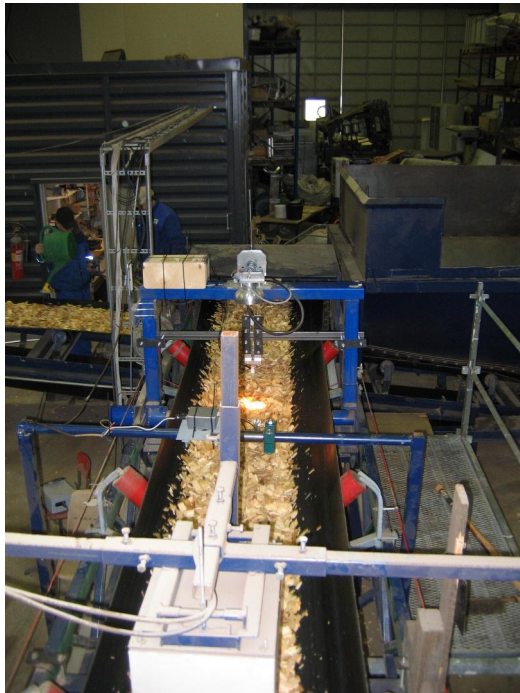




YHDISTELMÄMITTAUS HAKKEEN KOSTEUDEN ON-LINE – MÄÄRITYKSEEN

Kirjoittajat: Timo Järvinen, Sami Siikanen, Markku Tiitta ja Laura Tomppo

Luottamuksellisuus: julkinen

Raportin nimi Yhdistelmämittaus hakkeen kosteuden on-line –määrittelyksen loppuraportti		
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot Yritysryhmä, Seppo Lappalainen, Kouvo Automation, 040 0570557, seppo.lappalainen@kouvo.fi Tekes, Mauri Marjaniemi, 040 502 8384, mauri.marjaniemi@tekes.fi		Asiakkaan viite Yhteistyösopimus 30.8.2007, Tekes rah.päätös 40154/07
Projektin nimi Yhdistelmämittaus hakkeen kosteuden on-line –määrittelyksen		Projektin numero/lyhytnimi 19371/yhdistelmämittaus
Raportin laatija(t) Timo Järvinen, Sami Siikanen, Markku Tiitta, Laura Tomppo		Sivujen/liitesivujen lukumäärä 66/
Avainsanat kosteus, on-line mittaus, hake		Raportin numero VTT-R-08121-08
Tiivistelmä Puuperäisen biomassan, kuten sellu- ja metsähakkeen, energia- ja raaka-ainekäytössä prosessin ohjaukseen etukäteen saatu kosteustieto nostaa hyötysuhdetta ja käytettävyyttä. Lisäksi kosteustietoa voidaan käyttää koko hankinta- ja toimitusketjun ohjaukseen. Tässä hankkeessa on tutkittu lähi-infrapuna (nir) ja radiometrisen sekä impedanssimittauksen soveltuvuutta ja niiden yhdistämistä käytettävyyden ja tarkkuuden nostamiseksi. Tuloksien mukaan kaikilla em. menetelmillä saa hakkeen kosteuspitoisuuden melko hyvällä tarkkuudella, mutta jos edellytetään enintään ± 2 %-yksikön hajontaa vähintään 85 %:n todennäköisyydellä, niin mikään em. menetelmä ei yksinään riitä kaikissa Suomen oloissa. Siksi hankkeen tuloksena on esitetty vaihtoehdot tarkkuuden ja käytettävyyden nostoon menetelmien yhdistämisen kautta. Nir-mittauksella voitiin hyvin saada selluhakkeen kosteus ja selvittää tapahtuneet poikkeamat. Metsähakkeella tulos ei kuitenkaan ollut yhtä hyvä. Menetelmän osalta on todettava, että tutkimuksessa käytetyt laitteet, asennustapa ja koejärjestelyt (kostutus/kuivaus) eivät anna täysin oikeaa kuvaa nir-mittauksesta, vaikka käytettiin kehittyneitä laskentamenetelmiä. Kuitenkaan tarkkuuden osalta kehittyneempi laitteisto ei todennäköisesti tuo merkittävästi parempaa tulosta. Radiometrisen tiheysmittauksen kautta tapahtunut kosteuden mittaus antoi selluhakkeella varsin hyvän tuloksen. Tulos oli vielä käyttökelpoinen, vaikka kosteuden ennustamiseen käytettiin vuosia aikaisemmin tehtyjen mittauksien sovitteita. Myös metsähakkeella radiometrisen mittauksen todettiin korreloivan kosteuden kanssa. Mittaus on myös varsin olosuhdesietoinen. Käytetyillä laitteilla mittauksen ongelmana on kuitenkin detektointinopeus, jonka nostaminen laajentaisi käyttöaluetta. Impedanssimittaus oli em. menetelmän sovelluksena uusi. Hankkeeseen kehitettiin sondimallinen elektrodi, joka toimi myös metsähakkeella. Tarkkuutensa puolesta ao. menetelmä oli sulalla hakkeella samaa luokkaa kuin muut menetelmät: metsähakkeella jopa parempi, mutta jäätyneellä materiaalilla hajonta oli suurempaa. Elektrodi- ja laskentamallien kehittämisen kautta käytettävyyttä on mahdollista vielä nostaa. Menetelmiä yhdistämällä on mahdollista kompensoida kunkin ominaisuuksista johtuvia rajoitteita; ensivaiheessa tämä voidaan tehdä haketyypin tunnistamisen kautta, joka voi tapahtua mm. akustisen tai optisen mittauksen avulla.		
Luottamuksellisuus		julkinen
Jyväskylä 29.9.2008		
Laatija	Tarkastaja	Hyväksyjä
Timo Järvinen, erikoistutkija	Janne Kärki, tiimin vetäjä	Jouni Hämäläinen, tutkimuspäällikkö
VTT, Jyväskylä, PL 1603, 40101 Jyväskylä ja Espoo, PL 1000, 02044 VTT		
Jakelu Tilaajat ja VTT sekä Kuopion yliopisto fysiikanlaitos		
VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.		

Alkusanat

VTT:llä Jyväskylässä tehtiin yhteisrahoitteinen Tekesin ClimBus –teknologiaohjelmaan kuuluva tutkimushanke ”Yhdistelmämittaus hakkeen kosteuden on-line –määrittämiseksi” vuosina 2007 ja 2008.

Kosteusmittausta on tutkittu siksi, että kosteuspitoisuus on tärkeä etukäteistietona useimmissa erityyppisissä hakkeita käyttävissä prosesseissa. Työ on tehty myös sen vuoksi, että nyt uudet tekniikat ja teknologian kehittyminen mahdollistavat ongelman ratkaisun, joka on ollut biomassojen osalta haastavaa jo pitkään.

Infrapuna- ja radiometrisen mittausten menetelmän osalta tutkimuksen suorittaja on ollut VTT. Tutkimus on tehty yhteistyössä Oulun, Kuopion ja Jyväskylän toimipisteiden kanssa. Impe-danssimenetelmää hankkeessa on tutkinut ja kehittänyt Kuopion yliopiston fysiikanlaitos.

Hankkeessa on ollut mukana rahoittajana sekä laitetoimittajana seuraava yritysryhmä:

Alholmens Kraft Oy

BMH Technology Oy

Jyväskylän Energiantuotanto Oy

Kouvo Automation Oy

Metso Power Oy

Metsäteho Oy edustaen metsäteollisuutta

Raumaster Oy

Hankkeen johtoryhmän on muodostanut em. yritysten edustajat ja tutkijat. Johtoryhmän puheenjohtajana on toiminut Seppo Lappalainen Kouvo Automation`sta ja sihteerinä Timo Järvinen VTT:stä.

Yritysryhmää ja Tekesiä mielenkiintoisen ja haastavan hankkeen rahoittamisesta ja osallistumisesta kiittäen!

Jyväskylässä 29.9.2008

VTT:N JA KUOPION YLIOPISTON TUTKIMUSRYHMÄT

Sisällysluettelo

Alkusanat.....	2
1 Johdanto.....	4
2 Tavoitteet ja rajaukset	5
3 Laitteet, menetelmät ja mittaukset.....	5
4 Tulokset.....	9
4.1 Radiometriset mittaukset.....	9
4.1.1 Selluhakkeen mittaukset.....	9
4.2 Lähi-infrapuna (NIR) –mittaukset	17
4.2.1 Selluhakkeen mittaukset.....	17
4.3 Impedanssi- ja akustiset mittaukset	46
4.3.1 Hakkeiden linjamittaukset VTT:llä.....	46
4.3.2 Hakkeiden laboratoriomittaukset Kuopion yliopistolla	53
5 Tulosten tarkastelu	56
5.1 Radiometriset mittaukset.....	56
5.2 Lähi-infrapuna (nir) mittaukset	59
5.3 Impedanssi- ja akustiset mittaukset	60
6 Johtopäätökset	61
7 Mittausten yhdistäminen.....	62
8 Jatkoehdotukset	64
Lähdeviitteet	65

1 Johdanto

Ilmastonmuutokseen ja kestäväen kehityksen haasteeseen vastaaminen edellyttää teknologian kehittämistä. Mekaanisen ja rakennefysiikan sekä prosessitekniikan kautta voidaan toteuttaa hyvin monenlaisia ratkaisuja, kun tietoa käsiteltävästä substanssista on riittävästi. Tämä edellyttää yhä tarkempaa kohteen ominaisuuksien mittausta, johon nykyinen teknologia antaa lisää mahdollisuuksia. Mittauksen pitää tapahtua jatkuvatoimisena ja riittävän nopeana, jotta siitä on hyötyä ennakkotietona prosessin tai muunkin toiminnan ohjauksessa.

Puuperäisen biomassan, kuten metsähakkeen energiakäytössä ja muussa raaka-ainekäytössä, esim. nestemäisten biopolttoaineiden valmistuksessa, etukäteen prosessin ohjaukseen saatu kosteustieto nostaa hyötysuhdetta ja käytettävyyttä. Toisaalta hakkeen kosteustietoa tarvitaan useimpien puunjalostusprosessien säädössä. Tyypillisesti esimerkiksi kemiallisessa massanvalmistuksessa hakkeen kosteustiedon avulla saatua tietoa puun kuiva-ainemäärästä voidaan hyödyntää tarkempaan keittokemikaalien annostukseen, mekaanisen massanvalmistuksessa kosteustieto kertoo tarkemmin raaka-aineen laadusta prosessoinnin kannalta. Perusongelma näissä tapauksissa on sama: saada mahdollisimman tarkka ja nopea etukäteistieto hakkeen kosteuspitoisuudesta.

Biomassan kosteusmittaus on ollut pitkään esillä ja tutkittu asia, jossa on riittänyt haastetta. Kuitenkin periaatteessa tällöin pitää erottaa helpot ja tasalaatuiset biologisperäiset materiaalit, joita edustaa esim. vilja ja sahatavara, ja ”vaikeat” epähomogeeniset materiaalit, joista voi mainita metsähakkeen ja turpeen. Sellu- tai teollisuushake on ”vaikeusasteen” suhteen jotakin em. väliltä. Mittausmenetelmät ovat olleet 1980-luvulta lähtien melkein samat (mikro- tai radioaallot, ir, radiometria, nmr, sähköiset; esim. kapasitiivinen mittaus). Vertailumittauksena käytetään puun kosteuden standardin mukaista määritystä kuivaamalla kosteusnäyte lämpökaapissa vakiopainoon. Hitaudestaan huolimatta standardimenetelmä on sellaisenaan tai eri pikakosteusmittausmodifikaatioina edelleen käytössä teollisuudessa ja tutkimuksessakin kaikkialla maailmassa. Koska hakkeen kosteusmittaus on ollut haastavaa nykyteknologiallakin, niin erilaisia ”kiertoteitä” so. epäsuoria menetelmiä on myös käytetty (Järvinen, Malinen, Tiitta 2007).

Kemometrian kehittymisen myötä nir- menetelmää on yritetty uudelleen soveltaa kaikentyyppisten biomassojen kosteuden mittaukseen 2000-luvulla. Periaatteessa kyseessä on ollut monimuuttujaregressioanalyysin sovelluksien kehittämisestä: Pääkomponenttianalyysiä (PCA, principal component analysis) on kehitetty edelleen PLS (partial least squares) –menetelmäksi, kun nir-spektrien avulla on tutkittu kemiallisia prosesseja ja reaktioita. Optisten menetelmien kehittämistä on helpottanut myös kuitu- ja detektoritekniikan (spektrometrit) nopea kehittyminen ja koon pienentyminen sekä halventuminen. Nir-menetelmästä on saatu kaupallisia sovelluksia tasalaatuisille materiaaleille, joista Suomessa tunnetuimpia on paperirainan kosteuden on-line –mittaus. Sovellusyritykset epähomogeenisille materiaaleille eivät ole toistaiseksi kovin hyvin onnistuneet, joka useimmiten johtuu optisen mittauksen pintamittausluonteesta.

Sähköiset menetelmät ovat aikaisemmin perustuneet useimmiten kapasitiivisuuden mittaukseen, joka perustuu materiaalin dielektrisyysyteen. Perustana on, että useissa materiaaleissa, kuten biomassoissakin vesimolekyylit aiheuttavat valtaosan kapasitiivisesta vasteesta so. veden permittivisyys >> kuiva-aineen/puun permittivisyys. Kaupallisissa mittareissa käytetään yleensä vain yhtä taajuutta. Uusimmassa teknologiassa mitataan tietyltä taa-

juus(spektri)alueelta impedanssi ja vaihesiirto, jolloin materiaalista saadaan paljon enemmän tietoa. Eri taajuuksilla tunkeutuvuus ja läpäisy sekä vasteet eroavat. Näin pystytään vähentämään mm. pintakosteuden vaikutusta ja lämpötilariippuvuutta sekä soveltamaan kehittyntä laskentaa.

Tekesin ClimBus-teknologiaohjelman Käsittelyhankkeessa kosteudenmittaus -osatehtävässä tutkittiin myös vielä tavanomaista ir- sekä gamma- ja impedanssimittauksista erillisinä menetelminä. Taustana olivat impedanssimittauksen uutuus ja radiometrisen mittauksen osalta tietyt aikaisemmat sovellusyritykset ja patenttihakemus (WO200045157, Tiitta 2007 ja Järvinen 2007).

Tyypillistä aikaisemmalle kehittämistyölle on ollut, että kutakin menetelmää on tarkasteltu erillisenä, joka on todennäköisesti johtunut siitä, että tietyllä instrumenttivalmistajalla tai toimittajalla ja/tai tutkimusorganisaatiolla on ollut tiukka liityntä pelkästään ao. menetelmään. Loppukäyttäjien panos kehittämistyössä on kuitenkin ollut melko vaatimaton ja osallistuminen myös kohdemateriaalitietämyksen välittämisen osalta puutteellista. Lisäksi asiaan on voinut vaikuttaa tietyt ennakkokäsitykset ja luulotkin.

Tutkittaviksi menetelmiksi mahdollista yhdistämistä varten valittiin kehittynyt ir-mittaus so. nir-mittaus, impedanssimenetelmä ja radiometrinen gammamittaus. Mikroaaltomenetelmä ei ollut tässä hankkeessa mukana, koska katsottiin, että sen lämpötilariippuvuus on voimakas ja lunta sekä jäätä sisältävästä materiaalista ei saa kunnollista mittausvastetta. Lisäksi siitä on esim. selluhakkeellekin useampia kaupallisia sovelluksia, jotka eivät ole yleistyneet. Periaatteessa ao. menetelmä on vastaavasti yhdistettävissä muihin mittauksiin ja joissakin kaupallisissa ratkaisuissa näin on tehtykin käyttämällä gammatiheysmittausta.

2 Tavoitteet ja rajaukset

Hankkeen tavoitteena on kehittää menetelmien yhdistämiseen perustuva on-line – kosteusmittausmenetelmä hakkeelle, joka on tarkempi ja ennen kaikkea käytettävämpi ja olosuhdesietoisempi kuin erilliset menetelmät. Yhdistämällä pyritään eri menetelmien etujen avulla korjaamaan niiden puutteita: esim. läpäisevä menetelmä (gammamittaus) yhdistetään pintamittausluonteiseen sekä lumeen ja jäähän herkemmin reagoiviin menetelmiin, kuten nir- ja/tai impedanssimittaus. Koska yleensä biomassojen kuten puunkin kosteuden mittaus on ollut hyvin haastavaa, niin tässäkin tapauksessa asiaa on lähestytty tutkimuksellisen keinoin lähtien menetelmien perusteista.

Ensivaiheessa tavoitteena oli yhdistelmämenetelmä, joka myöhemmin kehitetään ja kalibroidaan mahdollisesti monimuuttujamallinnuksen avulla tai yksinkertaisemmilla algoritmeilla erillisessä hankkeessa kilpailukykyiseksi kosteusmittariksi eri sovelluksiin.

3 Laitteet, menetelmät ja mittaukset

Kosteusmittauksen kehittämisen eräs pääkysymyksiä on, miten saadaan luotettava referenssimittaus riittävän suuresta materiaaliavirrasta, jolloin päästään laboratoriomitasta eteenpäin. VTT:llä ja muillakin kehittäjillä on paljon kokemusta myös suoraan energialaitoksilla ja teollisuudessa tehdystä kosteusmittauksen kehitystyöstä, jolloin luotettavaa vertailutietoa esim. näytteenoton edustavuuden ja riittävän kosteusvaihtelun suhteen on ollut hyvin vaikea saada. Siksi hankkeessa on käytetty VTT:lle Jyväskylään toteutettua täydenmitan koelinjaa (Järvinen 2005), jossa materiaalia voidaan hallitusti kierrättää ja manipuloida halutulla tavalla.

Koelinjaan asennettiin syksyllä 2007 ja keväällä 2008 VTT:llä Oulussa hakemittaukseen kehitetty nir –mittauspää (Aikio & al. 2002), josta sädekimppu vietiin valokuidulla Zeiss InGaAs-rivispektrometrille, jossa sen mittaama aallonpituusalue 945-1715 nm jakaantuu 128 pienempään aallonpituusalueeseen (pikseliin). Integrointiaika oli 10 ms ja keskiarvoistus 100. Spekttrinäytteitä tallennettiin sekunnin välein. Mitatut spektrit olivat pimeävirta- ja referenssikorjattuja absorbanssispektrejä. Referenssinä käytettiin massatase- tai keskiarvokosteutta. Kosteusmallien kalibroinnissa käytettiin PLS-menetelmää (Partial Least Squares) ja esikäsittelymenetelminä OSC-korjausta (Orthogonal Signal Correction) sekä derivointia. Malliin otettiin spektrejä aikaväliltä 2 min ennen ja 0 min referenssikosteuden kellonajan jälkeen. Lisäksi aallonpituusalueet (pikselit) 1-5, 65-75 ja 119-128 jätettiin pois malleista lämpötilan ja vesihöyryn aiheuttamien signaalihäiriöiden takia.

Linjaan asennettiin myös kaksi impedanssimittauspää. Toinen oli kaupalliseen impedanssi-piiriin (AD5933) perustuva kahdella elektrodilla varustettu mittaus, josta signaali tuli RS-485 –väylää ao. piirin kortille ja edelleen massamuistiin. Mittaukset tehtiin 10, 20, 30, 40 ja 50 kHz taajuudella. Toinen mittauspää oli ”torpedo”-mittaus perustuen nopeaan mittauskorttiin ja neljään elektrodiin. Mittaukset tapahtuivat 4 ja 25 kHz taajuudella. Torpedopäähän oli asennettu myös akustisen emission anturi ja vahvistin. Kuvassa 1 on koelinja syksyn 2007 mittausvarustuksessa.



Kuva 1 Koelinja 25.10.07-selluhakeajossa, edessä NDC:n ir- kosteusmittari ja radiometrinen tiheysmittaus ja ylhäällä impedanssi- ja nir-mittaukset.

Radiometriset mittaukset perustuivat pistemäisiin γ -lähteisiin: Cs-lähde (662 keV, 370 MBq, 1990, $t_{1/2} \approx 30$ a) ja Am-241 (60 keV, 1,67 GBq 1985, $t_{1/2} \approx 432$ a), joiden säteilyä detektoi-

tiin Ohmart DSG (tukeilmaisins+valomonistin) ilmaisimilla eli kyseessä oli ”pistemäinen” massatiheysmittaus (g/cm^2) säteilyn vaimentumiseen perustuen. Varsinainen tiheys (g/cm^3) saadaan, kun lisäksi mitataan ”polttoainepatjan” paksuus. Korkeusmittaus tapahtuu koelinjassa ultraäänianturilla ”uimuripinnasta” eikä suoraan polttoainepatjan pinnasta. Tiedonkeruu tapahtui sekunnin välein ja keskiarvoistus 2 min ennen referenssikosteutta. Tällöin myös kosteuden laskentamalli tulee 2 minuutin keskiarvoituksen pohjalta analogisesti pls/nir-mallin kanssa. Radiometriset mittaukset on käsitelty käyttäen ns. lineaarisia vaimennuskertoimia, jotka saadaan Beer-Lambert –yhtälöstä (kaava 1).

$$\text{Kaava 1 } I = I_0 e^{-\mu d} = I_0 e^{-\rho \mu_p d},$$

jossa μ on lineaarinen vaimennuskerroin, μ_p on massavaimennuskerroin ja ρ on väliaineen tiheys. Massavaimennuskerroin on kullekin alkuaineelle ominainen. Jos oletetaan, että puun alkuainekoostumus ei olennaisesti vaihtelee ja käytetään tiettyä fotonienenergiaa (tässä Cs-137: 662 kV ja Am-241: 60 kV), niin materiaalin tiheyteen valtaosin vaikuttaa sen kosteuspitoisuus, kun puulaji ja partikkelikoko eivät muutu. Mittaamalla säteilyn vaimeneminen voidaan yhtälöstä 1 laskea lineaarinen vaimennuskerroin, joka on vertailukelpoinen muiden mittausten kanssa samoilla laitteilla ja materiaaleilla. Ohmartin tukeilmaisimesta saa ulos pulssitiedot, suhteellisen absorption tai massatiheyden (kg/m^2), jolloin on tunnettava massavaimennuskerroin suhteellisen absorption laskemiseen. Suhteellinen absorptio mitataan em. tukeilmaisimessa tavallaan ”väärinpäin” pulssimittauksiin verrattuna eli suuri läpäisy näyttää suhteellisesti 0-arvoa (”täysi pulssimäärä”) ja pieni läpäisy 100 %:n absorptiota (vaimentunut pieni pulssimäärä). Tällöin yhtälö 1 muuttuu muotoon, joka on esitetty kaavalla 2. Tällöin ei tarvita pulssimittauksia, vaan riittää pelkkä suhteellinen mitta.

$$\text{Kaava 2 } I/I_0 = 1 - e^{-\mu d}$$

Kaikki linjamittaukset so. myös radiometristen mittausten data kerättiin sekunnin välein Squirrel`in Grant-1600 –loggeriin, josta se siirrettiin käsittelyyn excelillä. Muita linjamittauksia ovat sähkömekaaninen hihnavakaa, ”suodinkiekko” ir-kosteusmittaus ja hihnanopeus. Hihnanopeus koeajoissa oli m/s, so. mittauskohdissa on ollut vastaava hakevirran nopeus. Koeajohallin lämpötila ja sen kehitys on kirjattu mittauspöytäkirjaan. Lisäksi hakkeen lämpötilaa on mitattu käsi-ir –mittarilla. Tarkemmin hakkeiden lämpötilaa ajon aikana seurattiin kevään 2008 mittauksissa, jolloin valtaosa hakkeista oli aluksi jäässä.

