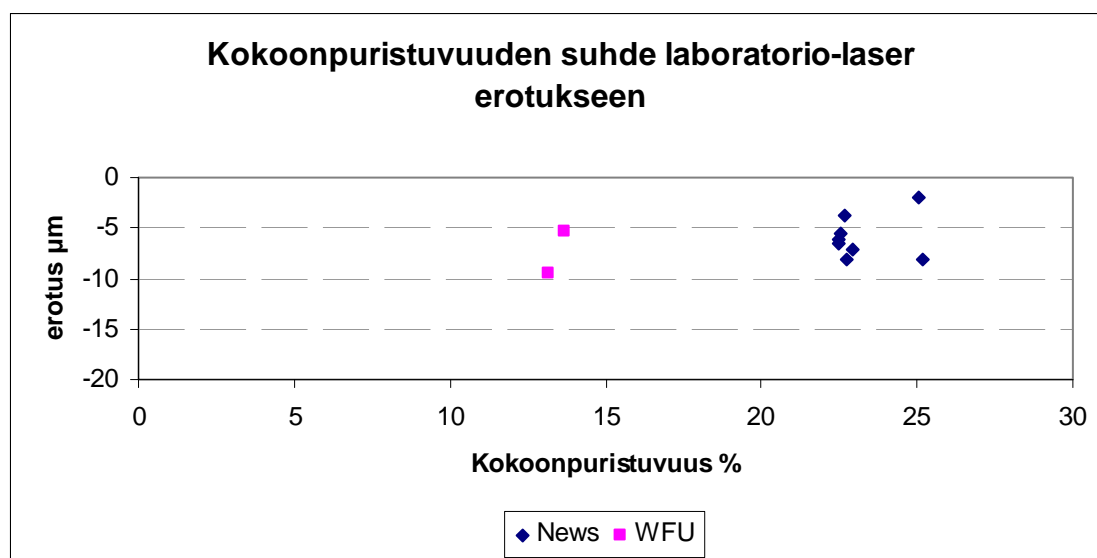


Kuvio 17: Näytearkkien karheus laboratorio-laser erotuksen suhteen, päällystämättömät lajit

Karheudella näyttäisi olevan vaikutusta paksuuden lasermittauksen tuloksiin, mutta yksinään sitä ei voi käyttää selittämään niitä. Laji kohtainen tarkastelu osoittaa, että karheuden suhde laboratorio erotukseen on jokaisella lajilla oma. Tämä lisäksi lajikohtaisen offset arvon määrittämisen tärkeyttä. Suurimmat erot ovat karheammilla lajeilla, kuten News ja WFU, mutta pitää muistaa, että näiden lajien opasiteetit ovat myös järjestään huonompia kuin sileämmillä näytteillä.

6.4 Kokoonpuristuvuus

Kokoonpuristuvuus otettiin mukaan mittauksiin, koska haluttiin selvittää tapahtuuko laboratorio mittauksen aikana paperin kokoonpuristuvuutta ja voiko se vaikuttaa tuloksiin. Kokoonpuristuvuuden mittalaitteeksi valittiin PPS-karheusmittari, jolla voidaan mitata paperin pinnan kokoonpuristuvuutta. Kokoonpuristuvuus lasketaan pinnan karheuden muutoksina, kun puristusvoimaa PPS-mittarissa muutetaan. Kokoonpuristuvuuden mittauksissa keskityttiin sellaisiin lajeihin jotka ovat bulkkisia ja karheita, kuten News ja WFU, jotta kokoonpuristuvuus saataisiin hyvin esiin. Kalanteroidut ja tiheät paperit kuten päällystetyt ja SC ovat jo valmiiksi niin kokoonpuristettuja ja näiden lajien huomiointi jätettiin vähemmälle. Kuvioon 18 on merkattu eräiden News ja WFU lajien kokoonpuristuvuudet laboratorio- ja lasermittauksen erotukseen nähden. Kuviosta huomaa ettei kokoonpuristuvuuden ja offsetin välillä ole suoraa yhteyttä. News lajien pinnan kokoonpuristuvuus on 20-25 %, joka on aivan normaalia karheille ja bulkkisille sanomalehtipapereille. Tämä kokoonpuristuvuus on kuitenkin niin pientä luokkaa, ettei se vaikuta mikrometrillä mitattaessa. WFU lajeilla kokoonpuristuvuus on vielä vähäisempää.



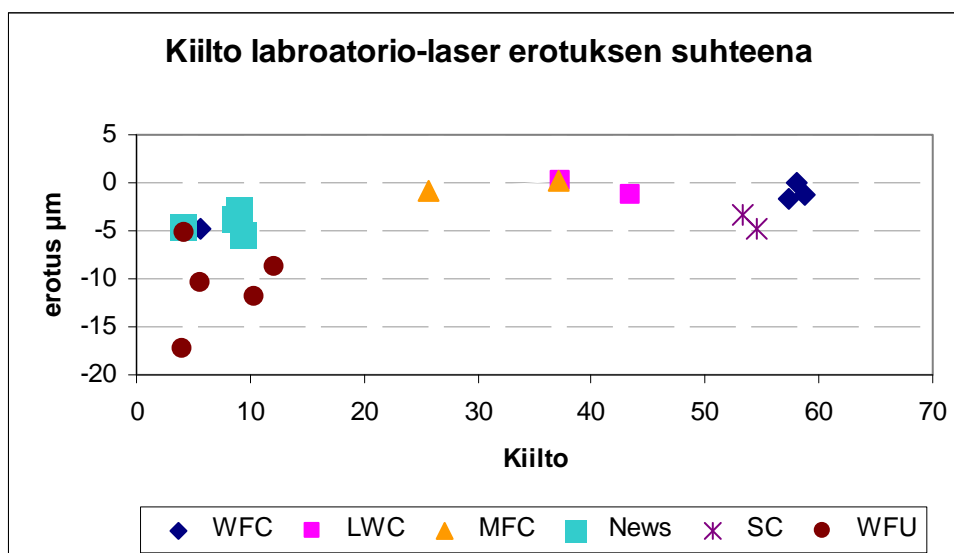
Kuvio 18: Kokoonpuristuvuuden suhde laboratorio- ja lasermittauksen erotukseen

Mittausten perusteella voidaan todeta, että kokoonpuristuvuus ei vaikuta niin paljoa paperiin koskettavan mittauksen aikana, että se vääristäisi tuloksia.

6.5 Kiilto

Kiillon mahdollista vaikutusta haluttiin myös tutkia, koska laserin valo heijastuu paperin pinnasta erilailla riippuen pinnan rakenteesta. Kiilto mitattiin standardin ISO 8254 - 2:2003 mukaisesti. Laite pystyy mittaamaan kiillon kolmesta eri kulmasta, mutta keskityttiin 75°:een kulmaan, joka on yleisesti käytetty normaaleille paperilajeille. Näytearkeiksi valittiin niin päällystettyjä ja kalanteroituja, kuin kalanteroimattomia päällystämättömiä lajeja, jotta saataisiin tuloksia laajalta alueelta.

Kuviosta 19 nähdään, että kiillon ollessa korkea offset pysyy melko pienenä. Kun kiilto putoaa heikoksi, alle 10, lisääntyy myös offsetin vaihtelu huomattavasti. Tulee muistaa, että lajit joiden kiilto on hyvä, ovat päällystettyjä ja niiden opasiteetti ja sileys ovat yleensä hyviä. Lajit joiden kiilto on heikko, ovat päällystämättömiä ja niiden karheus ja opasiteetit ovat huonoja.



Kuvio 19: Näytearkkien kiilto laboratorio- ja lasermittausten erotuksen suhteen

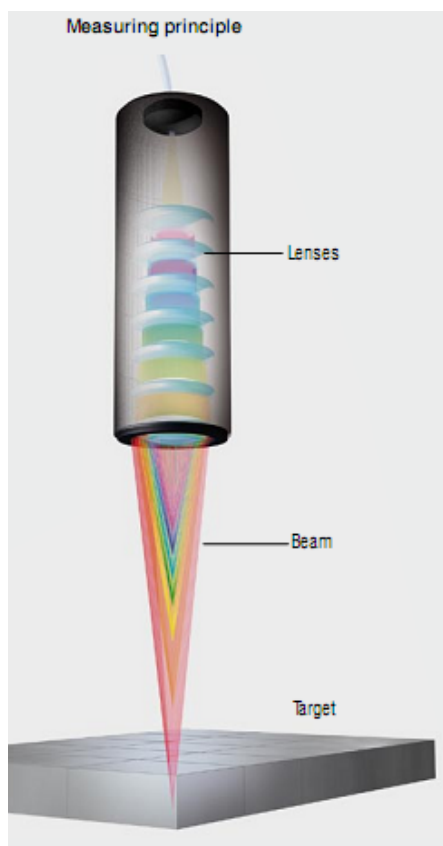
Kiilto mittausten perusteella on havaittavissa hienoista yhteyttä kiillon ja offsetin välillä, mutta lähempi tarkastelu osoittaa, että tämä näennäinen yhteys voidaan paremmin selittää muiden tekijöiden, kuten opasiteetin ja karheuden avulla.

6.6 Kalanteroinnin vaikutus

Yksi tärkeä tekijä tässä työssä oli kalanteroinnin vaikutuksen tutkiminen laserin mittaustuloksiin. Kalanterointi muuttaa paperin pintaa ja rakennetta, kuitenkin

muuttamatta paperin massaa. Kalanteritestiin valittiin identtiset paperinäytteet ja jokaista näytearkkia kalanteroitiin eri määrät. Kalanteritesteihin pyrittiin valitsemaan sellaiset näytteet, joissa kalanteroinnin vaikutus huomattaisiin helpoiten. SC- ja LWC pohjapaperien näytteet kalanteroitiin Metson pilottikalanterilla jossa voitiin paremmin vaikuttaa kalanterin säätöihin ja näin ollen myös tulokset näkyvät paremmin. TAMKIn kalanterilla ei päässyt vaikuttamaan niin paljon esimerkiksi opasiteetin muutoksiin, mutta sillä pystyi vaikuttamaan hyvin karheuteen ja bulkkiin.