Kaikki kosteusmittaukset oli asennettu niin, että hihnalla olevaa hakepatjaa mitattiin keskilinjalta. Tällöin mm. radiometriset mittaukset tapahtuivat patjan paksuimmasta kohdasta.

Linjaan syötettiin erityyppisiä ja kosteusalueilla olevia sellu- ja metsähakkeita, jotka oli saatu Metsä-Botnian (MB) Äänekosken tehtailta ja Kotimaiset Energiat ky:ltä. Selluhake oli MB:n tehtaalla kuorituista pölkyistä ja rungon osista tehtyä kuitupuuhaketta. Tehtaalla haketettu mäntyselluhake haettiin Äänekoskelta n. 20 m³:n erissä syksyllä 07 ja keuhällä 08. Lisäksi samanaikaisesti tuotiin ”säkkitaravana” a´ 60 l eri puulajeista tehtyä ostohaketta ja sauhaketta (teollisuushaketta), jonka puulajia ei tiedetty. Metsähake tuli Rauhalahteen tulevien hakekuormien mukana siten, että n. 10 m³:n loppuerä kuormista purettiin VTT:n piha-alueelle. Syksyn 07 metsähake tuli suoraan tienvarren hakkuutähdekasan haketuksesta ja kevään 2008 metsähake paperipeittoisen hakkuutähteen haketuksesta. Kummassakin tapauksessa kyse oli havupuiden hakkuutähdestä.

Eri kosteustasot on saatu haketta kuivaamalla, kastelemalla ja seostamalla. Kuivaus on tehty lavakuivurilla vähintään kuutiometrin erissä. Kostutus on tehty vähitellen kastelukannulla portaittain 15 l:n erissä. Ajot erosivat hieman toisistaan, mutta kaikki lisätyt ja poisotetut määrät on punnittu sekä otettu tarvittavat kosteusnäytteet, jotta hakkeen hetkelliset kosteuspitoisuudet pystyttiin laskemaan myös ajon massataseen kautta. Myös hienoaineshäviöt ja kosteudet mitattiin sekä määritettiin. Erityisen tarkasti näin pyrittiin tekemään kevään 2008 ajoissa.

Useimmista ajoista tehtiin myös toistot. Syksyllä 2007 tehtiin aluksi ns. kasa-ajot eri puulajien selluhakkeilla. Varsinaisia mittausajoja tehtiin mäntyselluhakkeella 4 kpl ja metsähakkeella 2 kpl, lisäksi alussa mitattiin kevyttä ”pölymäistä raamisahanpurua. Keväällä 2008 mittausajoja tehtiin mäntyselluhakkeella 4 kpl ja metsähakkeella 3 kpl, lisäksi lopuksi myös tehtiin ”kasa-ajot” eri puulajien sellu- ja metsähakkeella.

Syksyn 2007 ajoissa kostutus aloitettiin vähemmän kuivatusta tai toimituskosteudessa olevasta hakkeesta. Hakevirrasta otettiin kostutuksen jälkeen pois tunnettu määrä (n. puolet) ja lisättiin ensiksi vastaava määrä em. ”kevyemmin” kuivattua haketta ja lopuksi 2-3 x 25 kg ”ylikuivaa” haketta. Kevään 2008 ajoissa hakkeita on lisäksi jäädytetty ”konttipakastimessa”. Jäätynyttä haketta on ajettu aluksi siten, että ulkovarastossa olleeseen hakkeeseen on lisätty pakastettua haketta 4 x 25–30 kg:n erissä ja lopuksi kostutettu panoksittain 3 x 15 l. Myöhemmät ajot tehtiin siten, että pakastettuun hake-erään (n. runsas 200 g) lisättiin panoksittain (4 x 25 kg) kuivattua haketta ja lopuksi koko erä kasteltiin portaittain (3 x 15 l). Kostutusvesi on sisältänyt pinta-aktiivista ainetta (Deconex 0,9 dl/100 l vettä) imeytymisen nopeuttamiseksi. Kostutusvesi on ollut lämmitetyn hallin lämpötilassa (n. + 20 °C).

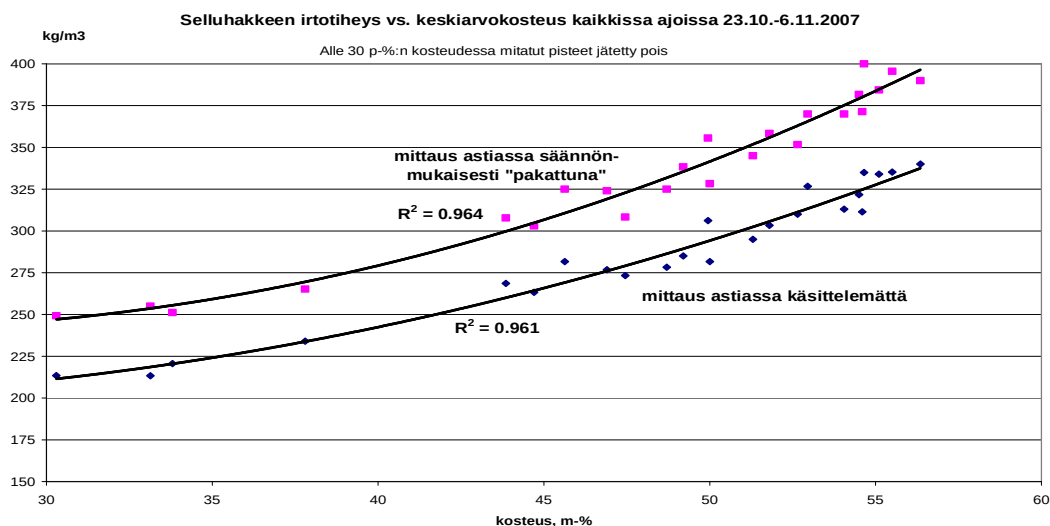
Referenssikosteuksina on käytetty seuraavia kosteusmääriä: laboriokosteus (Enas-kosteus) on linjalta tapahtuneeseen näytteenottoon perustuva standardikosteusmääritys, massatasekosteus perustuu koeajon massataseen laskentaan, korjattu massatasekosteus on hienoaineshäviöllä korjattu massatasekosteus. Keskiarvokosteus on laboriokosteuden ja massatasekosteuden keskiarvo. Vuoden 2007 ajoissa hienoaineshäviöillä oli suurempi merkitys, koska silloin kostutuskertoja oli useimmiten enemmän kuin 3. Kosteasta hakemassasta hienoaines tarttuu hihnoihin ja edelleen varisee lattialle. Kevään 2008 ajoissa hienoaineskontrolli oli tarkempi ja hienoaineksesta tehtiin paljon myös kosteusmääriä. Hienoaines on säännönmukaisesti jonkun verran kosteampaa kuin suuremmat hakepalat. Metsähakkeessa hienoaines määrä, lähinnä neulasmassan vuoksi, on huomattavasti suurempi kuin selluhakkeessa. Kevään 2008 mittausajoissa kosteusnäyte (n. 2 l) laboratorioon otettiin 30 l:n irtotiheyden astianäyte-erästä, kun vastaavat kosteus- ja irtotiheysnäytteet otettiin 2007 linjalta erikseen, tosin ajallisesti lähemmäksi. Irtotiheysnäyte otetaan näytekauhalla tai lapiolla 30 l:n astiaan hihnalta ja kosteusnäyte (n. 2 l) otettiin 2007 useimmiten käsin hihnalta kasan keskiosasta. Irtotiheysmääriä tehtiin myös 125 l:n astialla ajon alussa, ”väliotoissa” ja lopussa syksyllä 2007. Ajon aikaiset irtotiheysnäytteet palautettiin hihnalle.

4 Tulokset

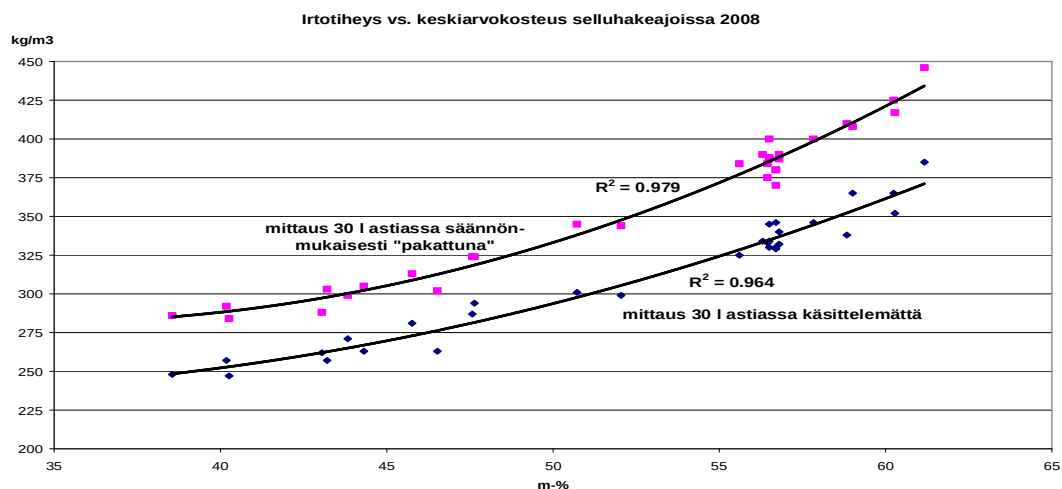
4.1 Radiometriset mittaukset

4.1.1 Selluhakkeen mittaukset

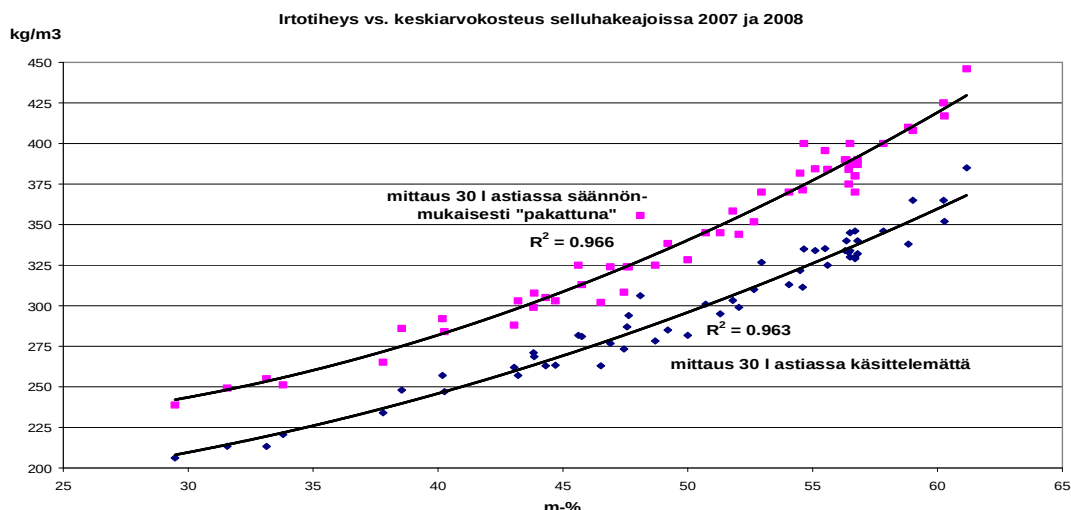
Mäntyselluhakkeen irtotiheys astialla mitattuna riippui hyvin tarkkaan kosteuspitoisuudesta erikseen syksyn 2007 ja kevään 2008 ajoissa (kuvat 2 ja 3). Yhteys keskiarvokosteuden ja irtotiheyden kanssa oli ehkä hieman parempi keväällä kuin syksyllä, joka mahdollisesti johtui näytteenotosta. Korrelaatio säilyi erittäin hyvänä, vaikka 2007 ja 2008 pisteet yhdistetään (kuva 4). Tämä tapahtui siitä huolimatta, että 2008 ajoissa materiaali oli valtaosin jäässä. Astiatiheysmittauksien perusteella jäisen ja sulan materiaalin välillä ei saada eroa, koska vain hakkeessa (pinnalla tai huokosissa) oleva vesi jäätyy. Kun hakkeen irtotiheys on n. 300 kg/m^3 , niin tällöin periaatteessa jään n. 7 %:n tilavuuslaajenema on vain n. 7/3 eli 2,3 %-yksiköä, mikä merkitsee n. $\pm 7 \text{ kg/m}^3$ – hajontaa, joka ”hukkuu” määrittelyn epätarkkuuksiin.



Kuva 2 Mäntyselluhakkeen kosteus vs. irtotiheys syksyn 2007 ajoissa

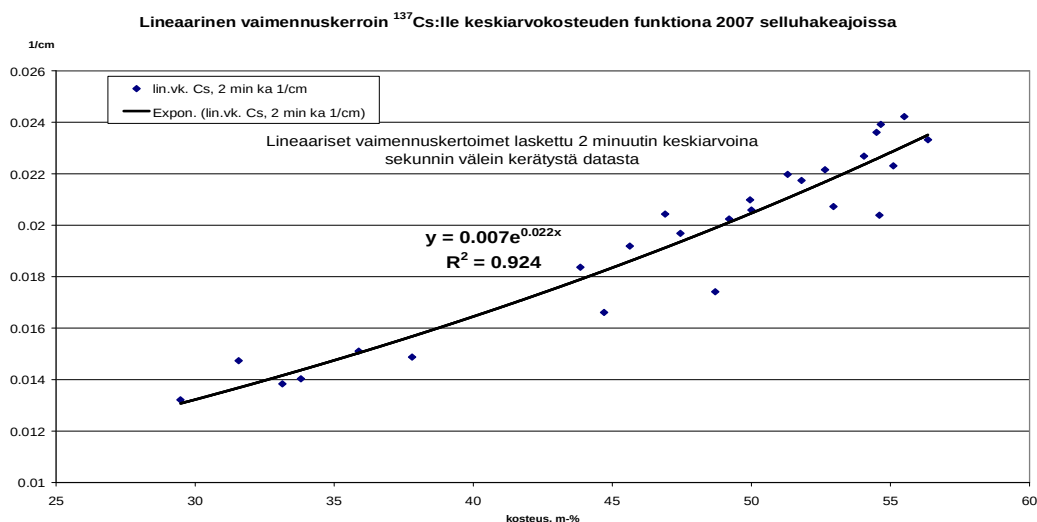


Kuva 3 Mäntyselluhakkeen kosteus vs. irtotiheys kevään 2008 ajoissa.

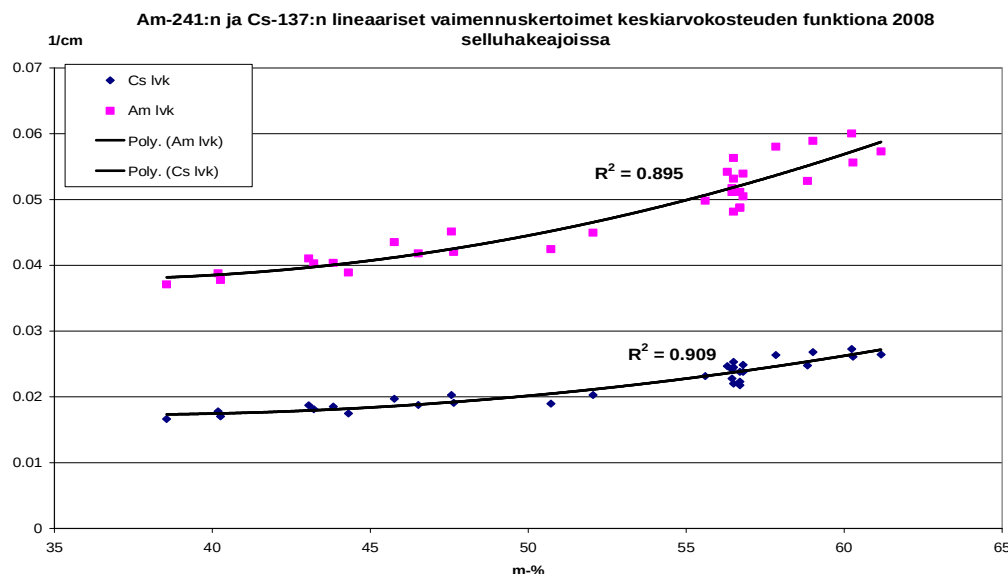


Kuva 4 Mäntyselluhakkeen kosteus vs. irtotiheys vuoden 2007 ja 2008 ajoissa.

Radioaktiivisen säteilyn vaimeneminen on suorassa suhteessa massatiheyteen (g/cm^2) ja sitä kuatta aineen tiheyteen (g/cm^3), jos kerrospaksuus mitataan. Jos irtotiheysmittauksella saadaan hyvä yhteys hakkeen kosteuden kanssa, niin periaatteessa vastaava yhteys tulee näkyä myös radiometrisen mittauksen ja kosteuden välillä ja em. mittauksen sekä irtotiheyden välillä. Koska radiometrinen mittaus oli tässä tapauksessa pistemäinen hihnan keskiviivalla tapahtuva mitaus, niin se antaa hieman heikomman yhteyden kosteuden kanssa kuin irtotiheysmittaus, jossa näytteenotto on edustavampi. Tämä todettiin myös gammamittauksissa syksyn 2007 ja kevään 2008 ajoissa (kuvat 5 ja 6). Syksyn ajoissa yhteys kosteuden kanssa muodostui kummallakin säteilylähteellä hieman paremmaksi kuin kevään ajoissa, vaikka näytteenotto oli tarkempi keväällä, joka voi kuvastaa tiheyden muutoksen vaikutusta jäisen hakkeen vuoksi.

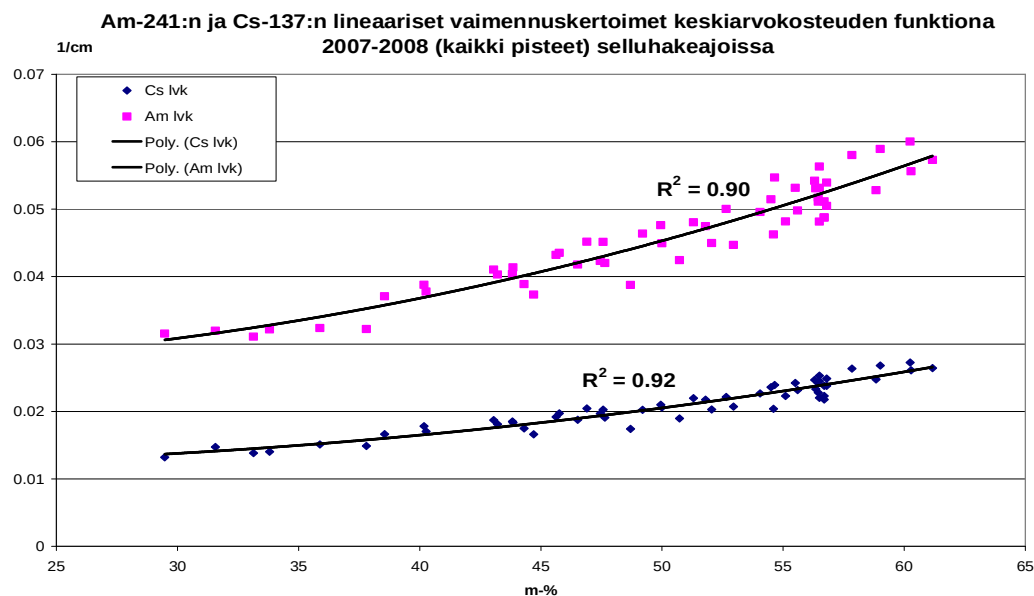


Kuva 5 Lineaarinen vaimennuskerroin (¹³⁷Cs) vs. kosteus syksyllä 2007.

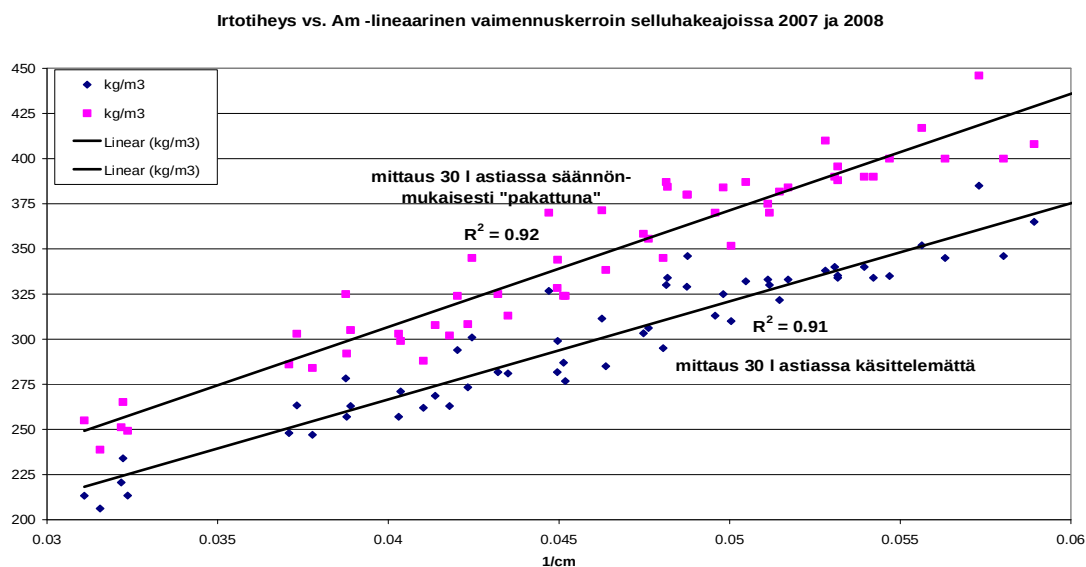


Kuva 6 Lineaariset vaimennuskertoimet vs. kosteus (^{241}Am ja ^{137}Cs) kevään 2008 ajoissa.

Vastaavasti tässä tapauksessa koko pistejoukko yhdessä (2007 ja 2008) antaa myös hyvän tuloksen (kuva 7). Irtotiheysmittauksen ja gammamittauksen välinen yhteys saatiin myös hyvin selvästi esiin (kuva 8). Riippuvuus oli hieman parempi kuin kosteuden ja lineaaristen vaimennuskertoimien, joka johtunee paremmasta edustavuudesta so. suuremmasta näyte-erästä astia (30 l) irtotiheysmäärittelyksessä.



Kuva 7 Lineaariset vaimennuskertoimet vs. kosteus (^{241}Am ja ^{137}Cs) 2007 ja 2008 ajoissa.

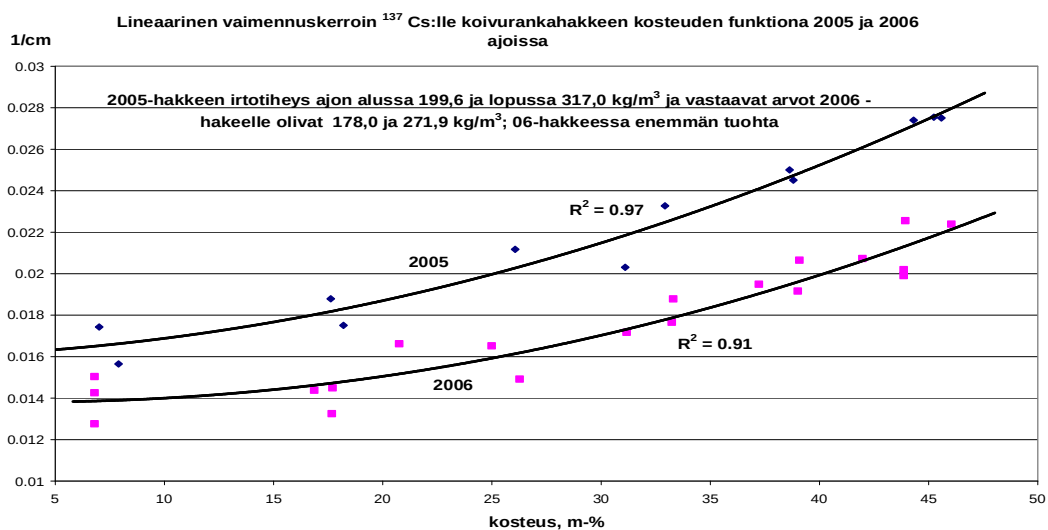


Kuva 8 Lineaariset vaimennuskertoimet vs. irtotiheys (^{241}Am) 2007 ja 2008 ajoissa.

Kasa-ajoista, joissa käytettiin eri lähteistä ja puulajeista saatua haketta, voitiin todeta, että kosteuden ja radiometrisen tiheyden korrelaatiota ei ole, jos puulaji tai haketyyppi (palakoko) muuttuu (taulukko 1), vaikka irtotiheyden ja radiometrisesti mitatun tiheyden yhteys on selvä. Vastaava asia on myös nähtävissä radiometrisissä koelinjamittauksissa, kun on verrattu eri vuosina mitattua esim. eri puulajista tehtyä haketta (kuva 9).

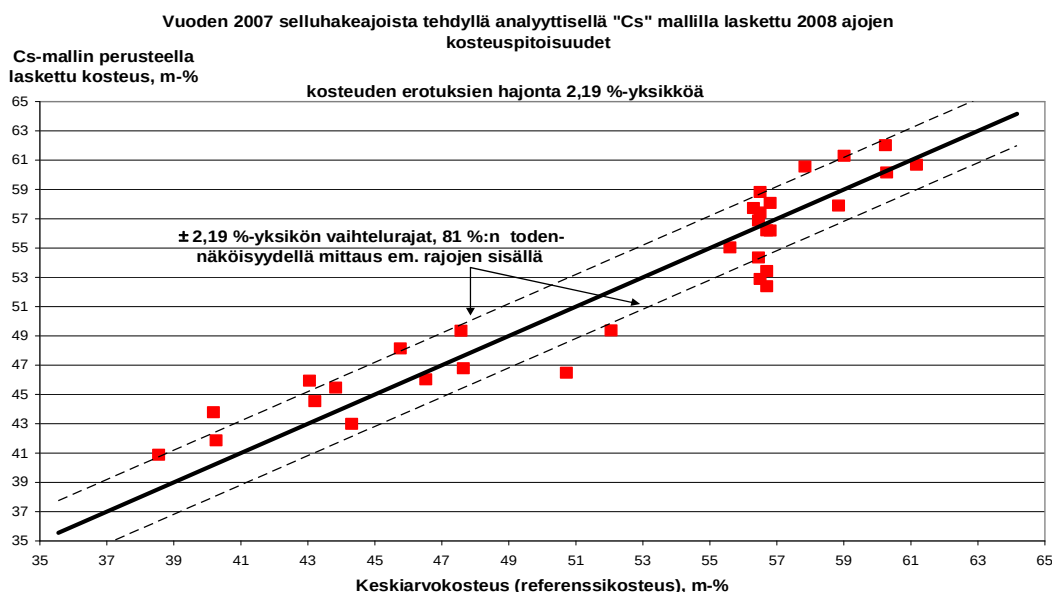
Taulukko 1 Korrelaatio radiometristen ja kosteus sekä irtotiheysmittausten kanssa kasa-ajoissa.

kasa-ajot 17.10.2007	Cs-tih. ei käs.	Am-tih. ei käs.	Cs-tih. pöyh.	Am-tih. pöyh.
kosteus, m-%	0.337	0.241	0.522	0.216
itih, astia, kg/m ³	0.934	0.933	0.913	0.868
itih, töm, astia, kg/m ³	0.915	0.902	0.932	0.836

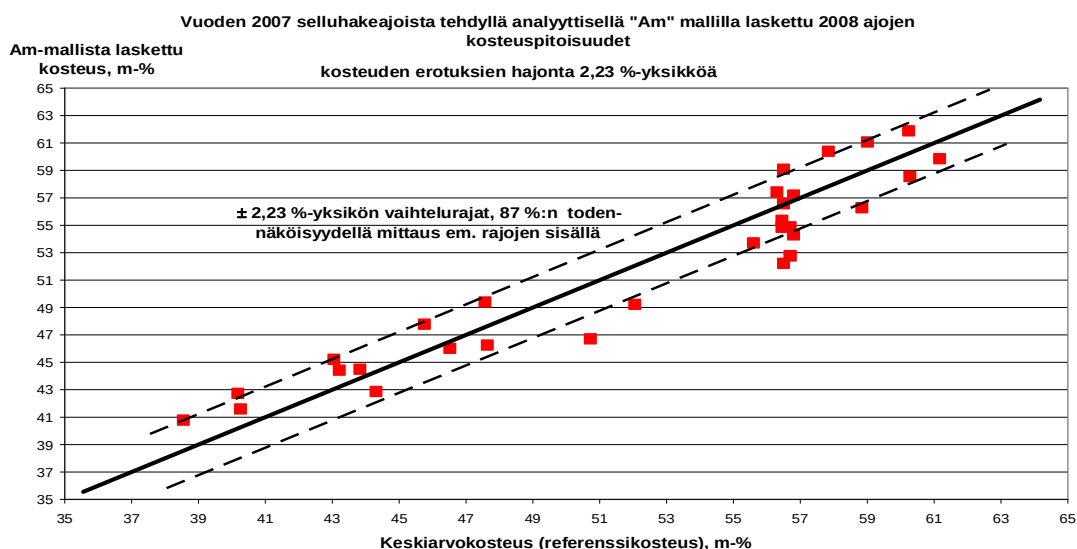


Kuva 9 Lineaarinen vaimennuskerroin (^{137}Cs) vs kosteus rankahake-ajoissa 2005 ja 2006.

Radiometrinen mittauksen tarkkuutta arvioitiin siten, että syksyn 2007 ajoista tehtiin sovitte-malli, jonka avulla laskettiin kevään 2008 mittauksien perustella ennustekosteuspitoisuus. Laskettua kosteuspitoisuutta verrattiin saman ajankohdan referenssikosteuteen, jona käytettiin keskiarvokosteutta eli laboratoriokosteuden ja ajon massatasekosteuden keskiarvoa. Vertailu tehtiin siten, että pisteet laskettu/referenssi lisättiin kuvaan, jossa x-akselilla on referenssikosteus ja y-akselilla laskettu kosteus (ennustekosteus). Mitä lähempänä pisteet ovat diagonaali-viivaa ($y=x$), sitä tarkempi mittaus on. Kuvaan lisättiin myös hajonnat siten, että hajonta las-kettiin referenssikosteuden ja ennusteen erotuksista. Tarkkuus em. hajontavälille on laskettu siten, että kuinka suuri osa pistejoukosta on hajontaviivojen sisällä. Tämä laskenta tehtiin kummallakin säteilylähteellä (kuvat 10 ja 11). Tarkastelu osoittaa, että radiometrisellä mitta-uksella pääsi koelinjaaloissa hieman runsaan ± 2 %-yksikön tarkkuuteen n. 84 %:n todennä-köisyydellä.



Kuva 10 Radiometrisen ^{137}Cs -lähteeseen perustuvan mittauksen tarkkuus 2008 ajossa (malli syksyn 2007 mittauksista).



Kuva 11 Radiometriseen ^{241}Am -lähteeseen perustuvan mittauksen tarkkuus 2008 ajossa (malli syksyn 2007 mittauksista).

Nämä mittaukset ja vertailut näyttävät, että mäntyselluhakkeella (mäntykuitupuuhake) jopa eri vuosina ja tässä eri alueiltakin otettujen erien tuoremassan ja irtotiheyden mittaukseen perustuva hakkeen ominaistiheys on hyvin lähellä toisiaan. Tällöin hakkeessa pinta- ja sydänpuun osuuksien täytyy olla samantyyppisiä, joka toteutuu helpommin suurissa erissä, jossa on paljon ”puuyksilöitä”. Oletuksena on tällöin, että puuaineksen ominaistiheyden vaihtelu puuyksilössä on suurempaa kuin esim. hake-erässä, joka on tehty suuresta määrästä erillisiä puita. Tiheyden pieni vaihtelu edellyttää tietysti myös, että palakokojakautuma on myös kohtuullisesti yhtenevä, ts. haketus on tehty samanlaisilla laitteilla. Palakokojakautuma on hyvin merkittävä irtotiheysmittauksessa. **Kun hakkeen em. tavalla mitattu ominaistiheys ei vaihtelee, niin tiheys riippuu valtaosin hakkeen kosteuspitoisuudesta.**

Metsäntutkimuslaitoksella (Metla) on paljon tutkimusta (Lindblad, Verkasalo 2001) eri puulajien mm. mänty- ja kuusikuitupuun sekä teollisuushakkeen kuivatuoretiheyden vaihtelusta Suomessa, mutta ei varsinaisesti massan punnitukseen ja irtotilavuusmittaukseen perustuvan tiheyden osalta. Kuivatuoretiheyteen vaikuttaa puuaineksen tiheyden lisäksi huokosissa oleva vesi. Kuivatuoretiheys riippuu erityisesti puuaineksen huokostilavuudesta, johon vaikuttaa myös kasvupaikka ”puuyksilön” ominaisuuksien lisäksi. Kuivatuoretiheyden ja puun (hakkeen) tiheyden suhteesta ei ole kirjallisuustietoja. Hakkeen kuivatuoretiheys on noin kaksinkertainen verrattuna tuoremassan ja irtotiheys- sekä kosteusmäärittelyn avulla saatuaan kuiva-ainetiheyteen ”selluhakepalakoossa”. Palakoon pienentyminen vähentää eroa. Periaatteessa tuoremassan ja irtotiheyden sekä radiometrisen mittauksen yhteys kuivatuoretiheyteen on määritettävissä tietyssä palakoossa. Tämän yhteyden tutkiminen voisi antaa radiometrisen ja muidenkin kosteusmittausmenetelmien soveltamiseen huomattavasti suuremman Metlan koko Suomea koskevan aineiston, kuin tässä tutkimuksessa on ollut mahdollista.

Jos mäntyselluhakkeella havaittu ominaistiheyden pieni vaihtelu tietyin edellytyksin on pätevä, niin se voi avata radiometrisen mittauksen käyttöön aivan uusia näkymiä esim. maailmanlaajuisesti (muut kotoperäiset ja vieraat havu- ja muut puulajit, Eucalyptus, jne.). Suomen osalta kuivatuoretiheyden ja nopeaan irtotiheysmittaukseen perustuvan kuiva-ainetiheyden sekä radiometrisen mittauksen riippuvuuden selvittäminen voi mahdollistaa hyvin edustavat alueelliset ja tehdaskohtaisetkin kalibroinnit. Toisaalta näin voidaan ehkä menetellä myös toisinpäin: radiometrisellä mittauksella voidaan saada hakkeen kuivatuoretiheys jollakin tarkkuudella tietyllä palakoolla (esim. tyypillinen tehdas tai aluekohtainen selluhakejakautuma).

4.1.1.1 Metsähakkeen mittaukset

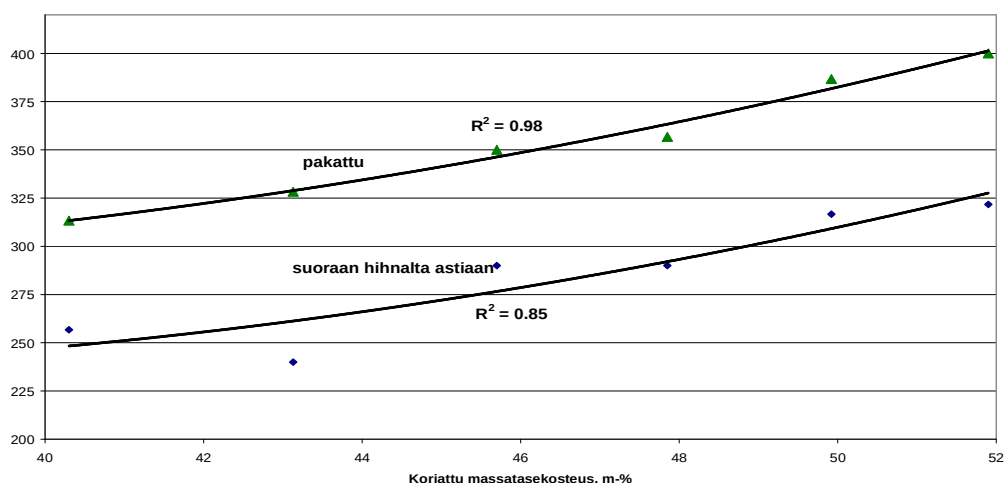
Metsähakkeella irtotiheyden riippuvuus kosteuspitoisuudesta vaihteli enemmän kuin selluhakkeella. Tämä tuli hyvin esiin myös syksyn 2007 mittauksissa. Kun syksyn kahden metsähakeajon kosteus vs. irtotiheys –pistejoukkoa verrataan, niin yhteys tiheyden ja kosteuden välillä on heikko. Suuri syy tähän oli em. näytteenottotapa, jossa tiheys- ja kosteusnäyte otettiin erikseen. Metsähakkeen irtotiheyden luontainen hajonta on suuri, koska partikkelikokojakautuma on suuri. Kohtuullinen korrelaatio (0,8 – 0,9) saadaan silloin, kun tilannetta tarkastellaan nousevan kosteuden alueelle so. kostutuksen ajalta (taulukko 2). Hyvät korrelaatiot (0,91 – 0,99) ja soviteen standardipoikkeamat ($> 0,90$) saadaan silloin, kun ajoja tarkastellaan erikseen nousevan kosteuden alueella (kuva 12). Parhain irtotiheyden ja kosteuden yhteys saatiin melkein aina, kun käytettiin ”pakattua” astiamittausta irtotiheydelle. Tämä kuvastaa sitä, että partikkelikoon ollessa vaihteleva astian ”tömistys” kiinteyttää näyte-erää vertailukelpoisemmaksi. Tiheysmittaukset näyttävät, että kummakin 2007 ajon hakkeessa oli tiheysero, vaikka periaatteessa hake-erä oli sama so. tuotu samassa kuormassa. Kuvassa 13 on esitetty metsähakkeen irtoainetiheydet syksyn ajojen eri vaiheissa. Selitys tiheyserolle voi olla, että kuiva (37,5 m-%) metsähake tuotiin VTT:n varastoon siten, että se oli loppuosa rekkakuormasta, joka oli toimi-

tettu Rauhalahteen. Tähän loppuosaan oli varmastikin kertynyt paljon neulasmassaa. Kun se purettiin rekan peräpurkukuljettimella varastoon, niin kävi todennäköisesti niin, että hienoainesta lajittui toiselle puolelle enemmän kuin toiselle, joka aiheutti eroja ajoerien hienoainesmäärässä.

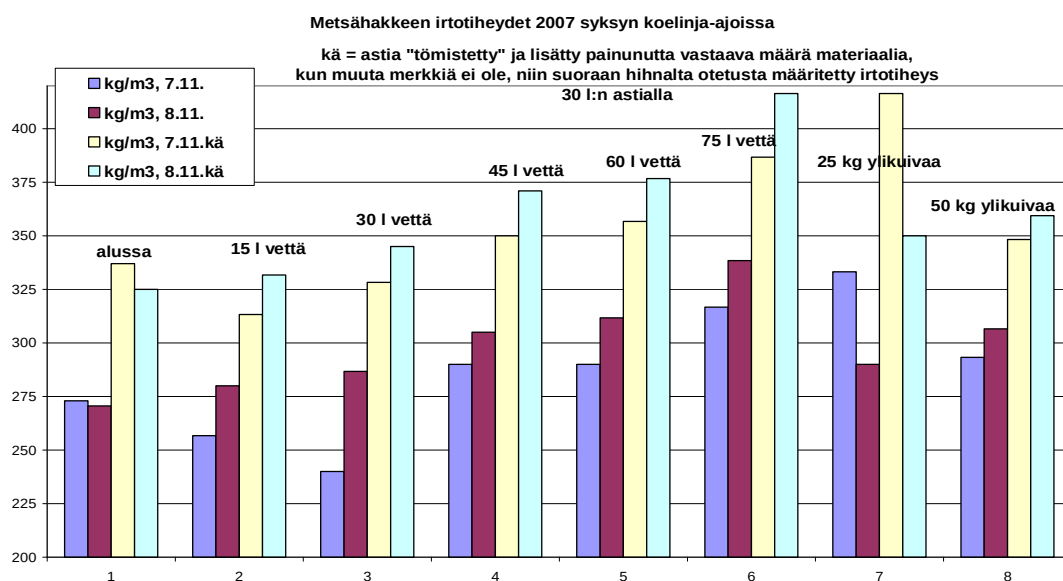
Taulukko 2 Korrelaatiot metsähakkeella 2007 ajoissa (nk=nouseva kosteus/kostutus).

Korrelaatiotaulukko, metsähake	itih, astia	itih,astia, pak.	Cs lin. vk	Am lin.vk
kakosteus, m-%	0.535	0.687	0.704	0.693
kakosteus, m-%, nk	0.796	0.896	0.827	0.822
itih,astia, kg/m ³	1.000	0.930	0.821	0.811
itih,astia, pakattu, kg/m ³	0.930	1.000	0.821	0.815

Metsähakkeen kosteus vs. irtotiheys kostutusjakson aikana 7.11. koelinja-ajossa

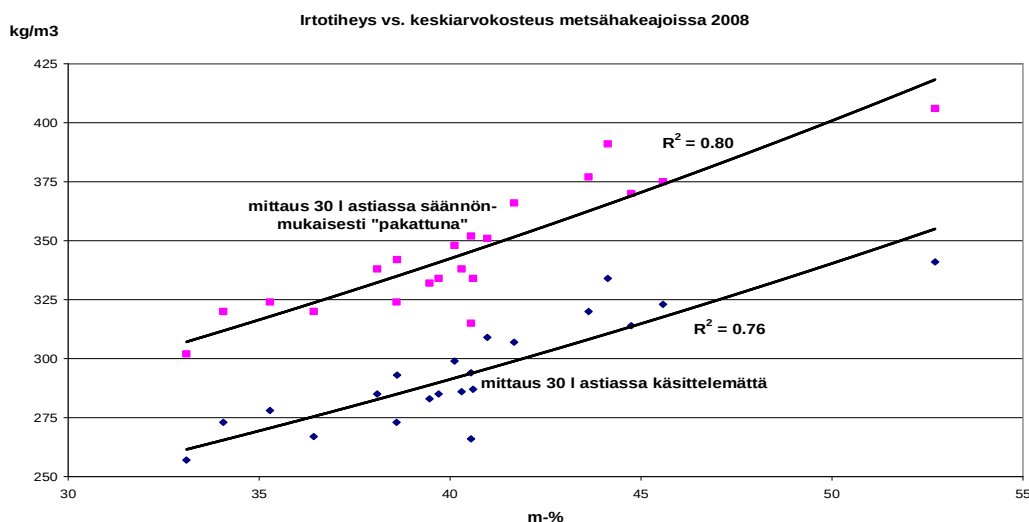


Kuva 12 Metsähakkeen kosteus vs. irtotiheys nousevan kosteuden jaksolta 7.11.07.