Mielenkiinnon vuoksi osa näytteistä mitattiin myös käyttäen laserin tilalla konfokaalia anturia. Myös konfokaalimenetelmä perustuu paperin paksuuteen yksipuoleiseen optiseen mittaamiseen, toisen puolen ollessa tuettuna levyä vasten jonka paikka voidaan määrittää tarkasti kuvio 20. Suurin ero mittalaitteessa on erilainen mitta-anturi. Laservalon sijaan mittarissa käytetään konfokaali kromaattista aberratiota, jossa valon spektri pysyy paikallaan ja pinnan paikka lasketaan sen mukaan mikä värin aallonpituus on fokusoituneena. Konfokaali menetelmän hyviä puolia sanotaan olevan, ettei siinä esiinny laserkolmiomittauksessa esiintyvää tunkeutumista paperin sisään, vaan kaikki valo heijastuu suoraan paperin pinnasta



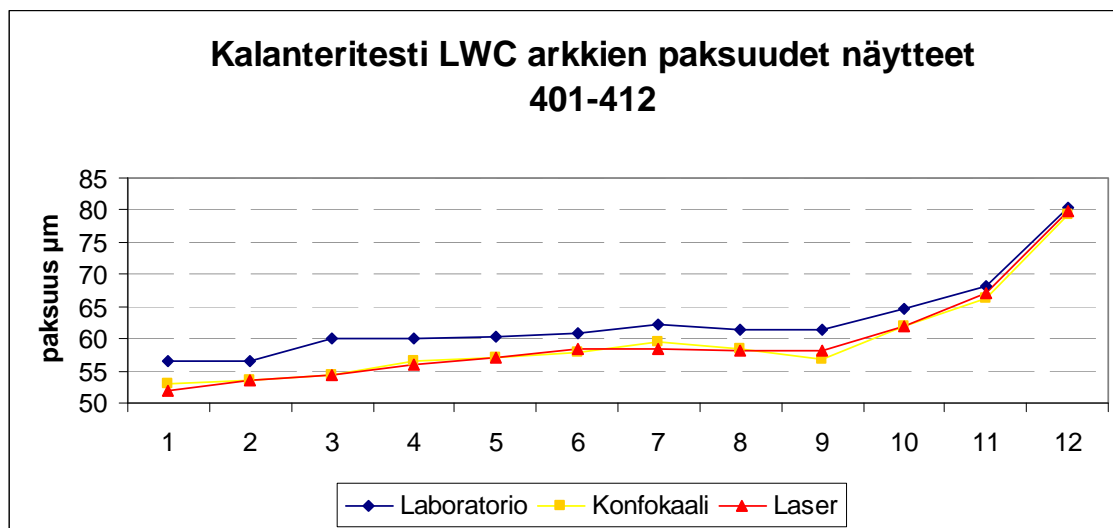
Kuvio 20: Paperin paksuuden mittauksessa käytetyn konfokaali kromaattisen aberration periaate (Mikro epsilon)

6.6.1 Kalanteritesti LWC

LWC-paperin kalanteritesti tehtiin Metson pilottikalanterilla. Näytearkeiksi valittiin 12 kappaletta täysin identtisiä LWC-pohjapaperia ja näitä arkkeja kalanteroitiin eri asetuksilla eri määrät. Kalanterin nopeutta ja puristuspainetta vaihdeltiin, siten että arkkia 412 kalanteroitiin vähiten ja arkkia 401 eniten. Kalanteroinnin tarkat asetukset näkyvät liitteessä 1.

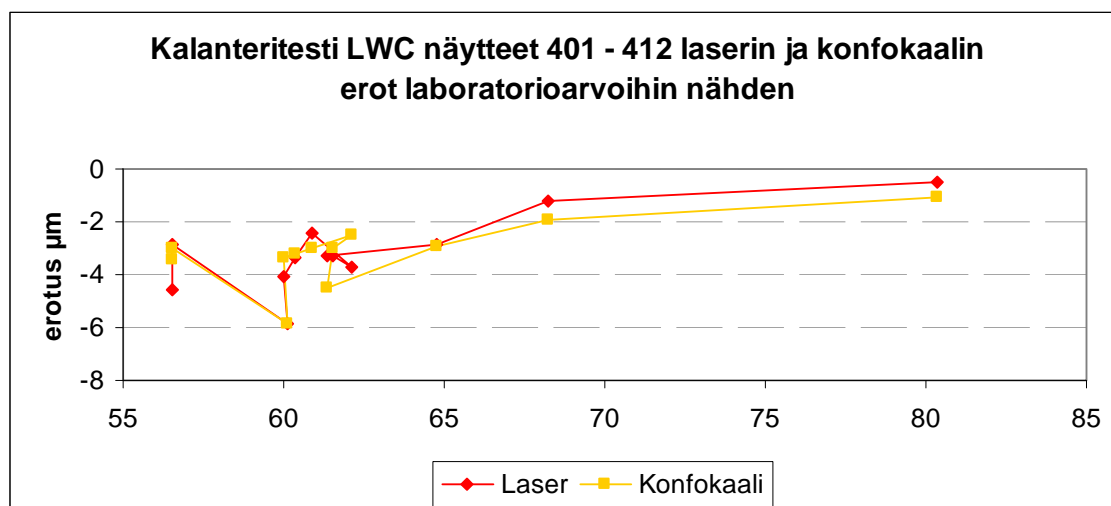
Näytearkkien paksuudet mitattiin laboratoriossa, sekä laserilla että konfokaalimenetelmällä. Kuvioista 22 nähdään, kuinka arkkien paksuudet suurenevat, kun kalanteroinnin määrä vähenee edetessä kohti näytettä 412. Molemmat optiset mittarit seurailevat laboratoriotuloksia alussa hyvin, mutta kalanteroinnin lisääntyessä molemmat optiset mittarit näyttävät arkit liian ohuina mitä ne ovat. Samalla kun arkkien paksuus pienenee, muuttuvat niiden ominaisuudet kuten opasiteetti ja karheus, ja tämä voi vaikuttaa osaltaan optisten mittareiden tulosten vääristymiseen. Mielenkiinoista on

huomata, että molemmat optiset mittarit käyttäytyvät samoin kalanteroinnin lisääntyessä. Tulokset on normalisoitu vertailun helpottamiseksi, offsetit valituilla levyillä olivat: laser= 4 μm , konfokaali= - 5 μm eli laser näyttää tuloksen ohuemmaksi kuin laboratorio, kun taas konfokaali näyttää paperin liian paksuksi.



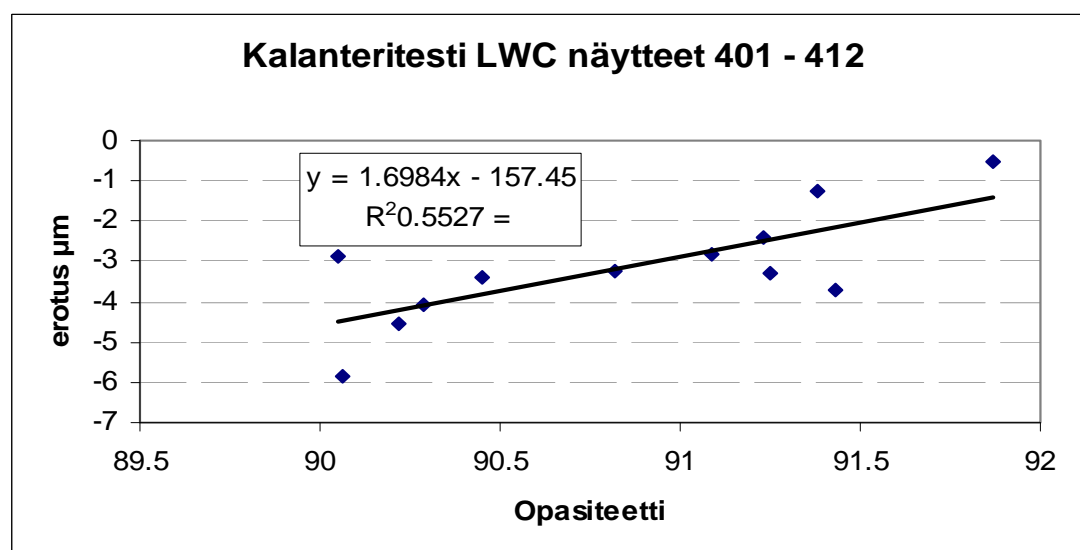
Kuvio 21: LWC-kalantertestin arkkien paksuudet laboratorioissa, laserilla ja konfokaalilla mitattuna. Vertailun helpottamiseksi tulokset korjattu näyttämään samaa paksuimmalla lajilla.

Kuviosta 22 nähdään laserin ja konfokaalin erot laboratorioarvoihin nähden. Erot vaihtelevat laserilla 0 – 6 μm ja konfokaalilla 1 – 6 μm välillä. Molemmat näyttävät siis hieman väärin tulokset, mutta mielenkiintoista on huomata, että käyrät ovat molemmilla menetelmillä melkein samanlaisia. Molemmat menetelmät näyttävät paperin ohuempana kuin se on mentäessä kohti näytettä 401, johon suuntaan myös kalanteroinnin määrä kasvaa. Kalanteroinnin kasvaessa paperin ominaisuudet muuttuvat ja tämä lisää haasteita optisia mittareita käytettäessä. Mittausten perusteella optisten menetelmien välille ei kuitenkaan löydetty eroa.



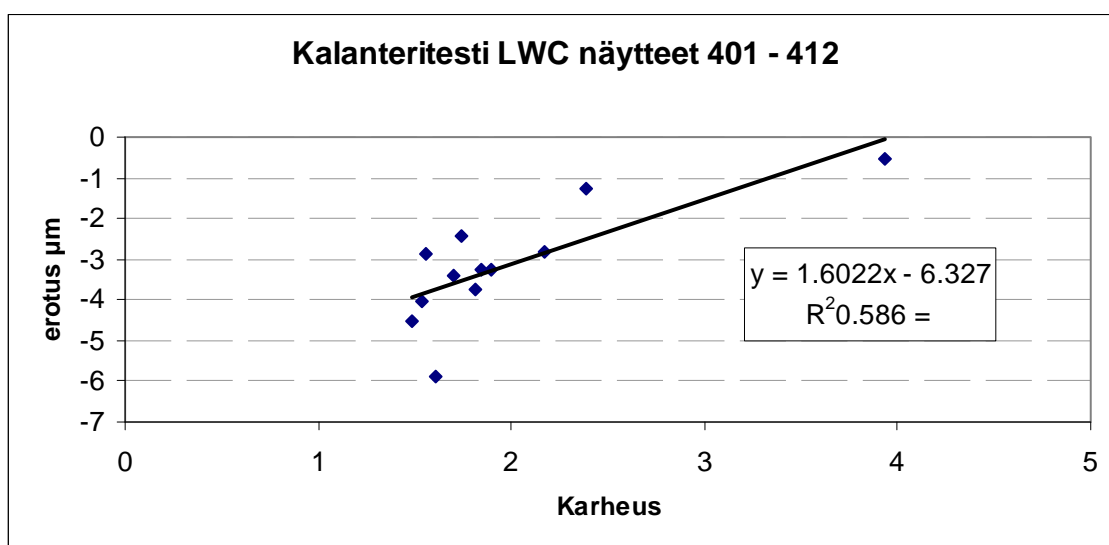
Kuvio 22: Laserin ja konfokaalin erot laboratorioarvoihin nähden.

Kuviossa 23 on esitettynä opasiteetin laboratorio ja lasermittauksen erotuksen suhteen. Kuvioista näkee että opasiteetin ja erotuksen välillä on pieni yhteneväisyys. Opasiteetin huonontuessa laser näyttää paperin ohuempana kuin se oikeasti on. Opasiteetin muutos on kuitenkin melko vähäinen, vain kaksi yksikköä, ja näytepisteiden määrä on melko vähäinen, jotta pystyisi tekemään täysin pitäviä päätelmiä. Hienoinen trendi opasiteetin vaikutuksesta on kuitenkin nähtävissä, kuitenkin tuloksia ei pysty selittämään pelkästään opasiteetin avulla, vaan muutkin ominaisuudet on otettava huomioon.



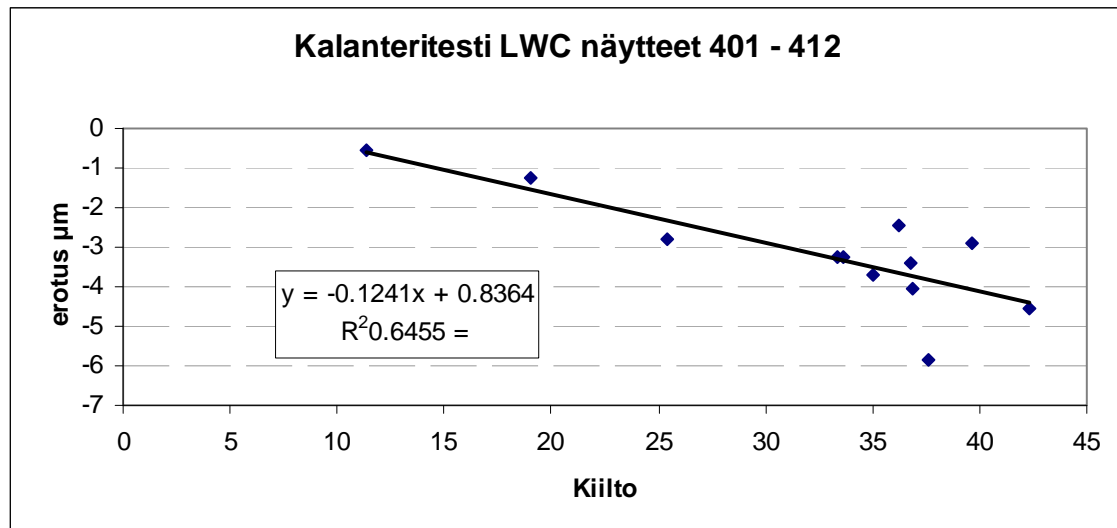
Kuvio 23: LWC kalanteritestin näytteiden opasiteetti laboratorio ja laser paksuuksien erotuksen suhteen.

Karheus muuttuu merkittävästi kalanteroinnin aikana, kuten kuviosta 24 nähdään, karheus on ensin 4 luokka ja se pienenee siitä 1.5:n paikkeille kalanteroinnin tehostuessa. Kuviosta huomaa, että sileyden ollessa 1.5 – 2 mikrometriä on laserin ero laboratorio arvoihin vähäistä ollen noin 1 µm:n luokkaa. Kuviosta näkee että karheuden ja erotuksen välillä on havaittavissa hienoinen trendi. Paperin karheuden kasvaessa laser näyttää paperin paksumpana mitä se oikeasti on, mutta tätä ilmiötä ei voi kuitenkaan selittää pelkästään karheuden avulla.



Kuvio 24: LWC kalantertestin näytteiden karheus laboratorio ja laser paksuuskien erotuksen suhteen.

Testissä tutkittiin myös mahdollista kiillon vaikutusta tulokseen. Kuviosta 25 on havaittavissa pieni trendi kiillon ja erotuksen välillä. Kiillon kasvaessa laserin ero laboratorioarvoihin pienenee ollen 1 µm:n luokkaa nollan molemmin puolin. Mittauksessa on kuitenkin muutama piste aivan alussa, jotka aiheuttavat tämän trendin ja kiillon ollessa 35 – 40 ei varsinaista trendiä ole nähtävissä.



Kuvio 25: LWC kalanteritestin näytteiden kiilto laboratorio ja laser paksuuksien erotuksen suhteen.

Mittaustuloksia ei voi selittää pelkästään yhden ominaisuuden avulla, vaan jokaisen ominaisuuden vaikutusta on mietittävä erikseen ja näillä jokaisella on oma vaikutuksensa laserin näyttämään tulokseen. Tässä testissä konfokaali ja laserimetelmä näyttivät mittaavan paperin samanlaisena.

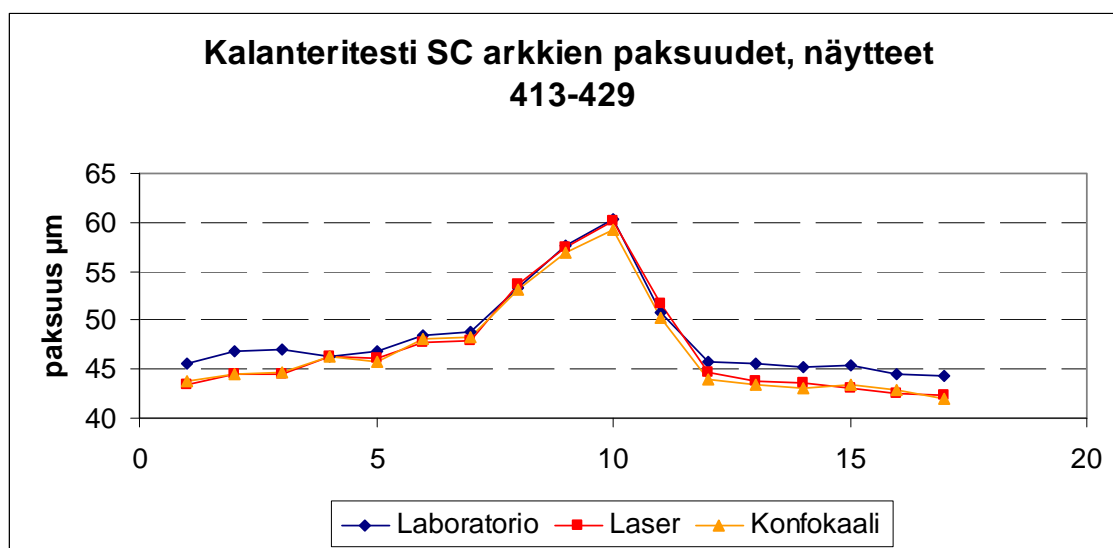
6.6.2 Kalanteri SC

SC-paperin kalanteritesti tehtiin Metson pilottikalanterilla. Näytearkeiksi valittiin 17 kappaletta täysin identtistä SC-paperiarkkia ja näitä arkkeja kalanteroitiin eri asetuksilla eri määrät. Kalanterin nopeutta ja puristuspainetta vaihdeltiin, siten että keskimmäisiä näytteitä on kalanteroitu vähiten ja alku- ja loppupään arkkeja eniten. Kalanteroinnin tarkat asetukset näkyvät liitteessä 1.

Näytearkkien paksuudet mitattiin laboratoriossa sekä laserilla että konfokaalimenetelmällä. Kuvioon 26 on merkattu jokaisen paksuus mittausten tulokset. Tuloksia ei ole normalisoitu.