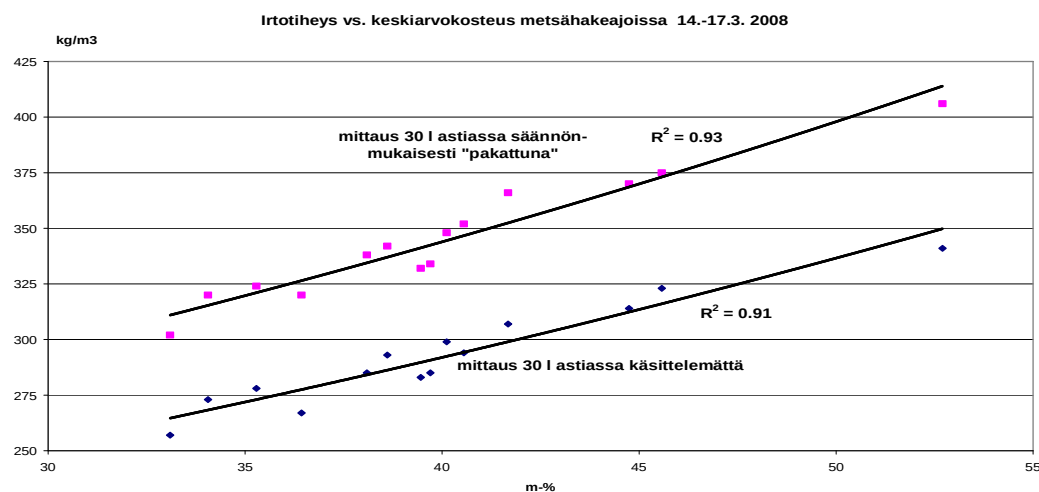


Kuva 13 Metsähakkeen irtotiheydet syksyn 2007 ajojen aikana.

Kevään 2008 ajoissa metsähakkeen irtotiheyden ja kosteuden yhteys oli paremmin nähtävissä (kuva 14) kuin syksyllä 2007 metsähakkeella, mikä johtui tarkemmasta näytteenotosta ja hienoaineskontrollista. Kuitenkaan se ei ollut kovin hyvä, kun kaikkia kolmea ajoa käsiteltiin yhdessä, mutta parani selvästi ”selluhaketasolle”, kun käsiteltiin pelkästään kahta viimeistä ajoa (kuva 15). Ajot 14. ja 17.3 metsähakkeella antavat hyvän riippuvuuden kosteuden ja irtotiheyden välille vaikka ajotapa oli erilainen, mutta 13.3. -ajossa hajonta on selvästi suurempaa. Viimeksi mainittu ajo oli 14.3. ajon toisto. Hihnojen alle varisseen (neulasmassa)rippeen kosteus ja määräkin oli tällöin suurempi kuin muissa kevään metsähakeajoissa. Lattialle varissut hienoainesmäärä oli ajon lopussa hieman suurempi kuin hihnoilta mitattu hakemäärä (151,7 vs. 150,9 kg), joka antaa hyvän selityksen tiheyserolle.



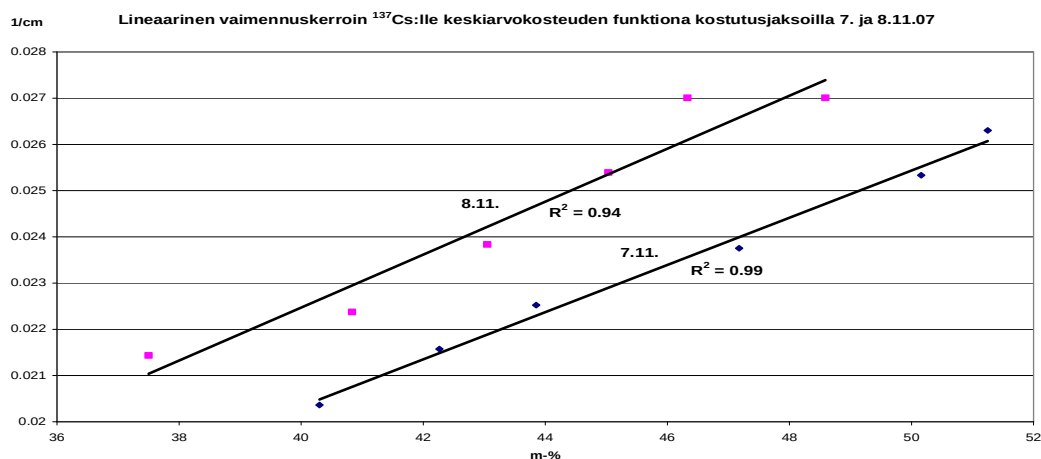
Kuva 14 Irtotiheyden ja kosteuden suhde kaikissa 2008 metsähakeajoissa.



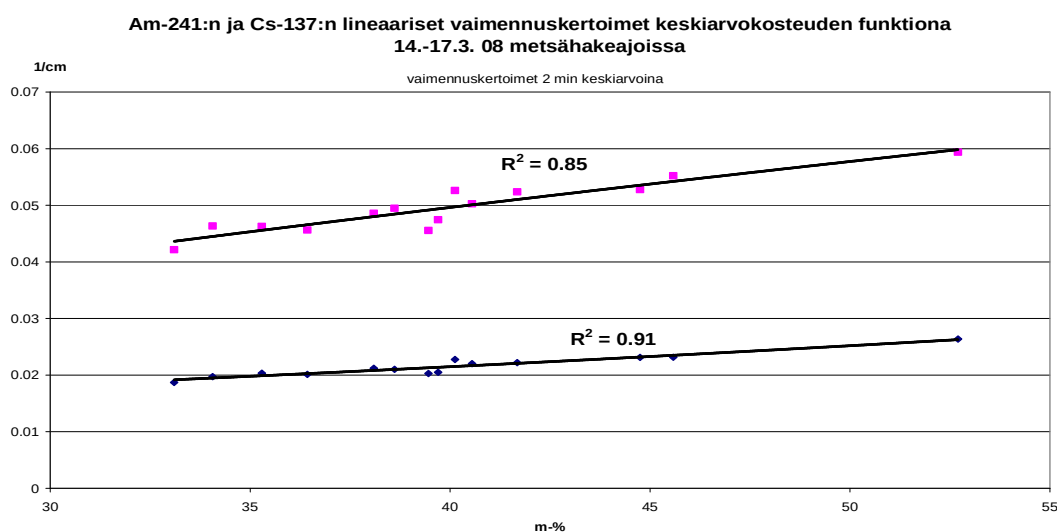
Kuva 15 Irtotiheyden ja kosteuden suhde kahdessa viimeisessä (14. ja 17.3.) 2008 metsähakeajossa.

Tiheyserot näkyvät myös radiometrisissä mittauksissa. Selvä yhteys kosteuden ja radiometristen mittausten lineaaristen vaimennuskertoimien välillä saatiin syksyn 2007 ajoissa nousevan kosteuden alueella (kuva 16), kun ajoja tarkastellaan erikseen. Kuitenkin radiometristen ja irtotiheysmittauksen yhteys muodostui selvästi paremmaksi kuin kosteuden ja irtotiheysmittauksen korrelaatio myös kummankin syksyn ajon yhteisellä pistejoukolla. Tämä kuvastaa näytteenoton merkitystä.

Kun tarkastellaan kaikkia kevään 2008 metsähakeajoja yhtenä pistejoukkona, niin kosteuden ja lineaaristen vaimennuskertoimien yhteys on heikko. Tilanne paranee olennaisesti, kun vastaava tehdään 14. ja 17.3. -ajojen pisteillä (kuva 17).



Kuva 16 Syksyn 2007 metsähakeajojen tarkastelu erikseen kosteus vs. vaimennuskertoimen suhteen.



Kuva 17 Kevään 2008 kahden viimeisen metsähakeajon kosteus vs. vaimennuskertoimen kummallakin säteilylähteellä.

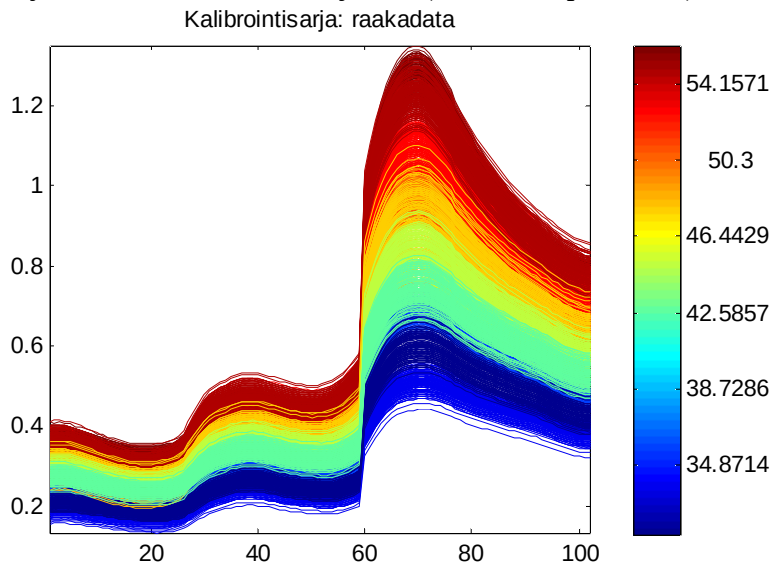
4.2 Lähi-infrapuna (NIR) –mittaukset

4.2.1 Selluhakkeen mittaukset

Nir –mittauksissa hakkeille tehtiin pls –malliin perustuvat kosteusmittauksen kalibroinnit, joissa mallin rakentamiseen (kalibrointisarja) käytettiin koeajoista tietty data ja sen testaukseen eri koeajodataa. Kalibrointisarjoja ja testidataa vaihdeltiin.

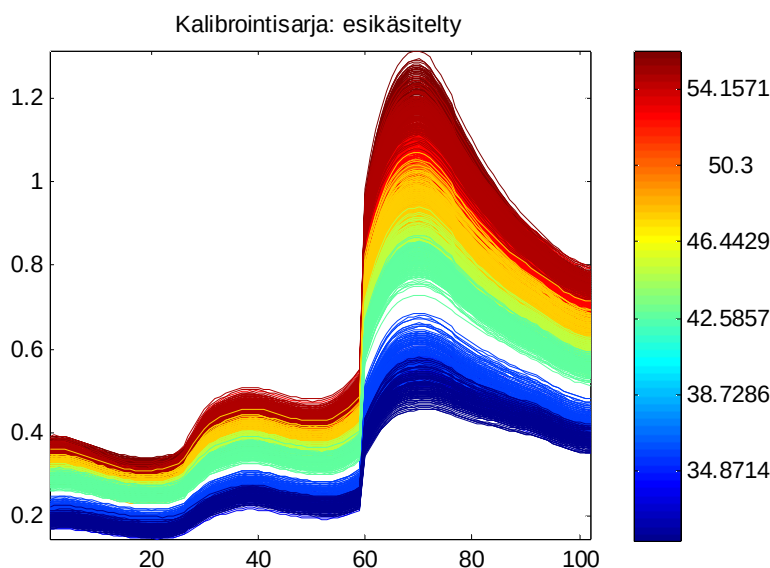
PLS-kosteusmalli #0, kalibrointisarja 25.10.2007 ja 29.10.2007, testisarja 6.11.2007

Syksyllä 2007 tehdyistä mäntyselluhakkeen kostutusajoissa mitatuista absorbanssispektreistä muodostettiin ensimmäiset kokeiluluontoiset PLS-kosteusmallit. Näistä parhaaksi osoittautui malli, jonka kalibrointidata otettiin päiviltä 25.10. ja 29.10. Testidata otettiin päivältä 6.11. ja testidataa ei käytetty mallissa. Koeajoissa massaa oli ensin kostutettu määrääjoin ja sitten poistettu osa määrästä massasta ja korvattu kuivalla massalla. Referenssinä käytettiin massa-tasekosteutta ja malliin otettiin spektrejä aikavälillä 2 min ennen ja 0 min jälkeen referenssi-kosteuden kellonajan. Kalibroinnin PLS-menetelmässä käytettiin 6 latenttia muuttujaa ja esikäsittelymenetelmänä OSC-korjausta (2 osc-komponenttia).

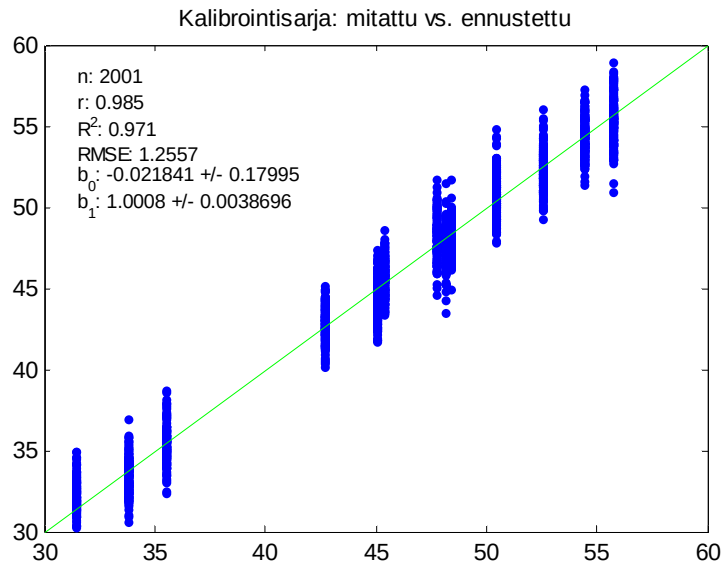


Kuva 18 Kalibrointisarjan 25. ja 29.10.07 raakaspektrit.

Massatasekosteuden lähtöarvona käytettiin ENAS-kosteuden lähtöarvoa. Kuvassa nähdään mäntyselluhakkeen kostutusajojen raakaspektrit, jotka on värjätty massatasekosteuden mukaan. Värjäyksestä nähdään, että tulos on looginen: ylhäällä ovat 'kosteat' ja alhaalla 'kuivat' spektrit.

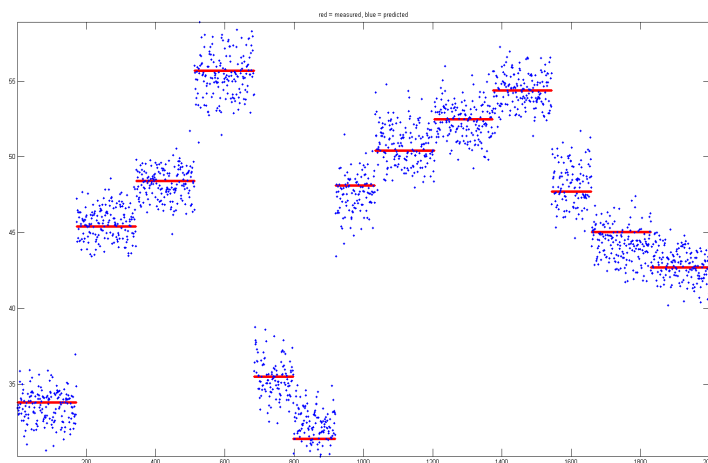


Kuva 19 Kalibrointisarjan 25. ja 29.10.07 esikäsiteltyt spektrit.



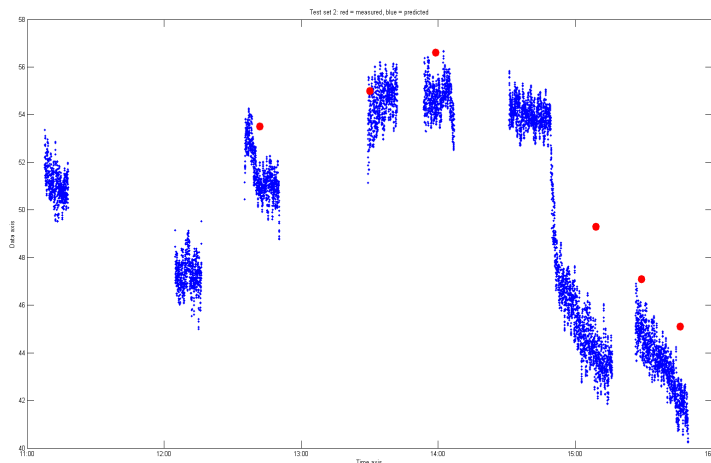
Kuva 20 Kalibroitaisarjan kosteusennuste omille spektreilleen referenssikosteuden funktiona.

Kuvasta 20 nähdään, että referenssipisteitä oli 13 kpl ja kalibrointi sarjan absorbanssispektrejä (siniset pisteet) oli 2001 kpl. Kun kalibrointisarjasta muodostetaan kosteusennuste omille spektreilleen referenssikosteuden funktiona, niin keskivirhe on noin 1.3 kosteusprosenttiyksikköä.



Kuva 21 Kalibroitaisarjan kosteusennuste omille spektreilleen referenssikosteuden funktiona.

Kuvassa 21 nähdään, että siniset pisteet (yksittäisten spektrien ennusteet) jakautuvat tasaisesti punaisen viivan molemmille puolille ja mahdollisimman lähelle punaista viivaa, mikä kuvastaa mallin hyvyttä.

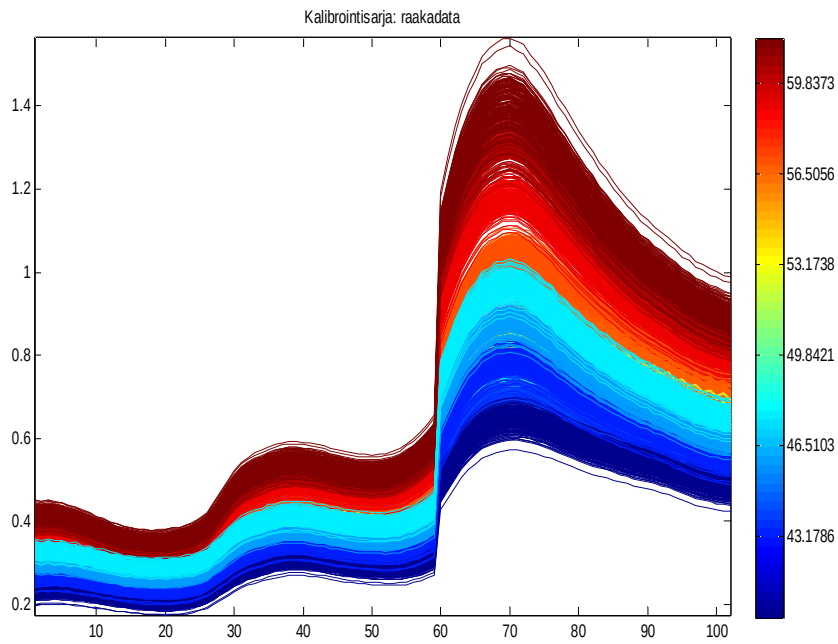


Kuva 22 Kosteusennuste testisarjan spektreille referenssikosteuden funktiona.

Mallin testisarjana on siis kaikki data päivältä 6.11.2007. Kuvasta 22 nähdään, että testisarjal- la ennusteet ovat vähän pielessä, mutta oikea trendi silti löytyy. Virhe kuivassa päässä saattaa selittyä veden siirtymisellä hihnaan ja haihtumisella hakkeesta.

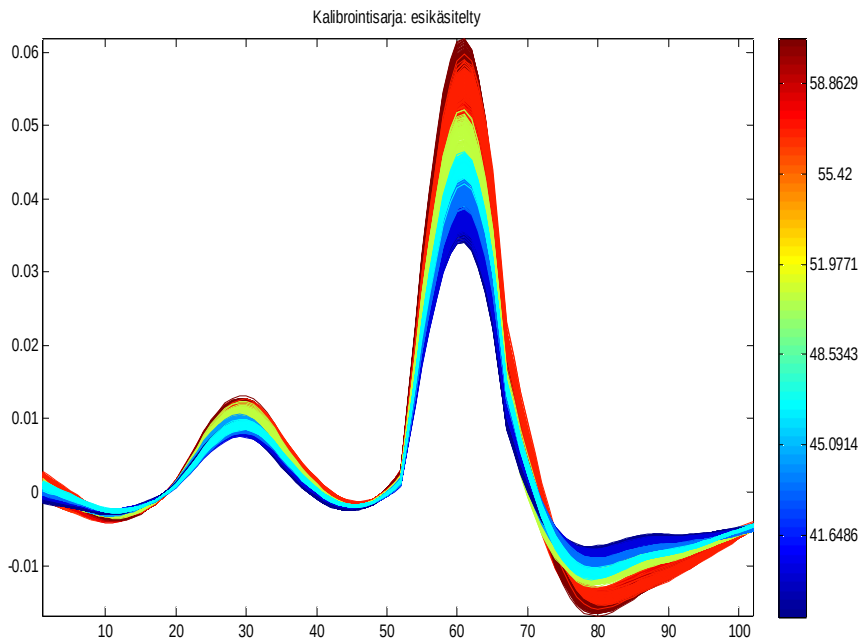
PLS-kosteusmalli #1, Kalibrointisarja päiviltä 10.3. ja 12.3., testisarjat päiviltä 7.3. ja 11.3.

Kevään 2008 koeajoissa 7.3. ja 10.3. jäistä massaa lisättiin useita kertoja ja kostutettiin mää- räajoin. Koeajoissa 11.3. ja 12.3. jäistä massaa lisättiin useita kertoja, sitten lisättiin kuivaa massaa ja lopuksi kostutettiin määräajoin. Näiden mittaustulosten avulla muodostettiin kuusi eri PLS-kosteusmallia (#1-#6) siten, että aina osa päivistä käytettiin kalibrointisarjan muodos- tamiseen ja jäljelle jäävät päivät käytettiin testisarjojen muodostamiseen. Referenssinä käytet- tiin keskiarvokosteutta (ENAS-kosteuden ja massatasekosteuden keskiarvoa) ja malliin otet- tiin spektrejä aikavälillä 2 min ennen ja 0 min jälkeen referenssikosteuden kellonajan. Toisin kuin syksyn mallissa #0, kalibroinnin PLS-menetelmässä käytettiin nyt 3 latenttia muuttujaa ja esikäsittelymenetelminä 1. Derivointia ja 2. OSC-korjausta (2 osc-komponenttia). Näin saatiin tarkempi ennuste, jossa oli pienempi hajonta.