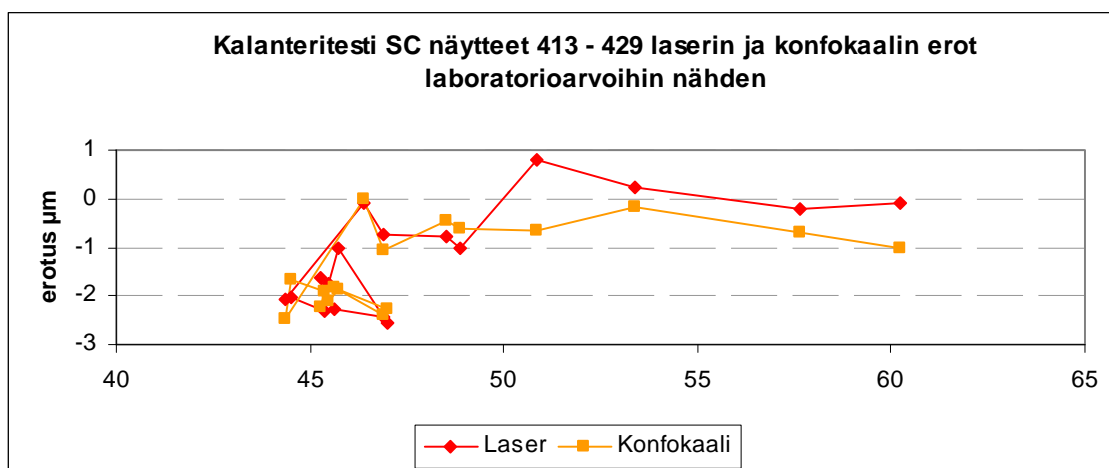
Tuloksista huomaa, että keskimmäiset näytteet joita ei ole kalanteroitu paljoa ovat selvästi paksumpia kuin paljon kalanteroidut alku- ja loppupään näytteet. Molempien optisten menetelmien erotukset laboratorioarvoihin ovat pienimmillään kalanteroinnin ollessa vähäistä. Laboratoriopaksuuden laskiessa alle 50 µm:n alkavat molemmat optiset mittarit näyttää arkit ohuempina mitä ovat. Suurimmat erot ovat

laboratoriopaksuuden ollessa $45\mu\text{m}$:n luokkaa, jolloin molemmat optiset mittarit näyttävät arkit noin $3\mu\text{m}$ liian ohuina. Kuviosta näkee, että optisten mittareiden tulokset ovat lähes identtisiä. Molempien tulokset huononevat kalanteroinnin kasvaessa. Laser menetelmä näyttää olevan lähempänä laboratorioarvoa kalanteroinnin ollessa vähäisintä kohdassa 10. Myös SC-paperin kohdalla kalanterointi muuttaa paperin ominaisuuksia, kuten opasiteettia ja karheutta, jotka vaikuttavat optisten mittareiden näyttämiin tuloksiin. Kuvion 26 perusteella laser- ja konfokaalimenetelmien välille ei saatu eroa.



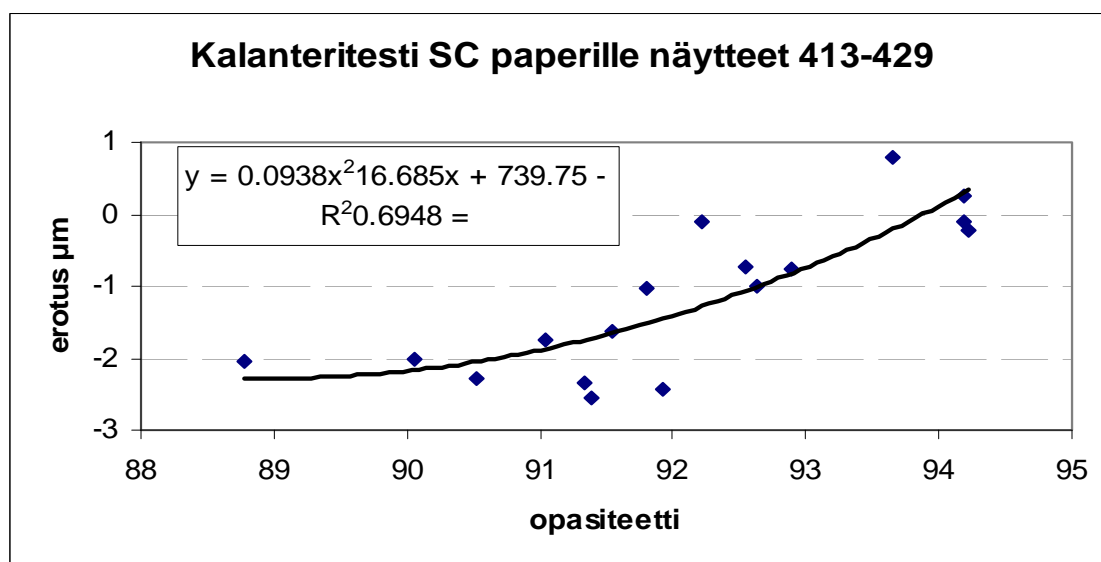
Kuvio 26: SC-kalanteritestin arkkien paksuudet laboratoriossa, laserilla ja konfokaalilla mitattuna.

Kuviosta 27 nähdään optisten paksuusmittausten erotukset laboratorioarvoihin nähden. Paperin ollessa ohuempillaan, jolloin myös kalanterointi on voimakkainta, molempien optisten mittareiden erot ovat $2\mu\text{m}$:n luokkaa. Kalanteroinnin vähentyessä optisten mittareiden erot laboratorioarvoihin pienenevät $0-1\mu\text{m}$:iin. Kuvion perusteella voi todeta, että kalanteroinnin lisääminen lisää molempien optisten mittarien eroa laboratorioarvoihin nähden. Kalanteroinnin lisääntyessä mittarit alkavat näyttää paperia ohuempaa mitä se oikeasti on.



Kuvio 27: SC-kalanteritestin optisten mittausten menetelmien erotukset laboratorioarvoihin nähden.

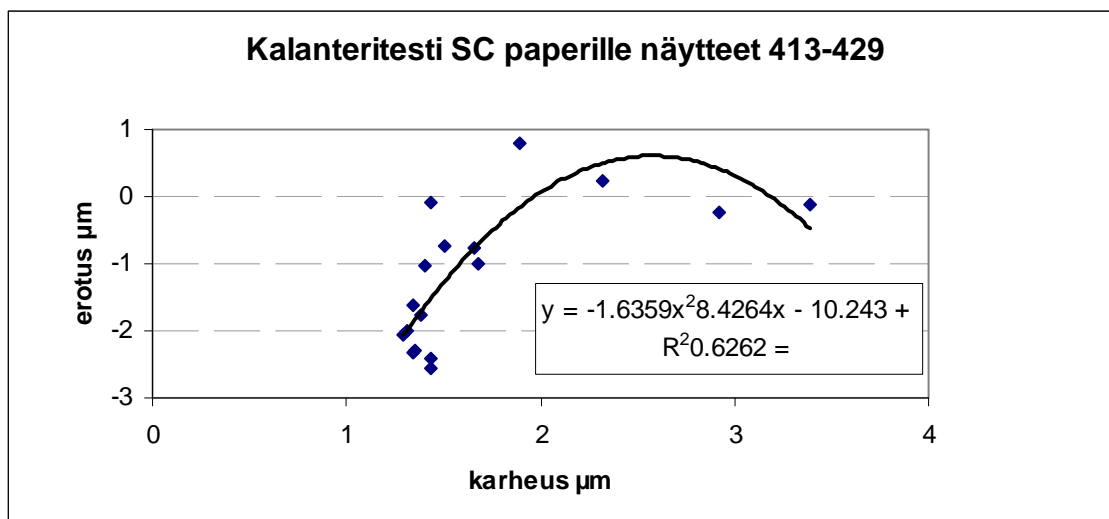
Kuvioon 28 on merkitty SC kalanteritestin arkkiopasiteetit laboratorioerotuksen suhteen. Kalanterointi heikentää paperin opasiteettia ja SC paperille tämä muutos on yli 5 µm. Opasiteetin ja erotuksen suhteen voidaan havaita hienoinen yhteys. Opasiteetin huonontuessa, laser näyttää paperia yhä ohuempana mitä se oikeasti on. Opasiteetin ollessa parhaimmillaan yli 94, eroa laboratorioarvoon pysyy mittaustarkkuuden $\pm 1 \mu\text{m}$ sisällä. Opasiteetin laskiessa alle 90:n kasvaa erotus 2.5 µm:iin.



Kuvio 28: SC kalanteritestin näytteiden opasiteetti laboratorio- ja laser paksuuskien erotuksen suhteen

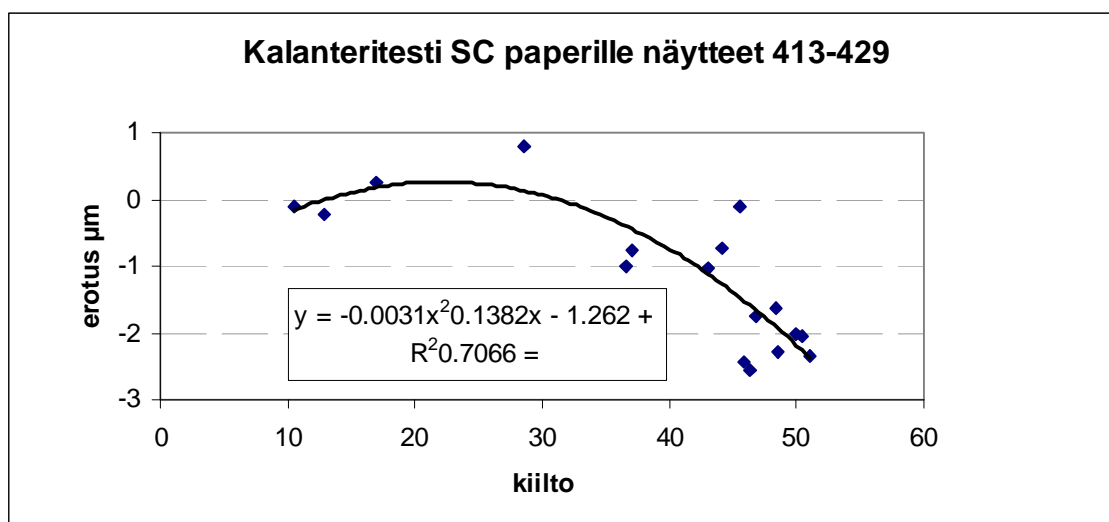
Kuviossa 29 on esitettyä SC kalanteritestin näytteiden karheudet laboratorio- ja laserpaksuusmittauksen erotuksena. Karheuden ollessa vähäistä 1-1.5 µm, erotus

vaihtelee 0 ja 2.5 μm :n välillä, eikä suoraa yhteyttä ole havaittavissa. Karheuden lisääntyessä laser näyttää paperia paksumpana mitä se on. Tämä voi johtua osaltaan siitä, että laser mittari seurailee paperin karheaa pintaa tarkemmin kuin laboratoriomittari, joka painaa paperin pintaa hieman mitatessaan paksuuden isomman alueen keskiarvona.