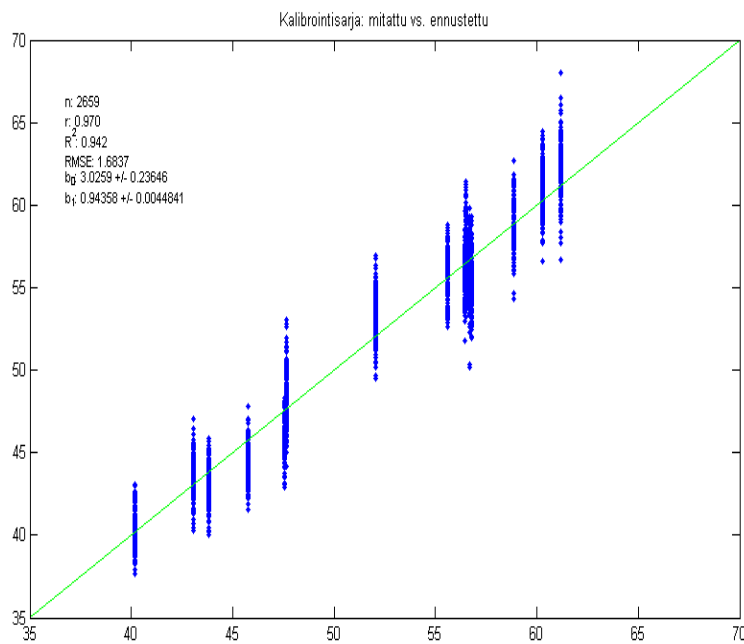
Kuva 23 Kalibrointisarjan 10. ja 12.3.08 raakaspektrit.

Kuvan 23 värjyksestä nähdään jälleen, että tulos on looginen: ylhäällä ovat 'kosteet' ja alhaalla 'kuivat' spektrit.



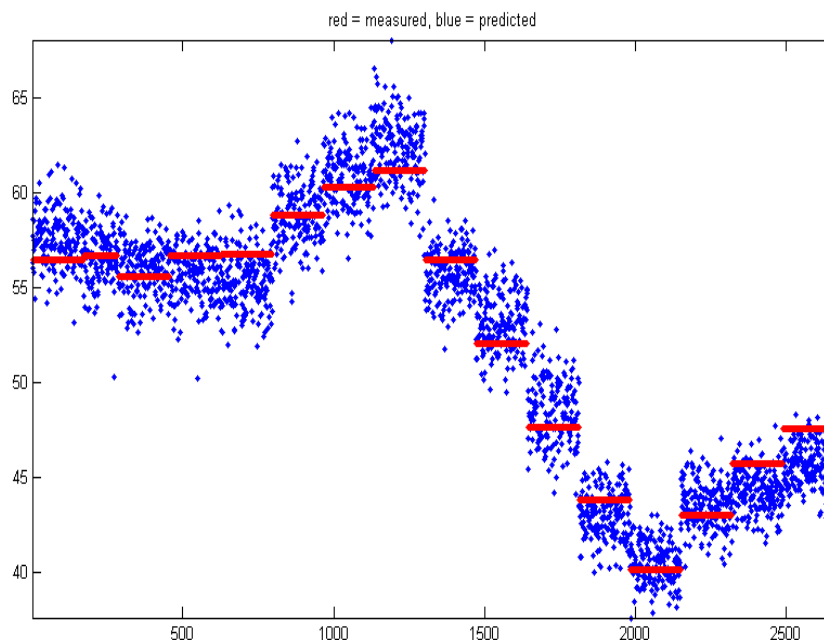
Kuva 24 Kalibrointisarjan 10. ja 12.3.08 esikäsittelyt spektrit.

Kuvassa 24 nähdään derivoidut ja OSC-esikäsittelyt spektrit. Värjäyksen tulos on edelleen looginen: ylhäällä ovat 'kosteet' ja alhaalla 'kuivat' spektrit vaaka-akselin kohdassa noin 60.



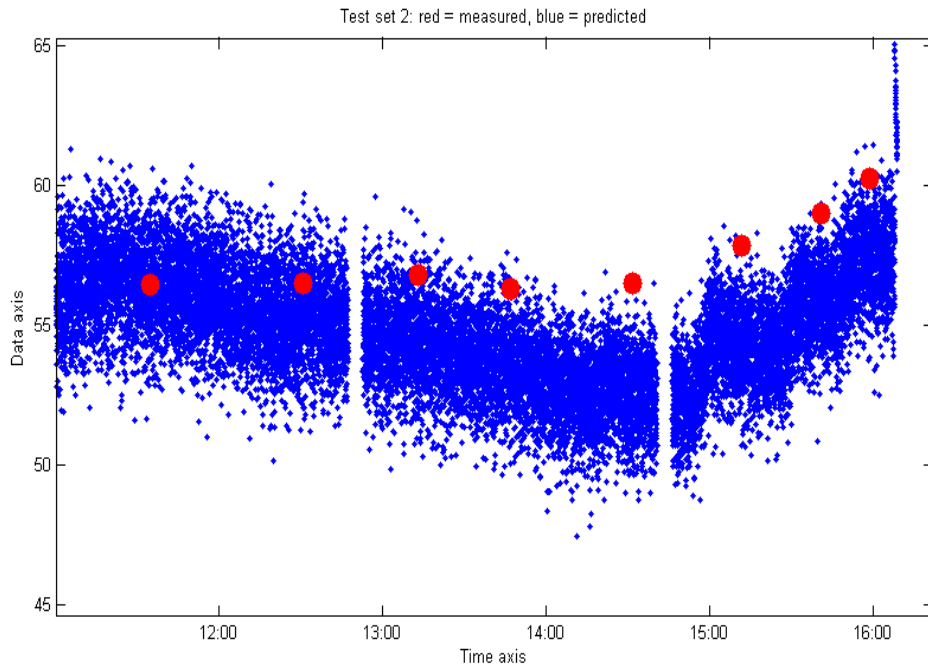
Kuva 25 Kalibrointisarjan kosteusennuste omille spektreilleen referenssikosteuden funktiona.

Kuvasta 25 nähdään, että referenssipisteitä oli 16 kpl ja kalibrointisarjan absorbanssispektrejä (siniset pisteet) oli 2659 kpl. Kun kalibrointisarjasta muodostetaan kosteusennuste omille spektreilleen referenssikosteuden funktiona, niin keskivirhe on noin 1.7 kosteusprosenttiyksikköä.

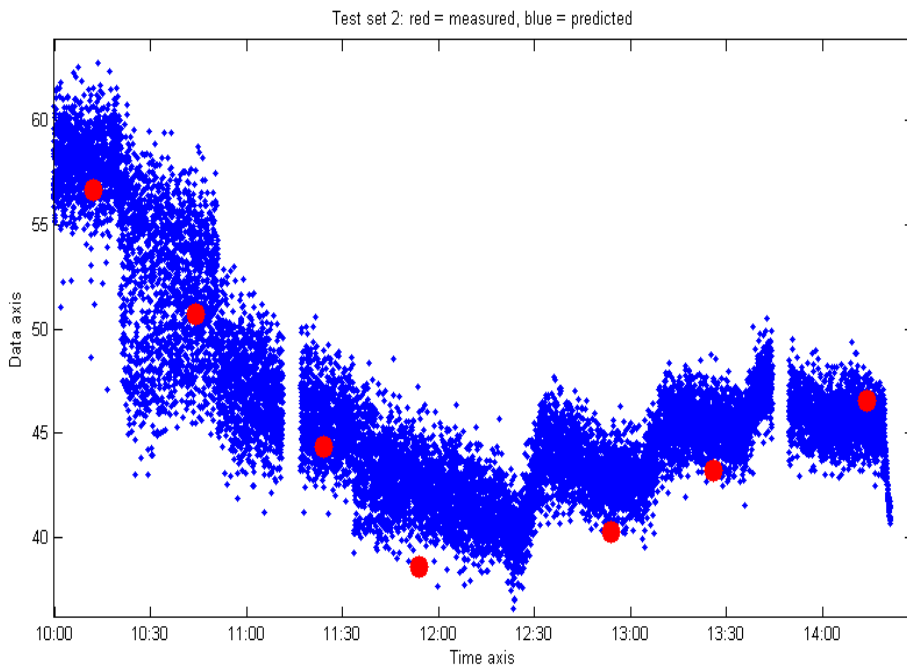


Kuva 26 Kalibrointisarjan kosteusennuste omille spektreilleen referenssikosteuden funktiona.

Kuvassa 26 nähdään, että siniset pisteet (yksittäisten spektrien ennusteet) jakautuvat tasaisesti punaisen viivan molemmille puolille ja mahdollisimman lähelle punaista viivaa, mikä kuvastaa mallin hyvyttä.



Kuva 27 Kosteusennuste testisarjan 7.3.2008 spektreille referenssikosteuden funktiona.

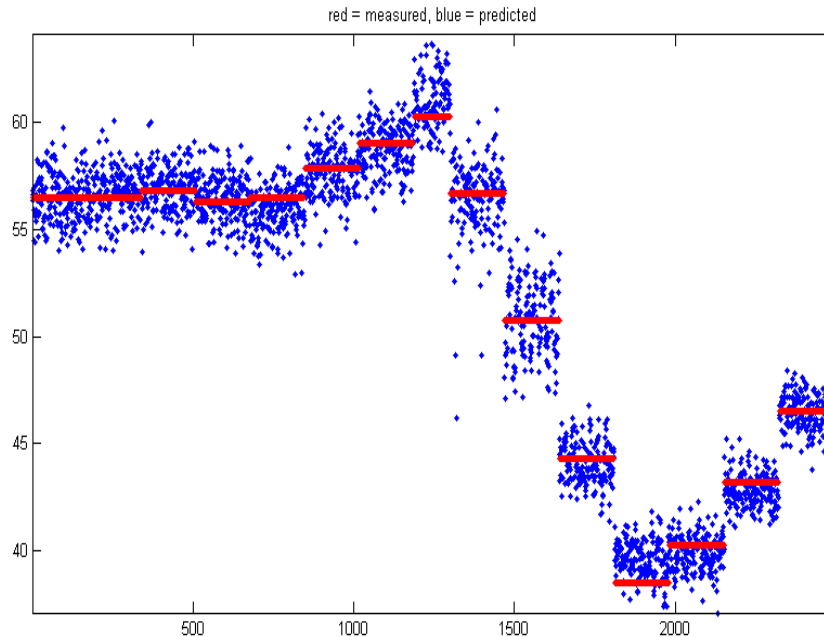


Kuva 28 Kosteusennuste testisarjan 11.3.2008 spektreille referenssikosteuden funktiona.

Mallin testisarjoina on siis kaikki data päiviltä 7.3.2008 ja 11.3.2008. Kuvista 27 ja 28 nähdään, että ennusteet seuraavat referenssejä suhteellisen hyvin ainakin trendin puolesta.

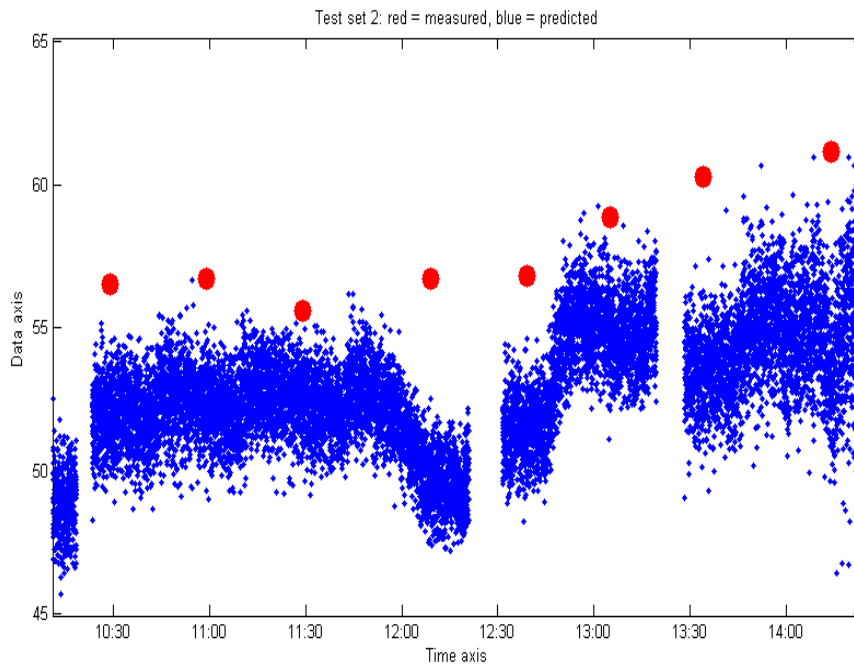
PLS-kosteusmalli #2, Kalibrointisarja päiviltä 7.3. ja 11.3., testisarjat päiviltä 10.3. ja 12.3.

Mallin #2 luomisessa käytettiin samoja parametrejä kuin mallin #1 luomisessa, ainoastaan mallin #1 testisarjapäivien dataa käytettiin nyt kalibrointisarjan luomisessa ja mallin #1 kalibrointisarjapäivien dataa käytettiin testisarjojen luomisessa.

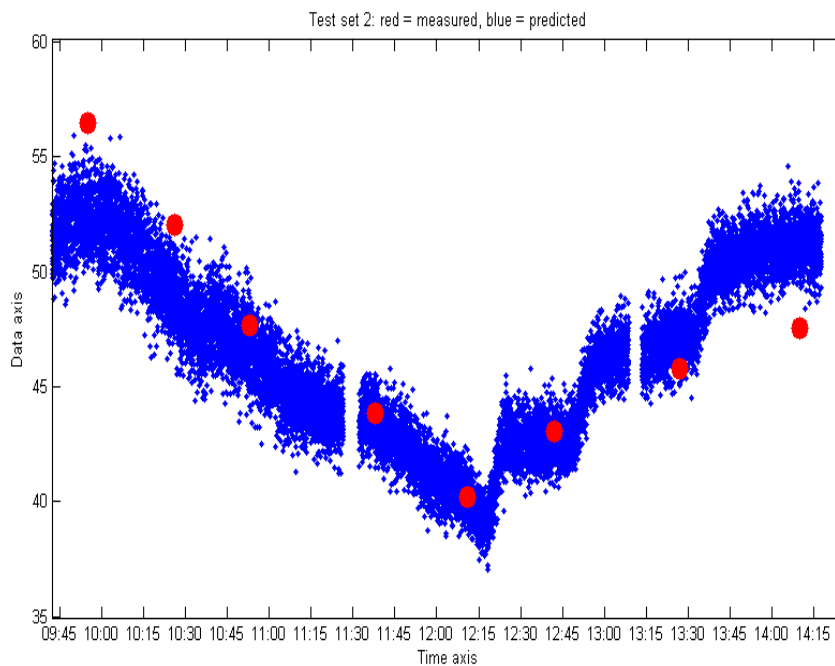


Kuva 29 Kalibrointisarjan kosteusennuste omille spektreilleen referenssikosteuden funktiona.

Mallin #2 referenssipisteitä oli 15 kpl ja kalibrointisarjan absorbanssispektrejä (siniset pisteet) 2495 kpl. Kuvassa 29 nähdään, että - kuten mallissa #1 - siniset pisteet (yksittäisten spektrien ennusteet) jakautuvat tasaisesti punaisen viivan molemmille puolille ja mahdollisimman lähelle punaista viivaa, mikä kuvastaa mallin hyvyyttä. Kun kalibrointisarjasta muodostetaan kosteusennuste omille spektreilleen referenssikosteuden funktiona, niin keskivirhe on noin 1.2 kosteusprosenttiyksikköä.



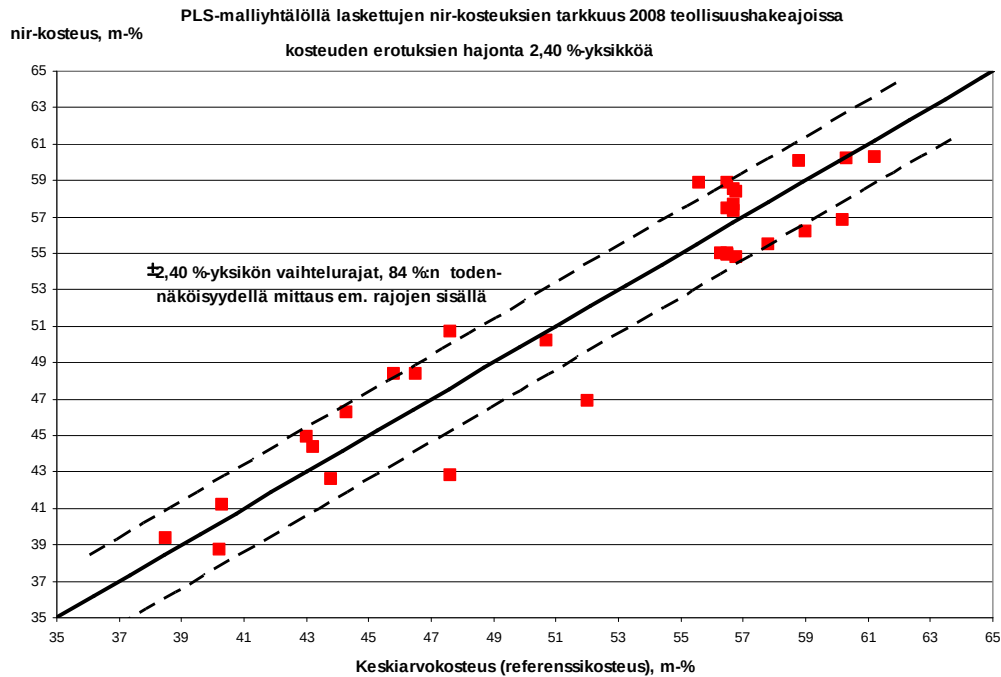
Kuva 30 Kosteusennuste testisarjan 10.3.2008 spektreille referenssikosteuden funktiona.



Kuva 31 Kosteusennuste testisarjan 12.3.2008 spektreille referenssikosteuden funktiona.

Kuvan 31 mukaisesti 12.3. ennustetulos on hyvä, mutta 10.3. ennuste ei (kuva 30). Syy saat-
taa olla siinä, että 10.3. erosi muista kevään ajopäivistä siten, että ajon alussa hallin lämpötila
oli + 5°C ja hakkeen noin + 1,7 °C. Tähän hakkeeseen lisättiin kuitenkin pakastettua haketta,
jolloin pintalämpötila laski pakkaselle (-1,5°C). Ennen pakastetun hakkeen lisäämistä hihnalla
olevan hakkeen pintalämpö oli + 0,9°C. Muinakin kevätpäivinä ajojen alussa hallin lämpötila
oli vähän plussan puolella (muutama aste), mutta linjalla alussa oleva hake oli vähän pakka-

sella; pakastetulla aloitettaessa jopa n. $-5,5^{\circ}\text{C}$. Toisaalta kaikissa ajoissa hake sulii varsin nopeasti kierrätyksen aikana.

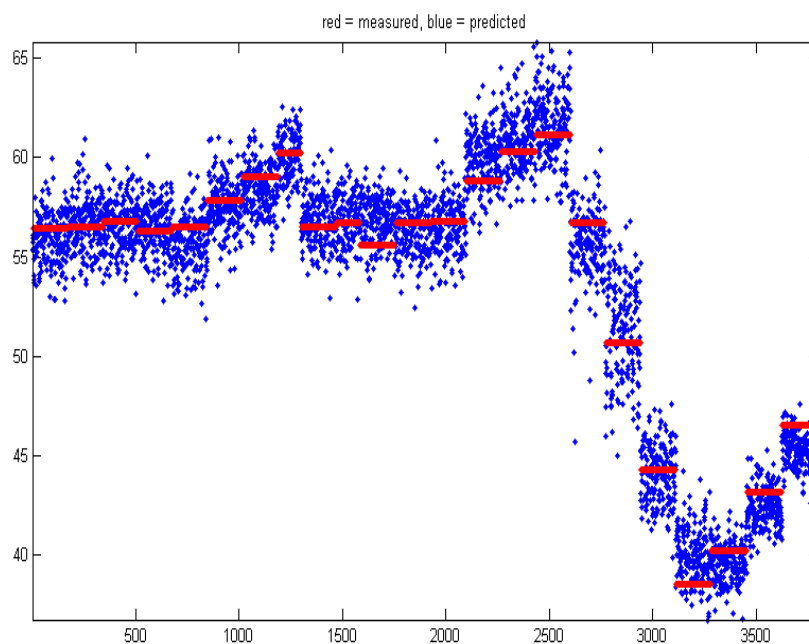


Kuva 32 Mallien #1 ja #2 ennustetarkkuus.

Kuvassa 32 nähdään mallien #1 ja #2 ennustetarkkuus: vaaka-akselilla on referenssikosteus ja pystyakselilla kahden minuutin (aikävälillä 2 min ennen ja 0 min jälkeen referenssikosteuden kennonajan) keskimääräinen ennustekosteus.