Kuvio 29: SC kalanteritestin näytteiden karheus laboratorio ja laser paksuuskien erotuksen suhteen

Kuviosta 30 nähdään kuinka laboratorio- ja lasermittauksen erotus käyttäytyy kiillon suhteen. Kiillon ollessa suurimmillaan laser näyttää paperin ohuempana mitä se oikeasti on ja näin ollen laserin erotus laboratorioarvoon kasvaa. Kiillon muuttuessa, muuttuu myös valon heijastuminen paperin pinnasta ja tämä voi osaltaan vaikuttaa laserin näyttämään tulokseen.



Kuvio 30: SC kalanteritestin näytteiden kiilto laboratorio ja laser paksuuksien erotuksen suhteen

Myöskään SC kalanterimittauksen tuloksia ei voi selittää yhden ominaisuuden avulla, vaan jokaisen ominaisuuden vaikutus lopputulokseen tulee miettiä erikseen.

Kalanteroinnin avulla saadaan aikaan suuria muutoksia paperin rakenteeseen ja ominaisuuksiin ja tulosten perusteella näillä on myös vaikutus optiseen paperin paksuuden mittaamiseen. Mittausten perusteella laserkolmio- ja konfokaalimittausmenetelmän välille on vaikea saada eroa ja mittareiden erot menevät enemmänkin mittaustarkkuuden kuin minkään muun piikkiin.

6.6.3 Kalanteri News

News kalanteritestin näytteet kalanteroitiin TAMK:n laboratoriokalanterilla.

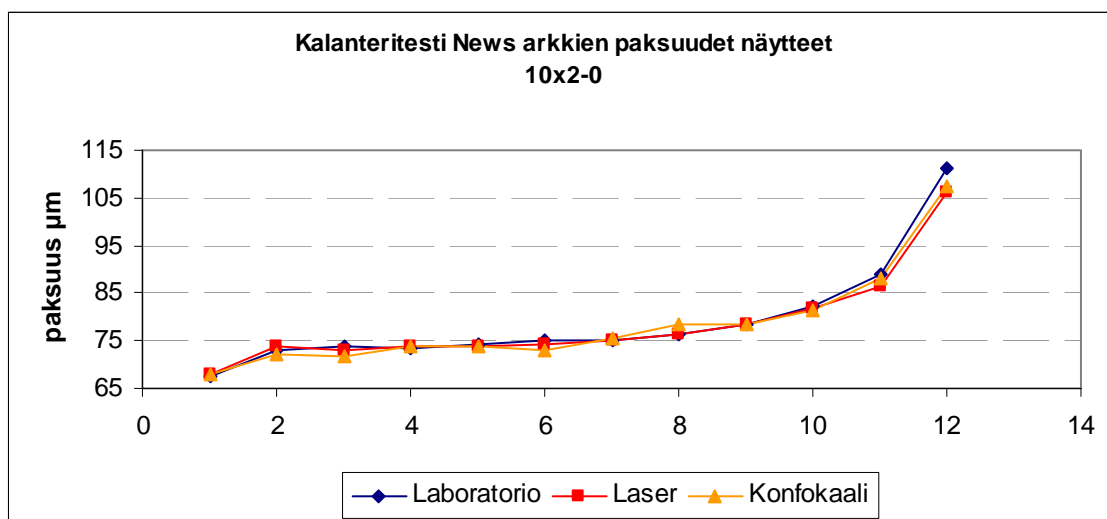
Näytearkeiksi valittiin 12 täysin identtistä arkkiä ja niitä kalanteroitiin eri määrät.

Kalanterin puristusaine ja nopeus pidettiin koko ajan vakiona ja kalanteroinnin voimakkuus määräytyi sen mukaan kuinka monta kertaa arkki meni kalanterin läpi.

Ensimmäistä näytettä ei kalanteroitu ollenkaan ja seuraavaa kerran ja toista kaksi kertaa ja niin edeten aina kymmeneen asti. Viimeisenä yhtä arkkiä kalanteroitiin molemmilta puolilta kymmenen kertaa.

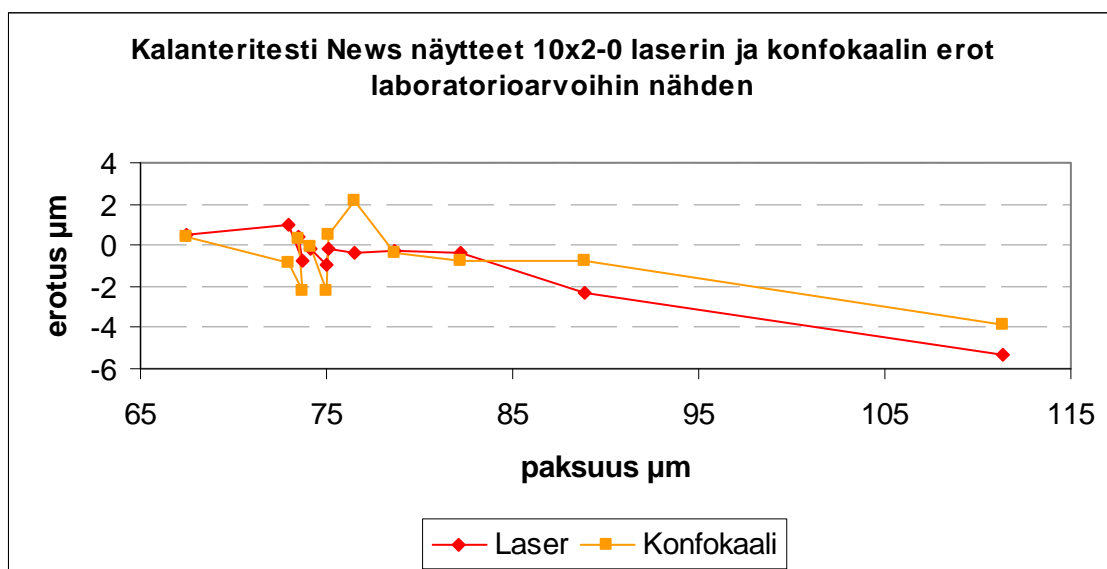
Kuvioon 31 on merkattu News kalanteritestin näytearkeiden paksuudet eri menetelmin mitattuna. Niin laserkolmio- kuin konfokaalimenetelmänkin seurailevat laboratorio arvoja hyvin lukuun ottamatta viimeistä pistettä, jossa molemmat menetelmät näyttävät

paperin ohuempana mitä se oikeasti on. Jo yksi kalanterointi kerta tiivistää paperia huomattavasti ja ero kalanteroimattoman ja kerran kalanteroidun paperin paksuuden välillä on yli 20 μm . Tämä ero ja muutokset muissa ominaisuuksissa voivat vaikuttaa siihen, että optiset mittarit näyttävät paperin niin paljon ohuempana verrattuna muihin pisteisiin. Tulokset on normalisoitu vertailun helpottamiseksi, offsetit valituilla levyillä olivat: laser= 15 μm , konfokaali= - 6 μm .



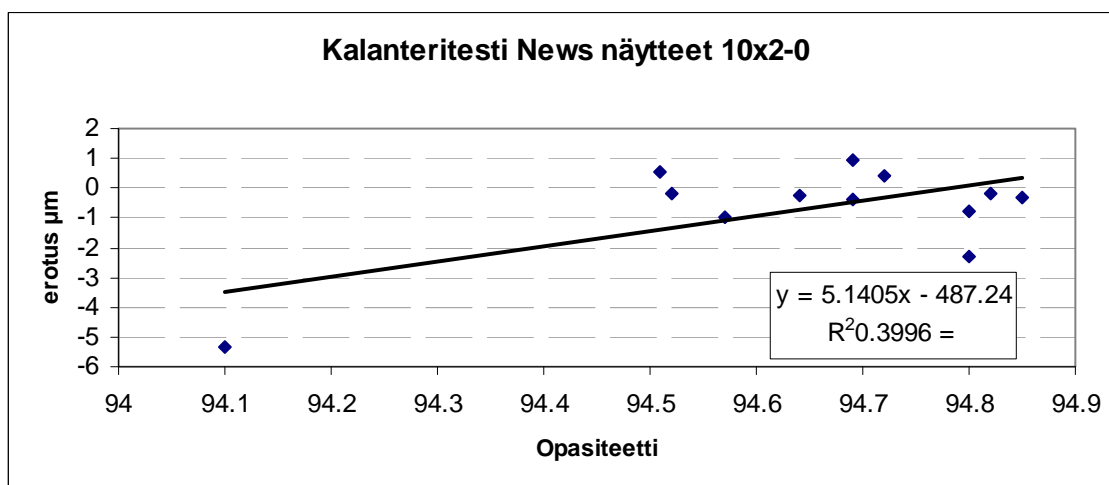
Kuvio 31: News-kalanteritestin arkkien paksuudet laboratoriossa, laserilla ja konfokaalilla mitattuna. Tulokset korjattu vertailun helpottamiseksi.

Kuviossa 32 on esitettyä News kalanteritestin optisten mittareiden erotuksen laboratorioarvoihin nähden. Erotus on pienimmillään paperin ollessa voimakkaimmin kalanteroitua. Kalanterointi on muuttanut paperin ominaisuuksia suotuisammaksi optisille mittareille. Paperin ollessa vähiten kalanteroitua konfokaalimittari näyttää paperin hiukan lähemmäksi oikeaa kuin lasermittari, mutta ero on kuitenkin niin pieni, että se voidaan laskea mittaustarkkuudesta johtuvaksi.