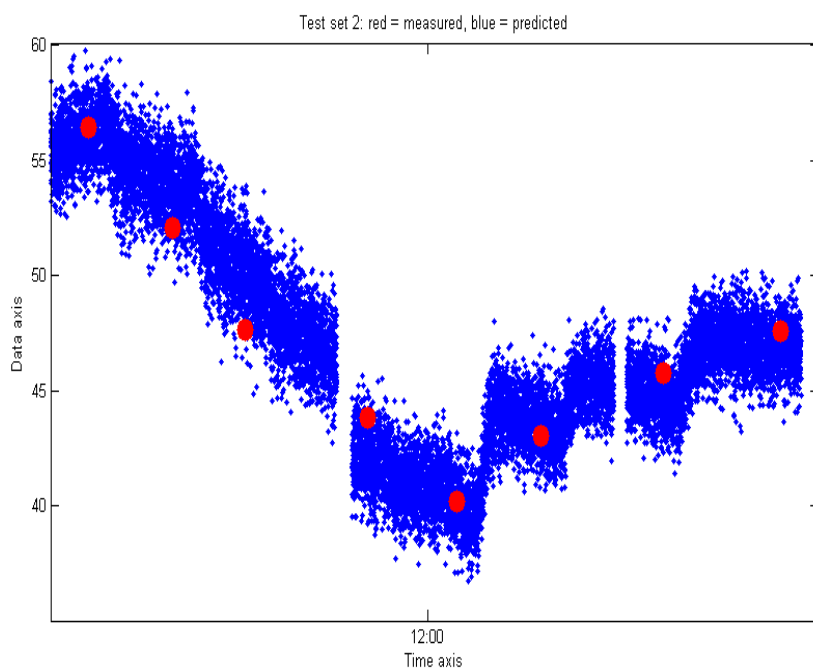
PLS-kosteusmalli #3, Kalibrointisarja päiviltä 7.3., 10.3. ja 11.3., testisarja päivältä 12.3.

Mallin #3 luomisessa käytettiin samoja parametrejä kuin mallien #1 ja #2 luomisessa, ainoastaan kalibrointisarjan luomisessa käytettiin nyt 3 päivää ja testisarjojen luomisessa vain 1 päivää.



Kuva 33 Kalibrointisarjan kosteusennuste omille spektreilleen referenssikosteuden funktiona.

Mallin #3 referenssipisteitä oli 23 kpl (punaiset viivat) ja kalibrointisarjan absorbanssispektrejä (siniset pisteet) 3797 kpl (kuva 33). Kun kalibrointisarjasta muodostetaan kosteusennuste omille spektreilleen referenssikosteuden funktiona, niin keskivirhe on noin 1.5 kosteusprosenttiyksikköä.

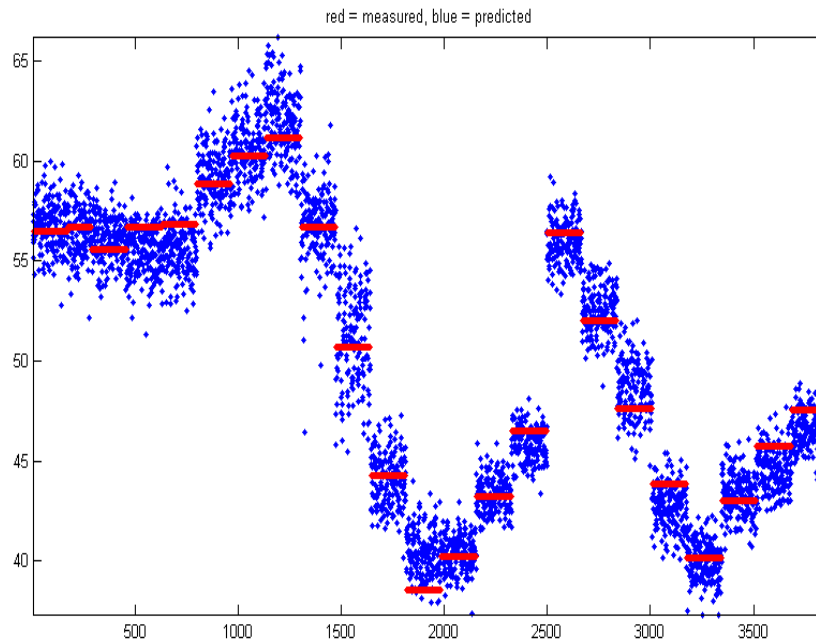


Kuva 34 Kosteusennuste testisarjan 12.3.2008 spektreille referenssikosteuden funktiona.

Kuvasta 34 nähdään, että ennuste seuraa referenssiarvoja suhteellisen hyvin.

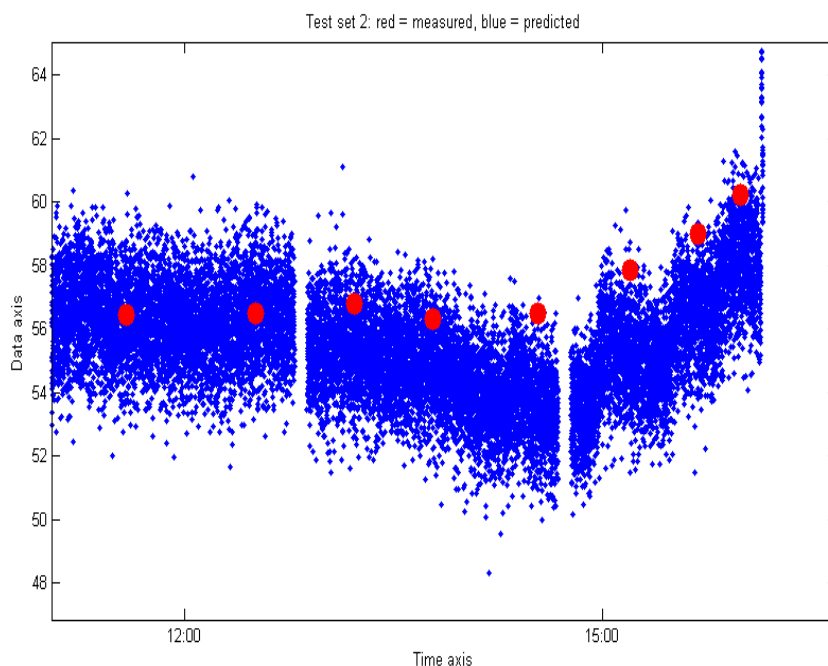
PLS-kosteusmalli #4, Kalibrointisarja päiviltä 10.3., 11.3. ja 12.3., testisarja päivältä 7.3.

Mallin #4 luomisessa käytettiin samoja parametrejä kuin mallin #3 luomisessa, ainoastaan kalibrointisarjan luomisessa käytetyt 3 päivää ja testisarjojen luomisessa käytetty 1 päivä oli valittu nyt eri tavalla kuin mallissa #3.



Kuva 35 Kalibrointisarjan kosteusennuste omille spektreilleen referenssikosteuden funktiona.

Mallin #3 referenssipisteitä oli 23 kpl (punaiset viivat) ja kalibrointisarjan absorbanssispektrejä (siniset pisteet) 3854 kpl (kuva 35). Kun kalibrointisarjasta muodostetaan kosteusennuste omille spektreilleen referenssikosteuden funktiona, niin keskivirhe on noin 1.5 kosteusprosenttiyksikköä.

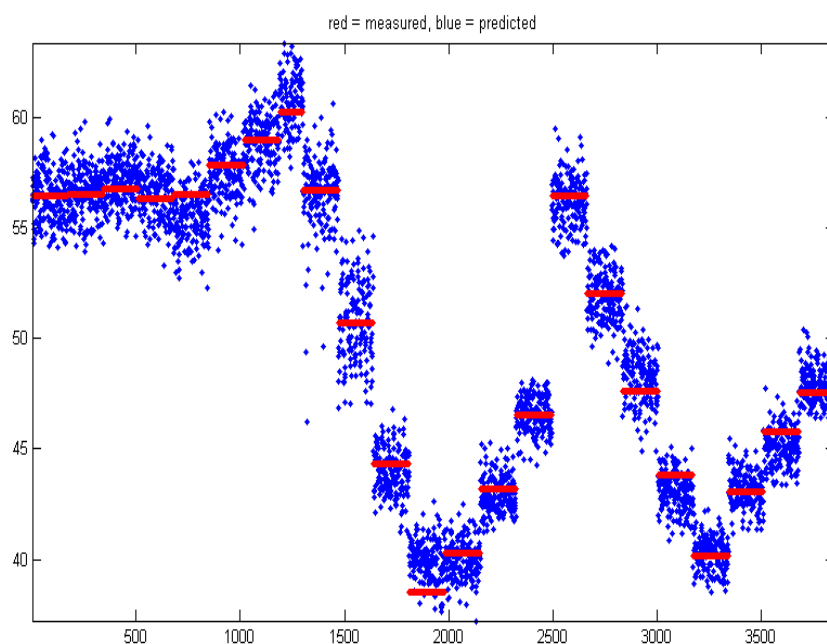


Kuva 36 Kosteusennuste testisarjan 7.3.2008 spektreille referenssikosteuden funktiona.

Kuvasta 36 nähdään, että ennuste seuraa referenssiarvoja suhteellisen hyvin.

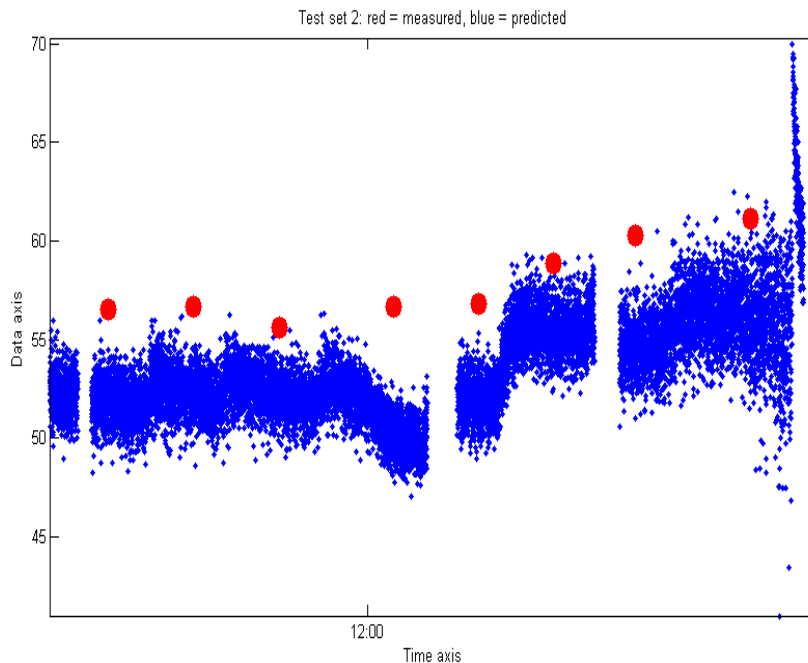
PLS-kosteusmalli #5, Kalibrointisarja päiviltä 7.3., 11.3. ja 12.3., testisarja päivältä 10.3.

Mallin #5 luomisessa käytettiin samoja parametrejä kuin mallien #3 ja #4 luomisessa, ainoastaan kalibrointisarjan luomisessa käytetyt 3 päivää ja testisarjojen luomisessa käytetty 1 päivä oli valittu nyt eri tavalla kuin malleissa #3 ja #4.



Kuva 37 Kalibrointisarjan kosteusennuste omille spektreilleen referenssikosteuden funktiona.

Mallin #5 referenssipisteitä oli 23 kpl (punaiset viivat) ja kalibrointisarjan absorbanssispektrejä (siniset pisteet) 3852 kpl (kuva 37). Kun kalibrointisarjasta muodostetaan kosteusennuste omille spektreilleen referenssikosteuden funktiona, niin keskivirhe on noin 1.9 kosteusprosenttiyksikköä.

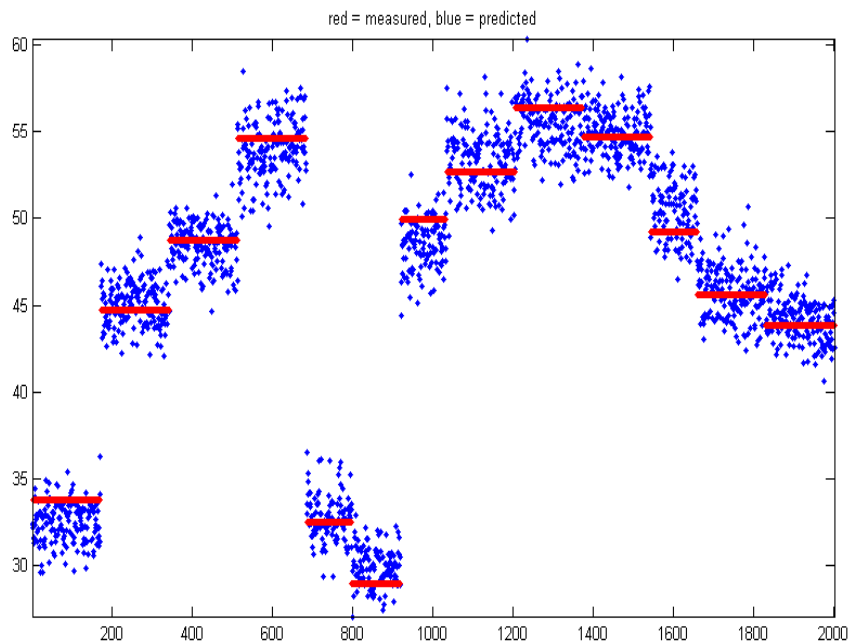


Kuva 38 Kosteusennuste testisarjan 10.3.2008 spektreille referenssikosteuden funktiona.

Kuvasta 38 nähdään, että ennuste seuraa referenssiarvoja trendin puolesta, mutta ennustekosteus on kauttaaltaan matalampi kuin referenssikosteus. Selitys tähän saattaa löytyä hakkeen lämpötilaeroista kuten mallin #2 tapauksessa.

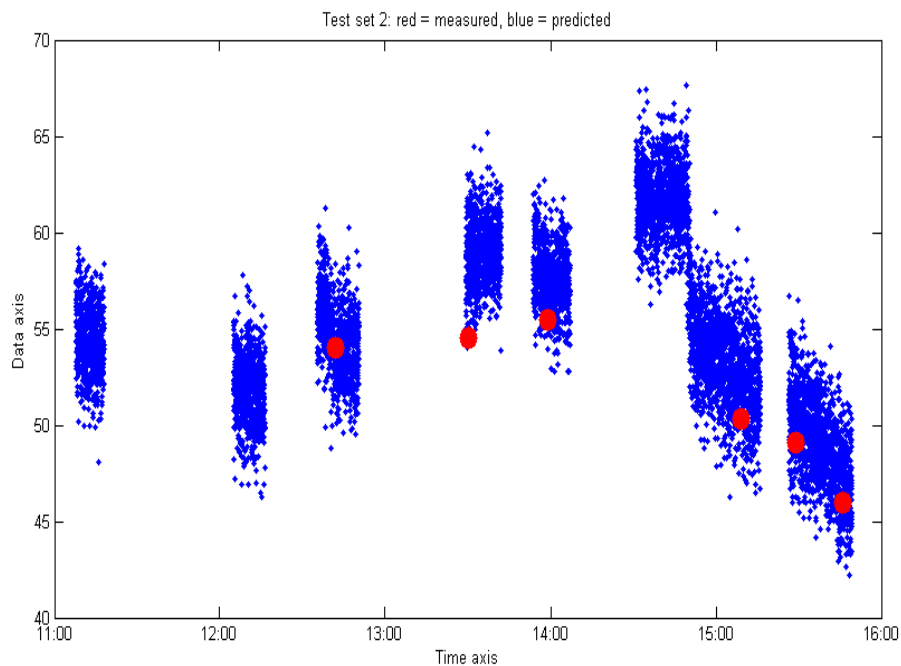
PLS-kosteusmalli #6, Kalibrointisarja päiviltä 25.10. ja 29.10., testisarja päiviltä 6.11. ja 10.3.

Mallin #6 luomisessa käytettiin samoja parametrejä kuin mallien #1-#2 luomisessa, ainoastaan kalibrointisarjan luomisessa käytetyt 2 päivää olivat nyt syksyiltä 2007 ja testisarjoissa käytetyt päivät olivat 6.11.2007 ja 10.3.2008 eli yksi syksyiltä ja yksi keväältä.

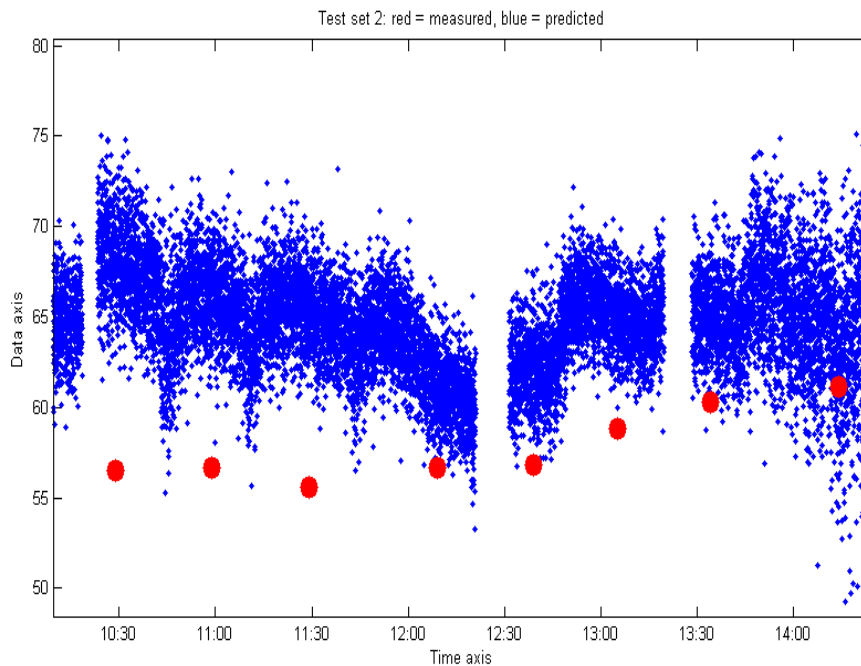


Kuva 39 Kalibrointisarjan kosteusennuste omille spektreilleen referenssikosteuden funktiona.

Mallin #5 referenssipisteitä oli 13 kpl (punaiset viivat) ja kalibrointisarjan absorbanssispektrejä (siniset pisteet) 2001 kpl (kuva 39). Kun kalibrointisarjasta muodostetaan kosteusennuste omille spektreilleen referenssikosteuden funktiona, niin keskivirhe on noin 1.6 kosteusprosenttiyksikköä.



Kuva 40 Kosteusennuste testisarjan 6.11.2007 spektreille referenssikosteuden funktiona.

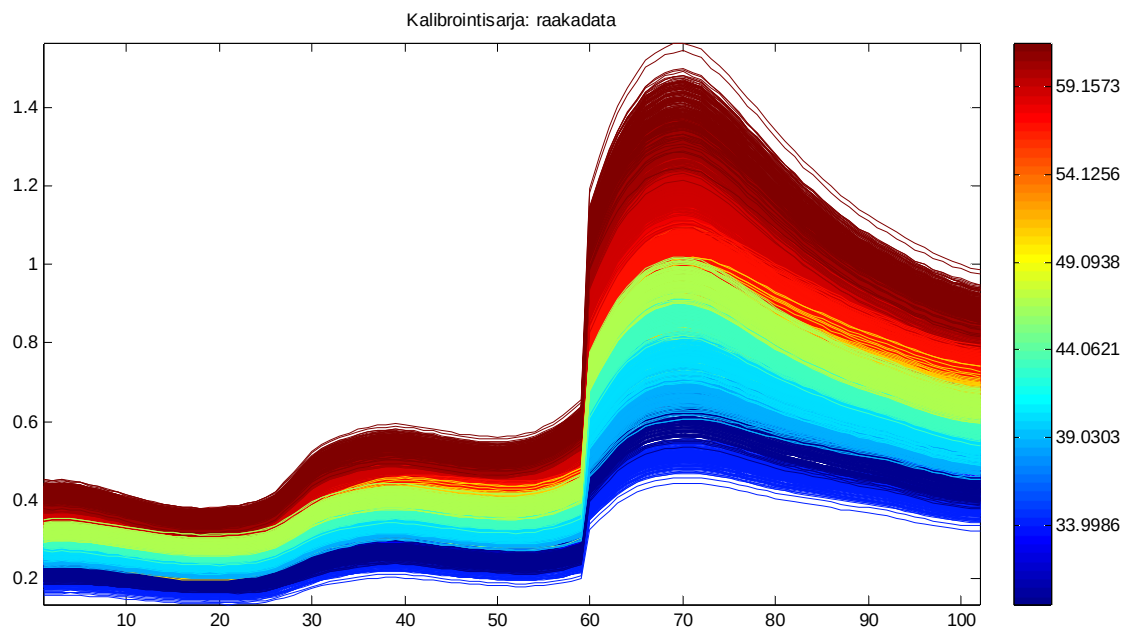


Kuva 41 Kosteusennuste testisarjan 10.3.2008 spektreille referenssikosteuden funktiona.

Kuvasta 40 nähdään, että ennuste seuraa referenssiarvoja syksyn testisarjassa, mutta kevään testisarjassa ennustekosteus on kauttaaltaan korkeampi kuin referenssikosteus (kuva 41). Syy saattaa olla siinä, että testisarjan 10.3.2008 perusmateriaali oli plussan puolella mutta kylmempää kuin lokakuun kalibrointisarjan perusmateriaalit, joiden lämpötila oli noin kymmenen astetta.

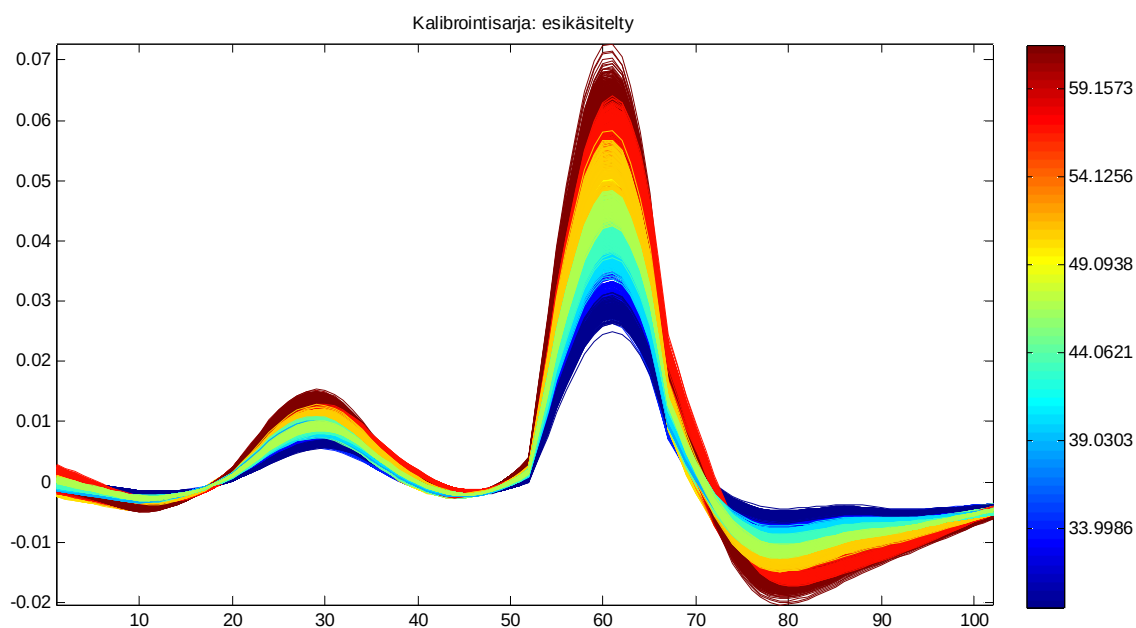
PLS-kosteusmalli #7, Kalibrointisarja päiviltä 25.10., 29.10., 7.3., 10.3. ja 11.3., testisarjat päiviltä 6.11. ja 12.3.

Viimeiseksi muodostettiin vielä sekä syksyn että kevään ajojen dataista kaksi 'isoa' PLS-kosteusmallia (#7 ja #8). siten, että aina osa päivistä (5 ajoa) käytettiin kalibrointisarjan muodostamiseen ja jäljelle jäävät päivät (2 ajoa) käytettiin testisarjojen muodostamiseen. Referenssinä käytettiin keskiarvokosteutta (ENAS-kosteuden ja massatasekosteuden keskiarvoa) ja malliin otettiin spektrejä aikavälillä 2 min ennen ja 0 min jälkeen referenssikosteuden kellonajan. Kalibroinnin PLS-menetelmässä käytettiin nyt 3 latenttia muuttujaa ja esikäsittelymenetelminä 1. Derivointia ja 2. OSC-korjausta (1 osc-komponentti).



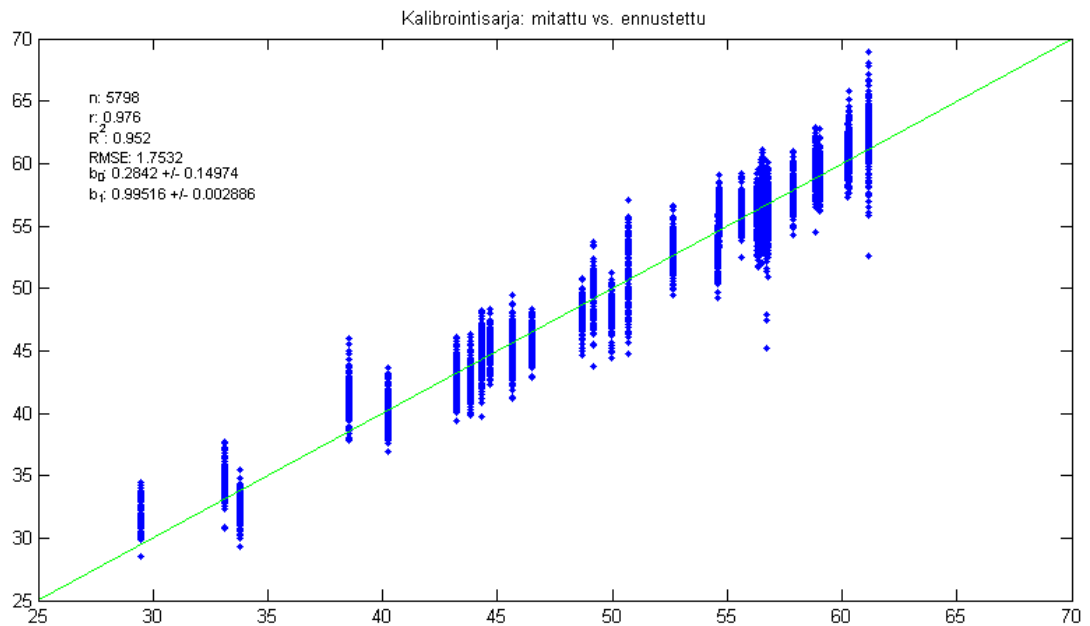
Kuva 42 Kalibrointisarjan raakaspektrit

Kuvan 42 värjäyksestä nähdään jälleen, että tulos on looginen: ylhäällä ovat 'kosteat' ja alhaalla 'kuivat' spektrit.



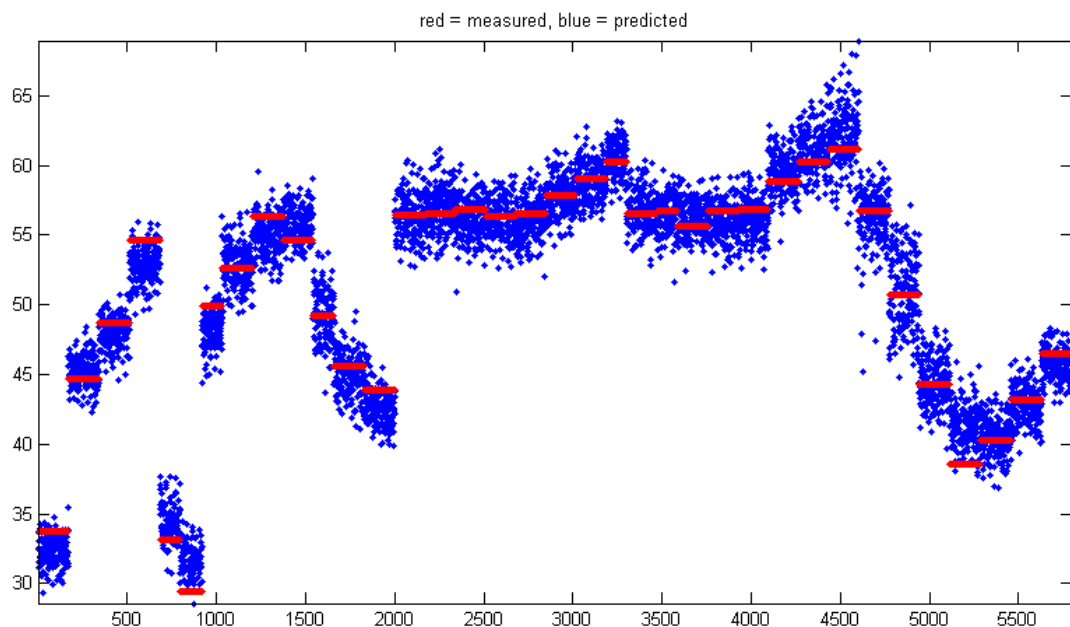
Kuva 43 Kalibrointisarjan esikäsittelyt spektrit.

Kuvassa 43 nähdään derivoidut ja OSC-esikäsittelyt spektrit. Värjäyksen tulos on edelleen looginen: ylhäällä ovat 'kosteat' ja alhaalla 'kuivat' spektrit vaaka-akselin kohdassa noin 60.



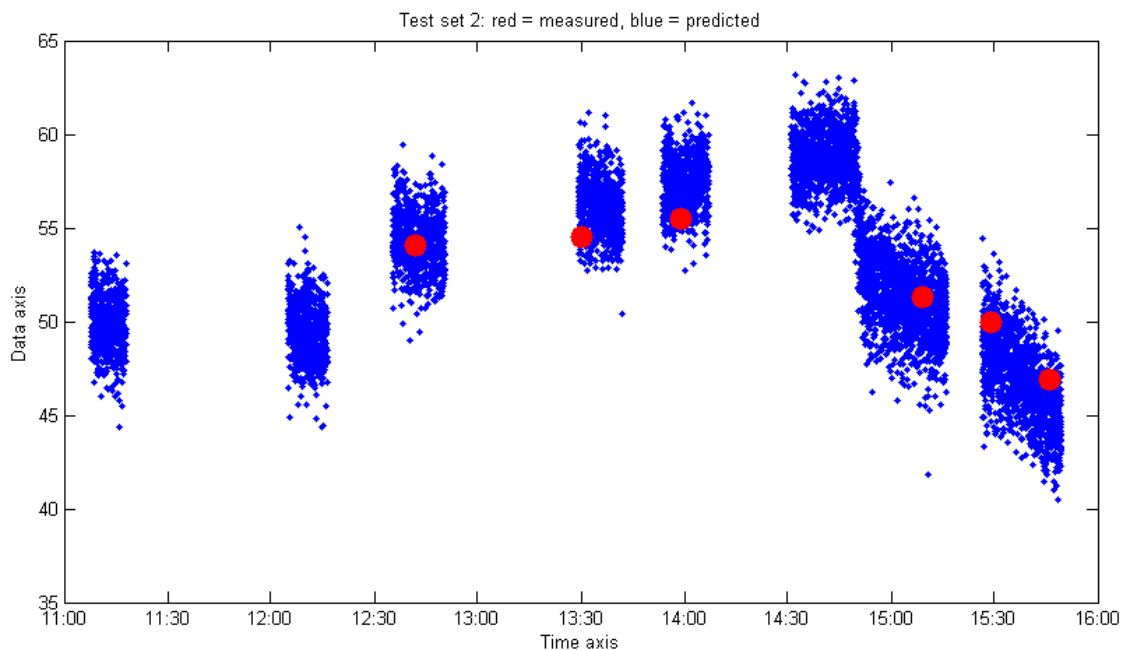
Kuva 44 Kalibroitamisarjan kosteusennuste omille spektreilleen referenssikosteuden funktiona.

Kuvasta 44 nähdään, että referenssipisteitä oli 36 kpl ja kalibroitamisarjan absorbanssispektrejä (siniset pisteet) oli 5798 kpl. Kun kalibroitamisarjasta muodostetaan kosteusennuste omille spektreilleen referenssikosteuden funktiona, niin keskivirhe on noin 1.8 kosteusprosenttiyksikköä.

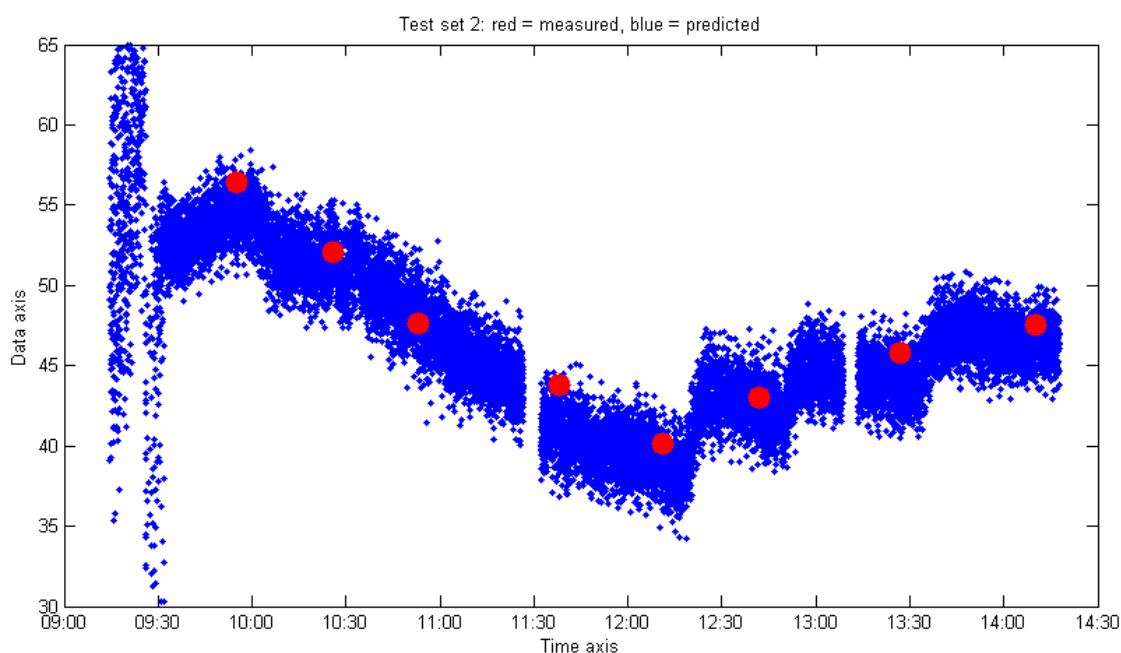


Kuva 45 Kalibroitamisarjan kosteusennuste omille spektreilleen referenssikosteuden funktiona.

Kuvassa 45 nähdään, että siniset pisteet (yksittäisten spektrien ennusteet) jakautuvat tasaisesti punaisen viivan molemmille puolille ja mahdollisimman lähelle punaista viivaa, mikä kuvastaa mallin hyvyttä.



Kuva 46 Kosteusennuste testisarjan 6.11.2007 spektreille referenssikosteuden funktiona.

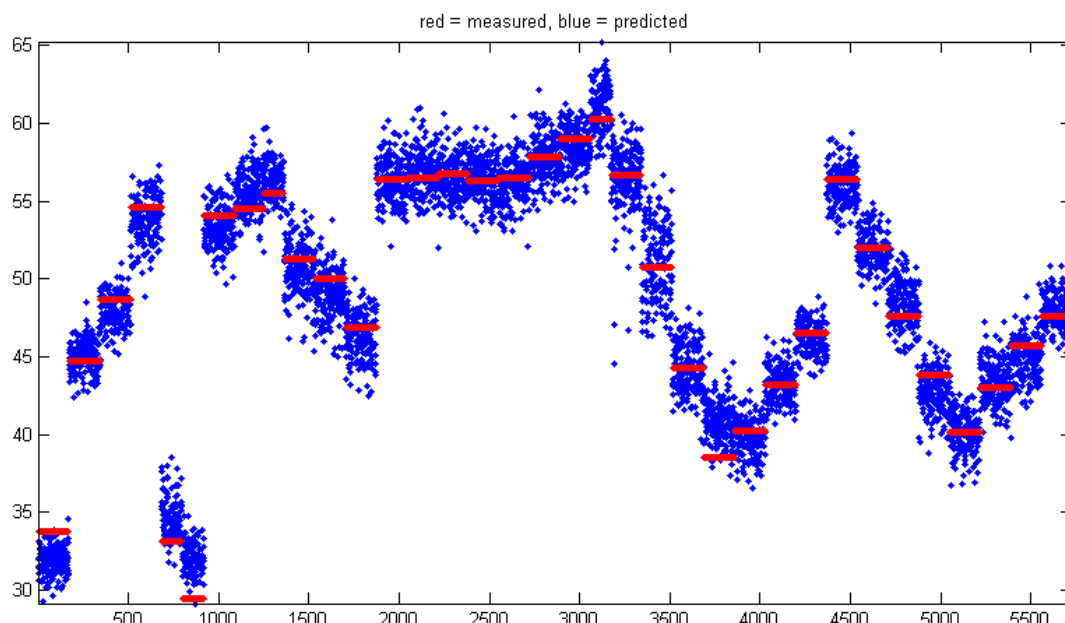


Kuva 47 Kosteusennuste testisarjan 12.3.2008 spektreille referenssikosteuden funktiona.

Mallin testisarjoina on siis kaikki data päiviltä 6.11.2007 ja 12.3.2008. Kuvista 46 ja 47 nähdään, että ennusteet seuraavat referenssejä hyvin.

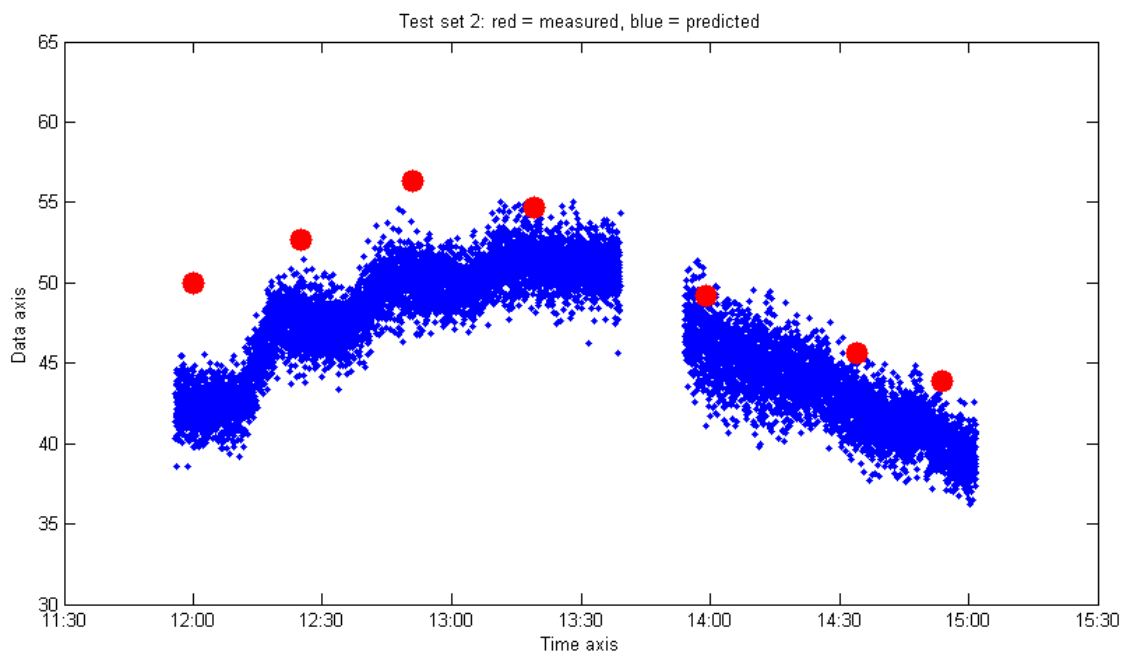
PLS-kosteusmalli #8, Kalibrointisarja päiviltä 25.10., 6.11., 7.3., 11.3. ja 12.3., testisarjat päiviltä 29.10. ja 10.3.

Mallin #8 luomisessa käytettiin samoja parametrejä kuin mallin #7 luomisessa, ainoastaan kalibrointisarjan luomisessa käytetyt 5 päivää ja testisarjojen luomisessa käytetyt 2 päivää oli valittu nyt eri tavalla kuin mallissa #7.

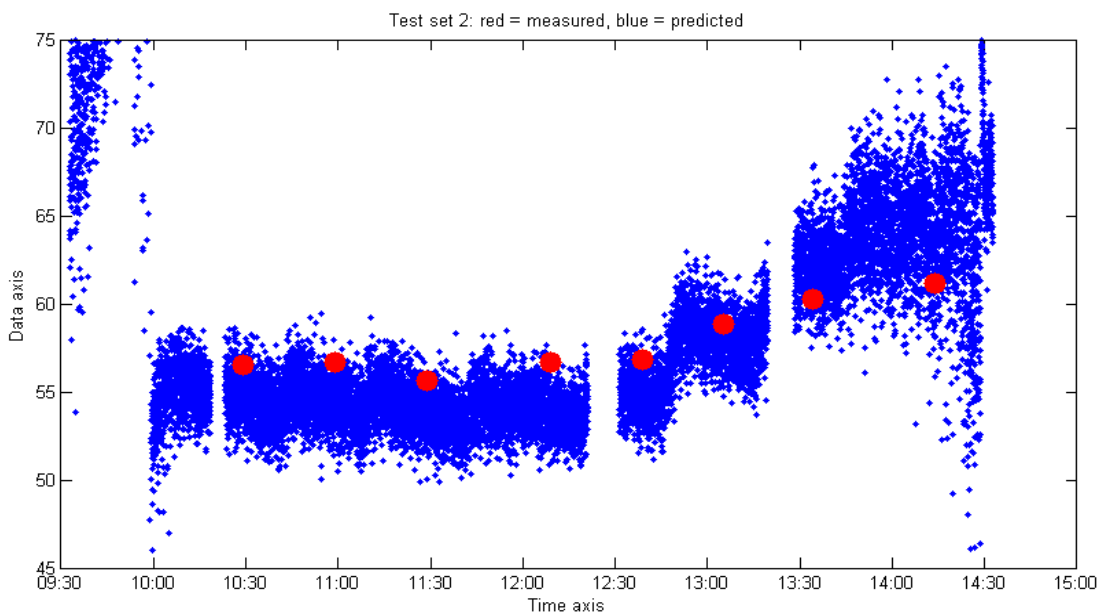


Kuva 48 Kalibrointisarjan kosteusennuste omille spektreilleen referenssikosteuden funktiona.

Mallin #8 referenssipisteitä oli 35 kpl (punaiset viivat) ja kalibrointisarjan absorbanssispektrejä (siniset pisteet) 5726 kpl (kuva 48). Kun kalibrointisarjasta muodostetaan kosteusennuste omille spektreilleen referenssikosteuden funktiona, niin keskivirhe on noin 1.6 kosteusprosenttiyksikköä.