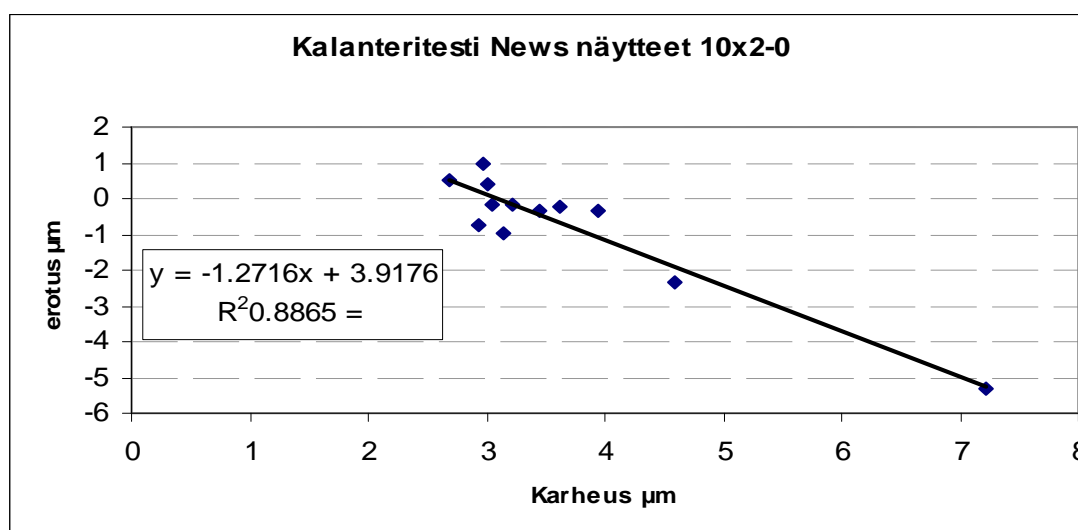
Kuvio 32: News-kalanteritestin optisten mittausten menetelmien erotukset laboratorioarvoihin nähden.

Kuviossa 33 on esitetty News kalanteritestin näytteiden opasiteettien suhde laboratorio- ja lasermittauksen erotukseen nähden. Opasiteetti ei muutu edes yhden yksikön verran kalanteroinnin aikana, joten näitä tuloksia ei voida pitää kovin luotettavina. Kuvion perusteella nähdään, että opasiteetin ja erotuksen välillä ei juuri ole yhteyttä näkyvillä. TAMK:n kalanterilla ei saada aikaiseksi tarpeeksi suuria voimia, jotta paperin opasiteetti muuttuisi kalanteroinnin aikana.



Kuvio 33: News kalanteritestin näytteiden opasiteetti laboratorio ja laser paksuuksien erotuksen suhteen

Jos opasiteetin muutosta ei saada aikaan TAMK:n kalanterilla, niin karheuden muutos on puolestaan hyvin esillä. Kuviossa 34 on News kalanteritestin arkkien karheudet laboratorio- ja lasermittauksen erotuksen suhteen esitettynä. Karheuden muutos on suuri kalanteroimattoman ja kalanteroitujen arkkien välillä. Kalanteroimattoman arkin karheus on suurin, yli $7\mu\text{m}$. Jo yksi kalanterointi kerta riittää pudottamaan arkin karheuden melkein puoleen alkuperäisestä. Tämän jälkeen muutos on pienimuotoisempaa karheuden ollessa välillä $3\text{--}4\mu\text{m}$ muilla arkeilla. Laboratorio- ja lasermittauksen erotus on suurimmillaan, $5\mu\text{m}$, paperin ollessa karheammillaan. Erotus pienenee paperin muuttuessa sileämmäksi ja sileyden ollessa $3\text{--}4\mu\text{m}$:n luokkaa erotus pysyy välillä $\pm 1\mu\text{m}$. Karheuden ja erotuksen välillä näyttäisi olevan vahva yhteys, korrelaatiokertoimen R^2 ollessa $0,885$.

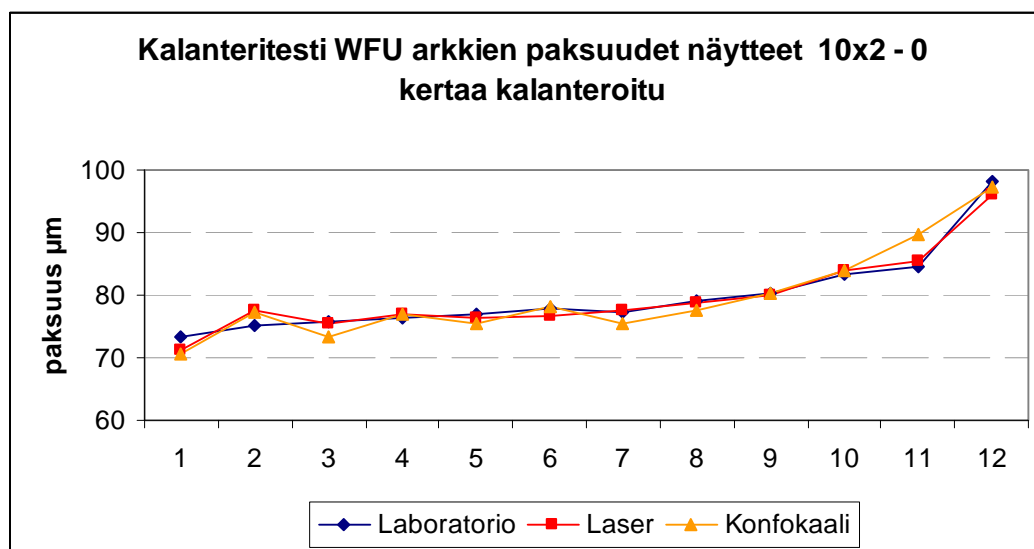


Kuvio 34 News kalanteritestin näytteiden karheus laboratorio ja laser paksuuksien erotuksen suhteen.

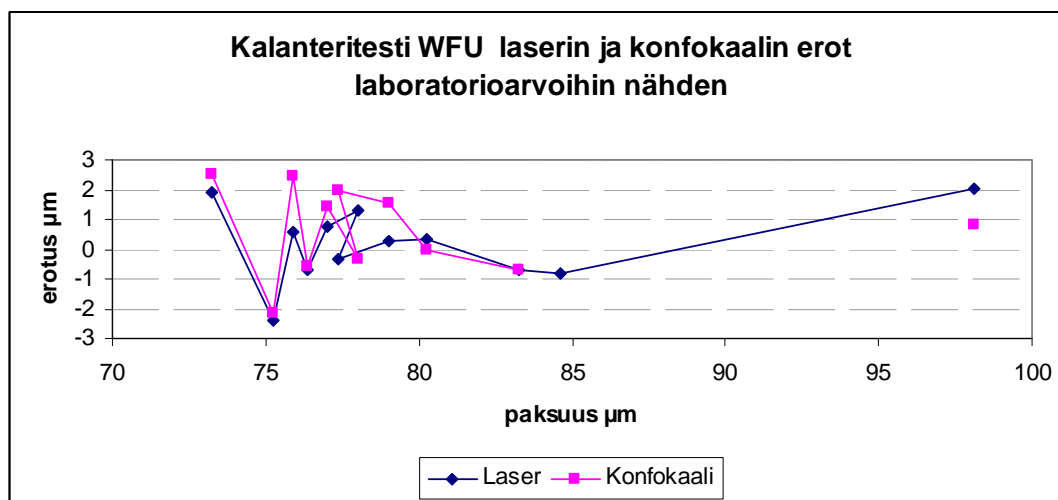
News kalanteritestissä saatiin hyvin esille karheuden vaikutus mittaustulokseen, koska opasiteetin muutos oli niin pientä, ettei se vaikuta tuloksiin juuri lainkaan. Tulosten perusteella näyttäisi, että mitä karheampaa paperi on sitä ohuempana optiset mittarit sen näyttävät. Optisten mittareiden välillä ei näyttäisi tulosten perusteella olevan juurikaan eroa. Optiset mittarit seurailevat paperin pintaa tarkasti ja jos se on kovin karheaa, paperin keskimääräisen paksuuden ilmaiseminen on hankalaa. Jo vähäinen kalanterointi tasoittaa paperin pintaa huomattavasti, toisin sanoen vähentää pinnan vaihtelua, ja tämä edesauttaa optisia mittareita mittaamaan paperin paksuuden paremmin.

6.6.4 Kalanteritesti WFU

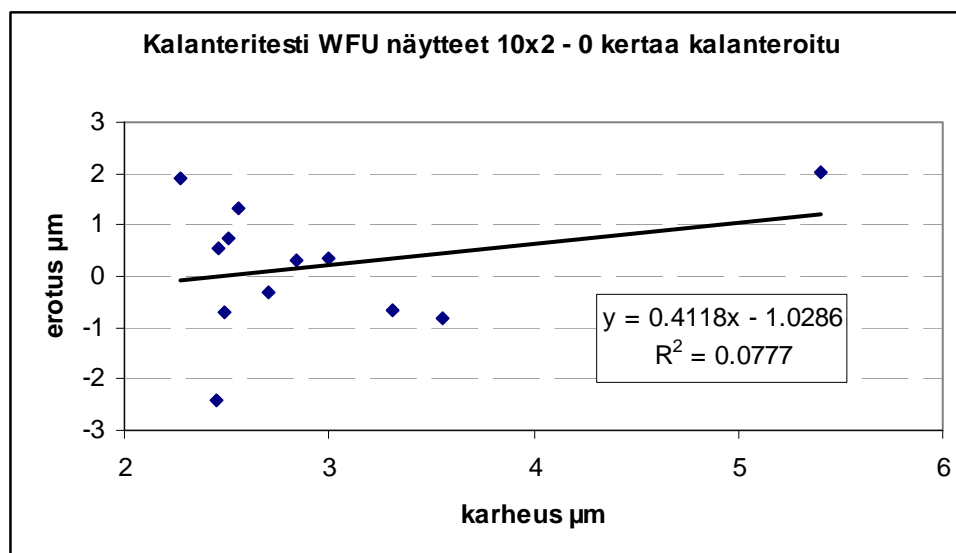
Kalanteritesti WFU tehtiin TAMK:n kalanterilla ja näin ollen siinä ei saatu aikaan opasiteetin muutoksia. Kuvioista 35 nähdään, kuinka optiset mittarit seurailevat laboratorio mittauksen tuloksia. Pientä hajontaa havaitaan molemmilla optisilla mittareilla. Konfokaalin hajonta näyttäisi kuvion 36 perusteella olevan suurempaa kuin laserilla. Karheuden ja laboratorio- ja lasermittauksen erotuksen välillä ei ole havaittavissa minkäänlaista yhteyttä, kuten kuvioista 37 nähdään. Tulokset on normalisoitu vertailun helpottamiseksi, offsetit valituilla levyillä olivat: laser= 17 μm , konfokaali= 0 μm



Kuvio 35: WFU kalanteritestin arkkien paksuudet laboratoriossa, laserilla ja konfokaalilla mitattuna. Tulokset korjattu vertailun helpottamiseksi.



Kuvio 36: WFU kalanteritestin optisten mittausten erotukset laboratorioarvoihin nähden.



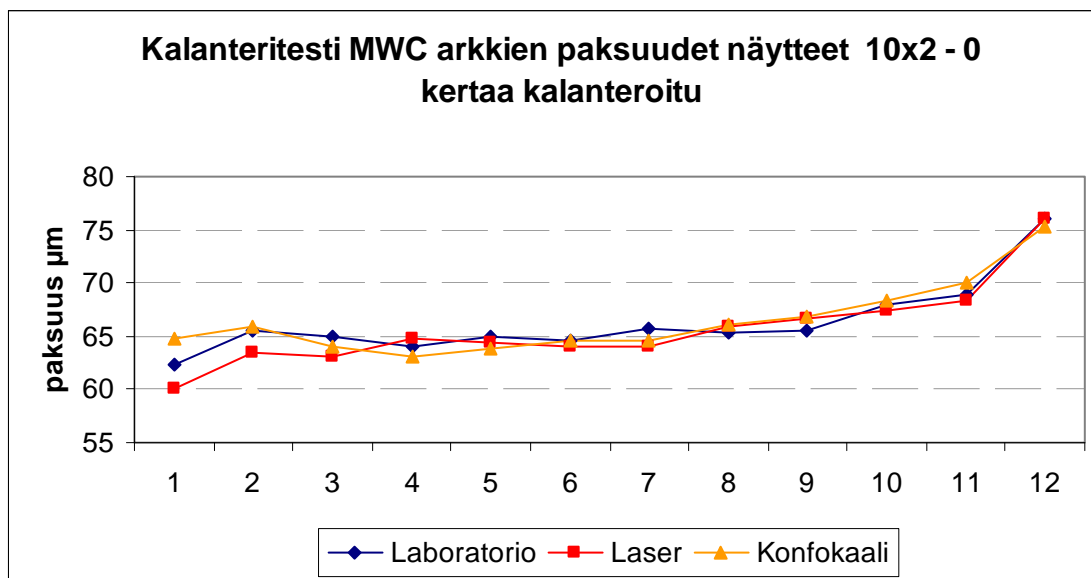
Kuvio 37 WFU kalanteritestin näytteiden karheus laboratorio ja laser paksuuksien erotuksen suhteen.

6.6.5 Kalanteritesti MWC

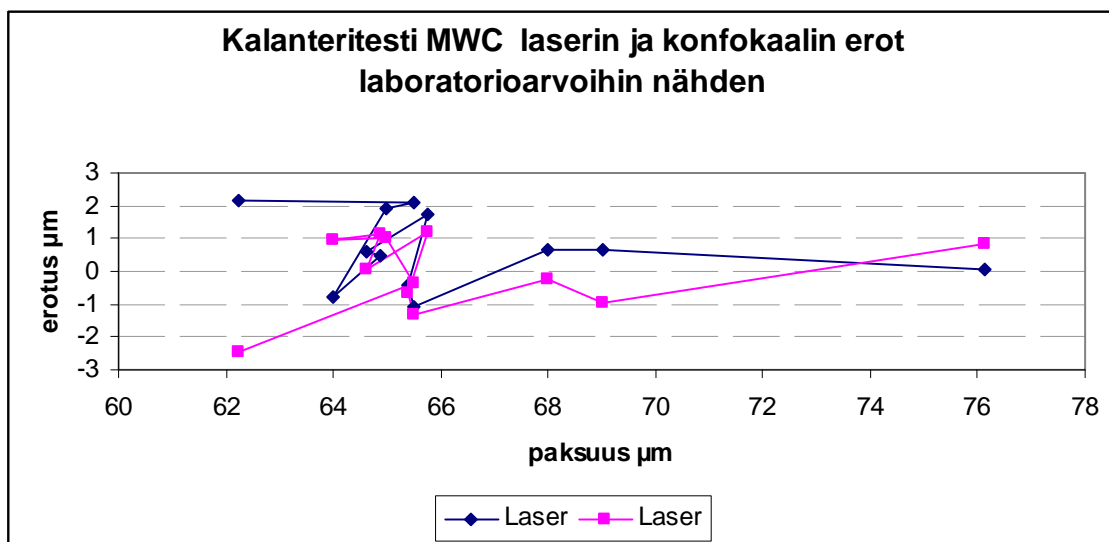
MWC kalanteritesti tehtiin TAMK:n kalanterille, joten toivottua opasiteetin vaikutusta ei saatu esiin. Kuvio 38 nähdään, että optiset mittarit seuraavat hyvin laboratorioarvoja lukuun ottamatta muutamaa eniten kalanteroitua arkkia.

Kalanteroinnin ollessa suurinta laser näyttää paperin liian ohuena ja konfokaali liian paksuna, kuten kuvion 39 erotuskäyristä nähdään. Karheuden ja laboratorio- ja

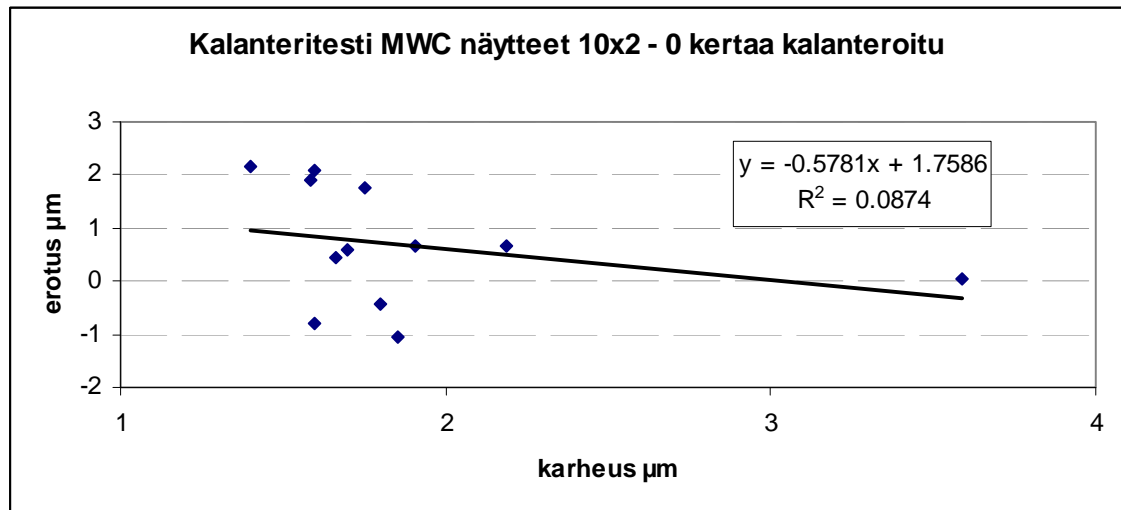
lasermittauksen erotuksen välillä ei ole havaittavissa minkäänlaista yhteyttä, kuten kuviosta 40 nähdään. Tulokset on normalisoitu vertailun helpottamiseksi, offsetit valituilla levyillä olivat: laser= 1 μm , konfokaali= -1 μm



Kuvio 38: MWC kalanteritestin arkkien paksuudet laboratoriossa, laserilla ja konfokaalilla mitattuna. Tulokset korjattu vertailun helpottamiseksi.



Kuvio 39: MWC kalanteritestin optisten mittausmenetelmien erotukset laboratoriomittauksiin nähden.



Kuvio 40 MWC kalanteritestin näytteiden karheus laboratorio ja laser paksuuksien erotuksen suhteen.

7 Virhearviointi

Tämän työn suurimmat virhelähteet olivat optisten mittausten tekeminen ja niiden tulosten muokkaus. Optiset mittarit on suunniteltu käytettäväksi on-line mittaraameissa, eikä niistä ole olemassa virallisia laboratoriosovelluksia. Mittari on suunniteltu mittaamaan nopeasti liikkuvaa paperirataa, eikä tätä ole mahdollista simuloida käytettävissä olevissa laboratoriotiloissa ja tämä aiheuttaa ongelmansa muun muassa paperin syöttämisessä mittariin ja sen liikuttelussa siinä käsin. Laboratoriosovelluksen mittaustarkkuutta ei saada yhtä hyväksi kuin on-line mittarin ja tämä pitää ottaa myös huomioon tuloksia tarkkaillessa.

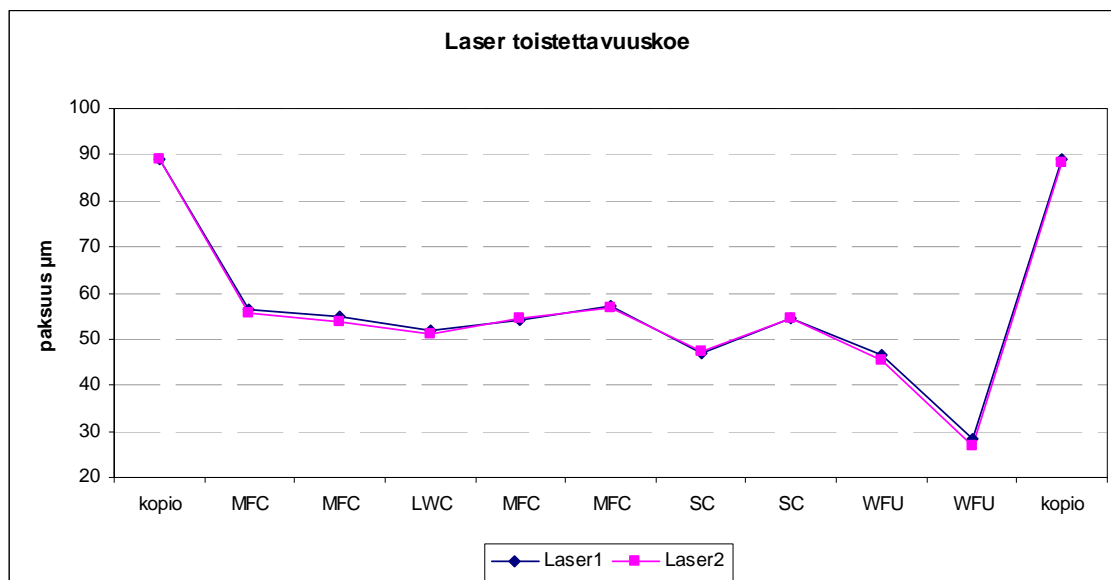
Tämän työn kaikki mittaukset suoritettiin käsin ja tämä jo itsessään luo mahdollisuuden inhimillisiin virheisiin. Optisia mittauksia tehdessä piti koko ajan tarkkailla, että jokainen mitattava näyte tulisi mitattua samalla tavalla joka kerta. Optinen mittari kerää tuhansia pisteitä dataa jokaisella mittauskerralla ja tämän datan muokkaamisessa täytyi joka kerta miettiä erikseen, että mitkä pisteet ovat validia dataa ja mitkä eivät, koska arkin vaihdon yhteydessä mittarin välissä ei ollut mitään ja mittari näytti tällöin nollaa.

Koska laserkolmiomittausmenetelmässä laseranturin on vain yhdellä puolen paperin pintaa, jää paperin toinen pinta täysin huomiotta. Paperin alapinta imetään levyä vasten ja tämä pitää paperin pinnan tasaisena mittauksen ajan. Imeekö se paperia niin suurella voimalla että paperin pinta puristuu kasaan ja saa näin ollen laserin näyttämään paperin ohuempaan mitä se on? On mahdotonta tietää, kuinka tämä imu vaikuttaa paperin pintaan eri lajeilla, koska sitä ei pystynyt tutkimaan sen tarkemmin saatavilla olleilla laitteistoilla. Tämä paperin alapinnan puristuminen voi olla yksi selitys miksi News kalanteritestissä paperin karheus vaikuttaa niin paljon erotukseen.

Näytearkkien täyteaineista ja päällysteistä olisi myös ollut hyvä saada enemmän selville, koska erilaiset ja erimuotoiset partikkelit heijastavat valoa eri lailla. Tässä työssä ei pystytty selvittämään täyteaineiden koostumuksia tarkemmin saatavilla olevilla laitteilla ja paperit olivat ympäri maailmaa, niin niistä löytyi hyvin vähän tietoa muutenkaan.

Paksuuden optisen mittaamisen toistettavuus on hyvä, kuten kuviosta 36 näkee.

Toistokokeessa on eri paperilajiarkit mitattu peräkkäin kaksi kertaa. Tuloksista näkee, että vaihtelu on hyvin pientä ollen suurimmillaan vain 1 μ m, mikä jää mittaustarkkuuden sisään.



Kuvio 36: Laserkolmiomittauksen toistettavuuskoe eri paperilajeilla

Kaiken kaikkiaan mittaukset onnistuttiin tekemään hyvin ja luotettavasti. Jokainen mittaus tehtiin rauhassa ja ajatuksen kanssa ja näin ollen inhimillisen virheen osuus saatiin minimoitua. Suurinta päänvaivaa tuotti paksuuden lasermittauksen nollakohdan vaeltaminen, mutta siitäkin selvittiin, kun muisti ottaa sen jokaisella mittauksella erikseen huomioon.

8 Yhteenveto

Laserkolmiomittaus on luotettava ja toimiva ratkaisu paperin paksuuden mittaamiseen paperilajista riippumatta. Jokaisen paperilajin kohdalla tarvitaan kuitenkin oma lajikohtainen korjauskertoimensa eli offset. Pienin offset tarvitaan päällystetyillä ja sileillä papereilla. Suurin korjauskerroin tarvitaan päällystämättömillä puuvapailla lajeilla (taulukko 2). Offset arvot tulee määrittää erikseen jokaiselle paperille, koska myös paperilajin sisäinen offsetin vaihtelu on suuri.

Taulukko 2: Paperilajikohtaiset offsetit

	OFFSET μm
WFC	0 - 5
LWC	0 - 3
MFC	0 - 3
SC	0 - 4
News	3 - 15
WFU	6 - 20

Tulosten tulkinta on vaikeaa, koska monet paperin ominaisuudet muuttuvat samanaikaisesti eikä niitä pystytä selvästi erottamaan toisistaan. Ominaisuudet kuten opasiteetti, karheus ja kiilto vaikuttavat jokainen mittaustulokseen, mutta yksinään niillä ei voi selittää tuloksia. Paperin ominaisuuksien vaikutukset näkyvät vasta kun mennään pois normaalilta ja yleisesti käytetyltä alueelta. Opasiteetin pudotessa alle 85 ja karheuden noustessa yli 4 μm :n voidaan havaita yhtenäisyyttä näiden ominaisuuksien ja optisen ja laboratoriopaksuus mittausten erotuksen välillä. Normaaleilla paino- ja kirjoituspapereilla opasiteetti pyritään kuitenkin pitämään yli 85, jotta läpipainatus ei olisi liian suurta. Paino- ja kirjoituspapereiden karheus pyritään myös pitämään pienenä 1 - 3 μm , jotta painojäljestä tulisi hyvä. Normaaleilla paperilajeilla paperin ominaisuuksilla ei ole suurta vaikutusta optiseen mittaustulokseen. Karheuden vaikutus näkyi selviten sanomalehtipaperilla, mutta vastaavilla karheilla puuvapailla päällystämättömillä lajeilla ei vaikutus noussut esiin niin selvästi. Tämä johtuu varmaankin osaksi sillä, että puuvapaat paperit olivat todennäköisesti pintaliimattuja pigmentoitu sen verran, että pahimmat pinnan epätasaisuudet olivat tasoittuneet.

Laser tunkeutumaa paperiin tutkittiin vertaamalla tuloksia konfokaalimenetelmän tuloksiin, koska konfokaalimenetelmällä ei pitäisi esiintyä ollenkaan tunkeutumaa. Eroja ei kuitenkaan havaittu muuten kuin mitattaessa puuvapaata päällystämätöntä

paperia jolloin tarvittavat korjauskertoimet olivat huomattavasti pienempiä kuin laserkolmiomenetelmällä mitattaessa.

Jatkossa voisi tutkia, vaikuttavatko erilaiset täyteainepartikkelit ja päällystyspastan koostumus tulokseen, koska erilaiset partikkelit heijastavat valoa eri tavalla.

Mittaustulosta voisi tutkia myös suuremmalla joukolla huonompilaatuisia papereita, joiden opasiteetti olisi alle 85 ja karheus suurempaa kuin 4 μm , jotta saataisiin ominaisuuksien yhteydet mittaustulokseen paremmin esille.

Lähteet

- C.T.J Dodson, Y. Oba & W.W. Sampson 2001. On the distributions of mass, thickness and density of paper. *Appita J.* 54(4), 385-389
- Graeffe, Jussi & Nuyan, Seyhan 2005. An online laser caliper measurement for the paper industry. *Optical Metrology*.
- Graeffe, Jussi & Lindeman, Markku 2007. Optisen paksuusmittarin viimeisimpiä tuloksia. *Paperi automaatio*.
- Häggbloom - Ahnger, Ulla & Komulainen, Pekka 2003. *Kemiallinen metsäteollisuus 2 Paperin ja kartongin valmistus 3. painos*. Opetushallitus, Gummerus Kirjapaino Oy Jyväskylä.
- Knowpap 10.0 (11/2008). Paperitekniikan ja automaation oppimisympäristö. VTT Tuotteet ja tuotanto. Tietokoneohjelma
- Micro epsilon Inc. [www-sivu]. [viitattu 19.08.2009] Saatavissa: <http://www.micro-epsilon.com/>
- Vaarasalo, Juhani 1998. Optiset mittaukset. AEL Prosessi- ja Laboratoriotekniikka Y0961/98.
- T. Yamauchi 1987. Measurement of paper thickness and density. *Appita J* 40(5), 359-366

Liitteet

Liite 1: Pilottikalanterin asetukset

	PILOT:		
	speed [m/min]	linear load [kN/m]	load angle [°]
LWC			
401	200	400	90
402	300	400	90
403	400	400	90
404	500	400	90
405	600	400	90
406	700	400	90
407	800	400	90
408	900	400	90
409	1000	400	90
410	1200	300	90
411	1200	200	90
412	1200	50	90
SC			
413	200	400	90
414	300	400	90
415	400	400	90
416	500	400	90
417	600	400	90
418	700	400	90
419	800	300	90
420	1000	300	90
421	1200	200	90
422	1200	100	90
423	1000	50	90
424	400	100	90
425	400	300	90
426	400	400	90
427	400	400	90
428	300	400	90
429	200	400	90