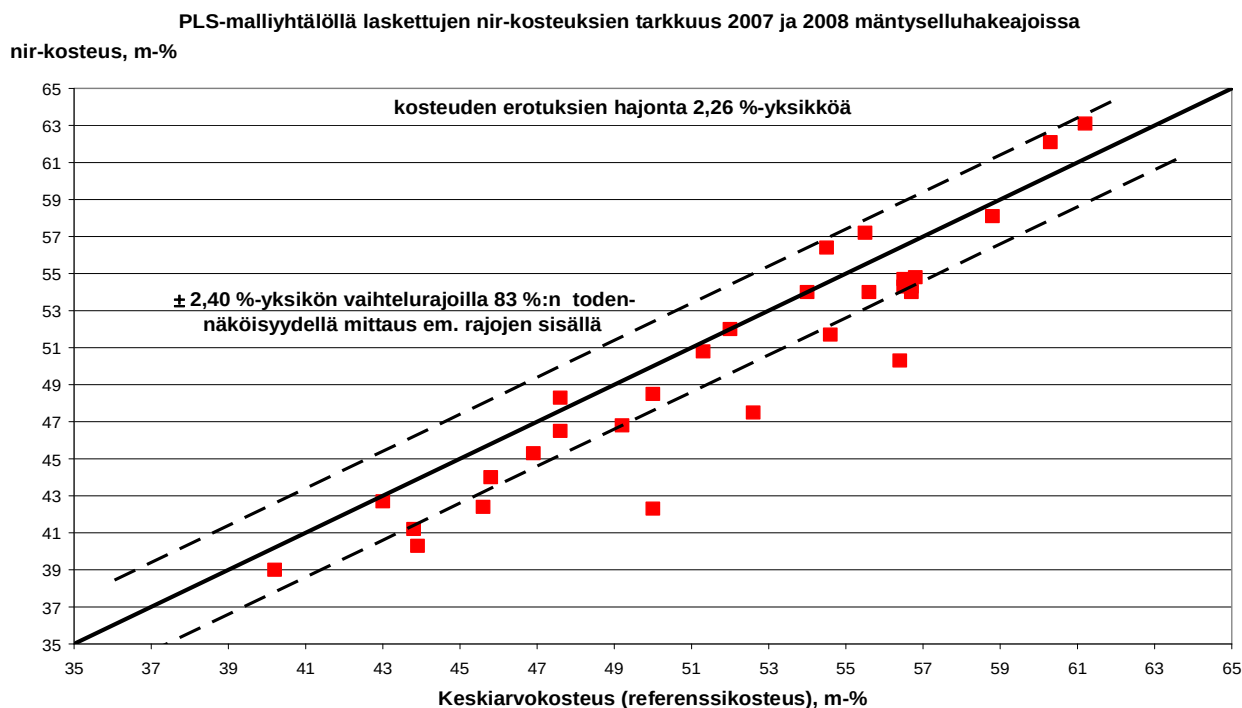


Kuva 49 Kosteusennuste testisarjan 29.10.2007 spektreille ja referenssikosteudet.



Kuva 50 Kosteusennuste testisarjan 10.3.2008 spektreille ja referenssikosteudet.

Mallin testisarjoina on siis nyt kaikki data päiviltä 29.10.2007 ja 10.3.2008. Kuvista 49 ja 50 nähdään, että ennusteet seuraavat referenssejä, mutta huomattavia tasoeroja on 29.10. ennustekosteuksien ja referenssikosteuksien välillä sekä 10.3. ennustekosteuksien hajonta kasvaa suureksi klo 14 maissa. 10.3. hajonta saattaa selittyä hakkeen lämpötilaeroilla kuten mallin #2 tapauksessa. Kun taas 29.10. tasoterot taas voivat johtua siitä, että syksyn ajoissa lisätty vesimäärä imeytyi hakevirtaan parhaiten 29.10, tällöin malli näyttää "liian" kuivia arvoja kostutusvaiheessa nir -mittauksen pintamittausluonteeseen vuoksi. Imeytymisen nopeutuminen taas saattoi johtua siitä, että kostutusvedessä oli vähän enemmän pinta-aktiivista ainetta (Deconex) kuin muissa ajoissa.

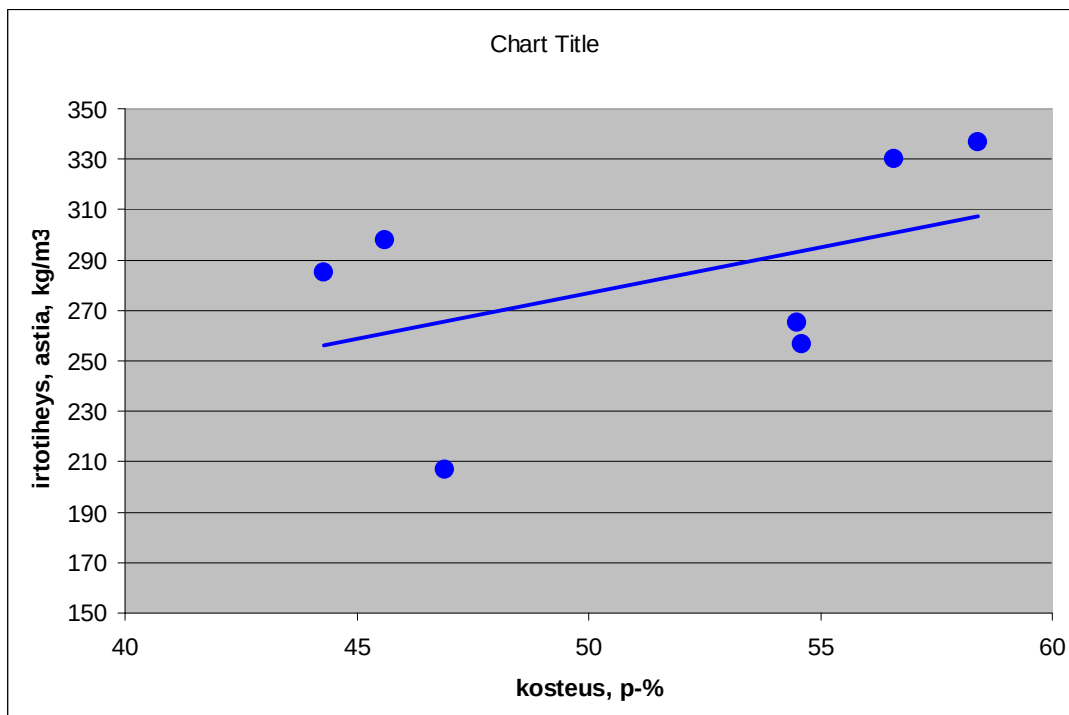


Kuva 51 Mallien #7 ja #8 ennustetarkkuus

Kuvassa 51 nähdään isojen mallien #7 ja #8 ennustetarkkuus: vaaka-akselilla on referenssikosteus ja pystyakselilla kahden minuutin (aikavälillä 2 min ennen ja 0 min jälkeen referenssikosteuden kellonajan) keskimääräinen ennustekosteus.

PLS-tiheysmalli #51, kalibrointisarja 17.10.2007

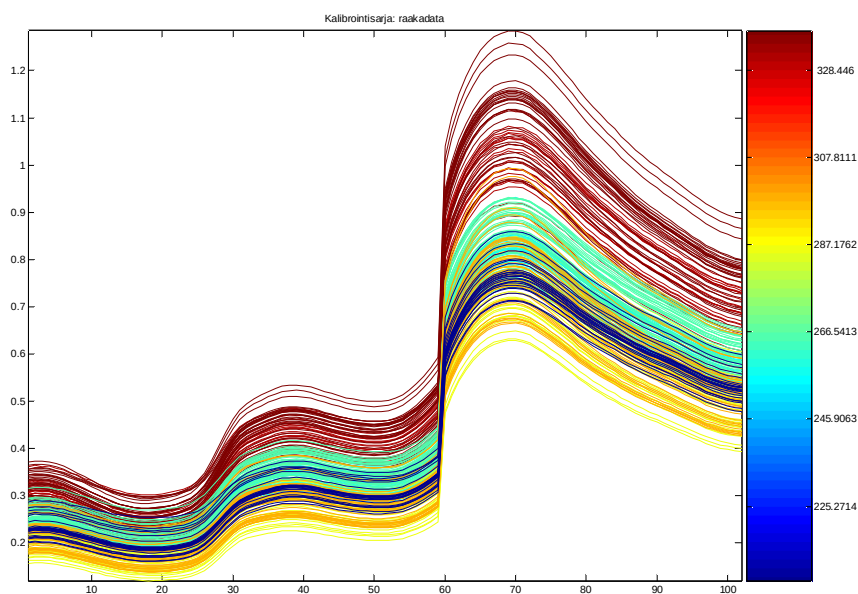
Syksyllä 2007 tehdyissä selluhakkeen kasa-ajoissa noin metrin kaistaletta eri tyyppisiä selluhakkeita ajettiin edestakaisin linjalla ja näin muodostettiin kosteudesta riippumattomia tiheysnäytteitä tiheysmallinnusta varten. Selluhakkeet olivat koivuhake1, koivuhake2, kuusihake1, kuusihake2, saharake1 (mäntyhake), saharake2 (mäntyhake) sekä mekaaninen massa (kuusihake). Tiheyden riippumattomuus kosteudesta varmistettiin mittaamalla kustakin selluhake-tyypistä ENAS-kosteusnäyte laboratorioissa ja vertaamalla sitä astiassa mitattuun irtotiheyteen.



Kuva 52 Irtotiheys (astia) ENAS-kosteuden funktiona.

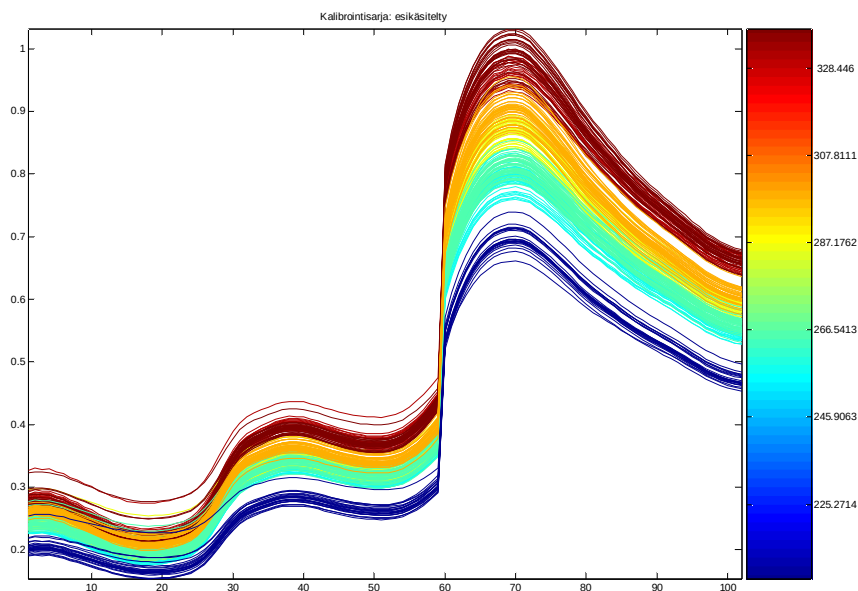
Kuvassa 52 nähdään, että vaikka trendilinja saadaan muodostettua, pisteet ovat kaukana siitä, eli irtotiheyden ja ENAS-kosteuden välillä ei ollut korrelaatiota kasa-ajoissa.

Päivän 17.10. kasa-ajodatasta muodostettiin kokeiluluontoinen PLS-tiheysmalli. Referenssinä käytettiin tietyllä astialla ja vaa'alla määritettyä 'irtotiheys (astia)'-tiheysarvoa. Malliin otettiin spektrejä aikavälillä 1 min ennen ja 1 min jälkeen referenssitheyden arvioidun kellonajan. Kalibroinnin PLS-menetelmässä käytettiin 6 latentia muuttujaa ja esikäsittelymenetelmänä OSC-korjausta (2 osc-komponenttia).



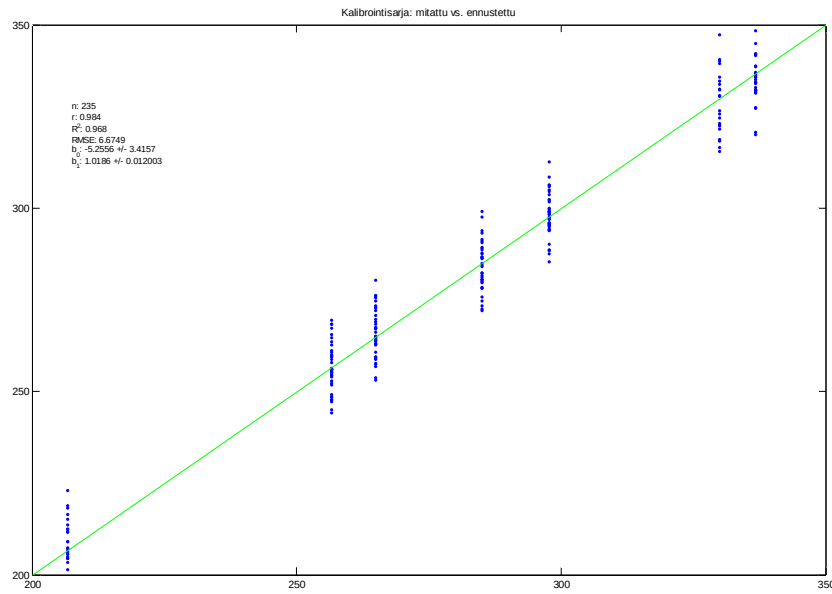
Kuva 53 Kalibrointisarjan raakaspektrit.

Kuvassa 53 nähdään selluhakkeen kasa-ajojen raakaspektrit, jotka on värjätty irtotiheyden (astia) mukaan. Värjäyksestä nähdään, että tulos on ongelmallinen: Noin 290 kg/m³ irtotiheyttä vastaavien spektrien (oranssi väri) absorbanssit ovat matalampia kuin noin 220 kg/m³ irtotiheyttä vastaavien spektrit (sininen). Toisaalta noin 300 kg/m³ irtotiheyttä vastaavien spektrien (tummanpunainen) absorbanssit ovat korkeampia kuin noin 220 kg/m³ irtotiheyttä vastaavien spektrit (sininen). Tämä on ristiriitaista.



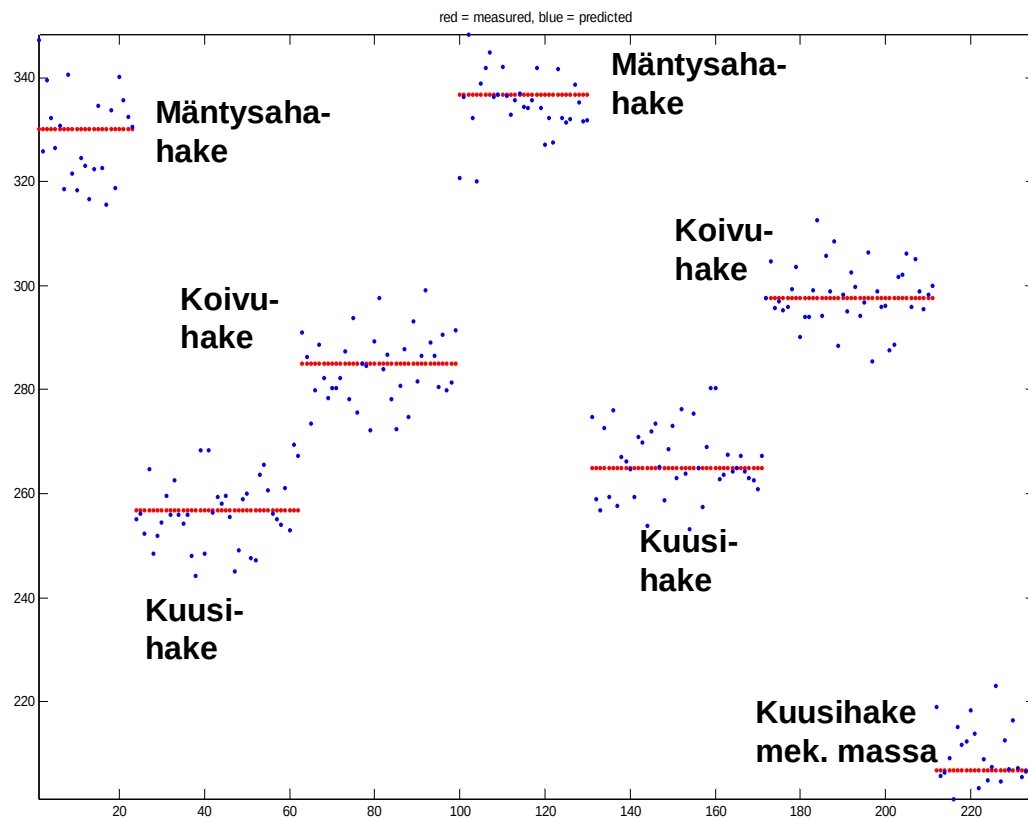
Kuva 54 Kalibrointisarjan esikäsittelyt spektrit.

Kuvasta 54 nähdään, että tiheyksiä vastaavat spektrikimput ovat esikäsittelyn jälkeen hyvässä järjestyksessä: Suurempia tiheysarvoja vastaavat absorbanssit (punaiseen väriin päin) ovat suurempia kuin pienempiä tiheysarvoja vastaavat absorbanssit (siniseen väriin päin).



Kuva 55 Kalibrointisarjan kosteusennuste omille spektreilleen referenssitiheyden funktiona.

Kuvasta 56 nähdään, että referenssipisteitä oli 7 kpl ja kalibrointi sarjan absorbanssispektrejä (siniset pisteet) oli 235 kpl. Kun kalibrointisarjasta muodostetaan tiheysennuste omille spektreilleen referenssitiheyden funktiona, niin keskivirhe on noin 6.7 kg/m^3 .



Kuva 56 Kalibrointisarjan tiheysennuste omille spektreilleen referenssitiheyden funktiona.

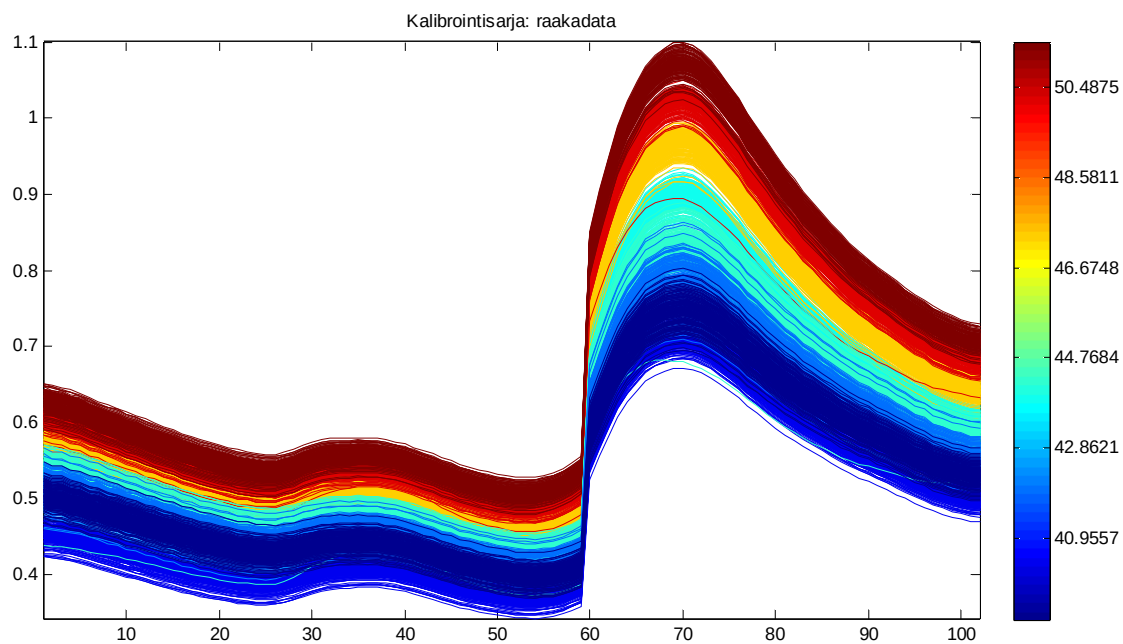
Kuvassa 56 nähdään, että siniset pisteet (yksittäisten spektrien ennusteet) jakautuvat tasaisesti punaisen viivan molemmille puolille ja mahdollisimman lähelle punaista viivaa, mikä kuvastaa mallin hyvyttä. Kuitenkin vaikka irtotiheyttä halutaan mitata, niin irtotiheys menee suunnilleen puulajin mukaan, joten ei voida olla varmoja siitä mitä ennustetaan. NIR-tekniikka ennustaa helposti kosteutta tiheyden asemesta. Myös hakkeen vaaleus vaikuttaa tiheysennusteeseen.

4.2.1.1 Metsähakkeen mittaukset

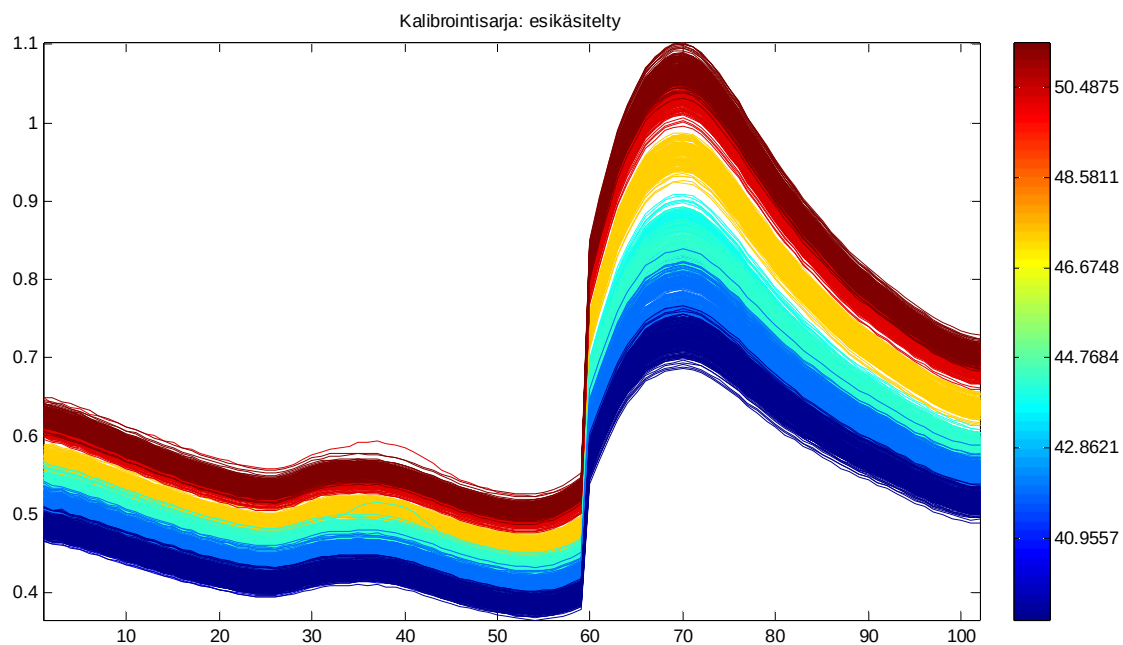
Metsähakkeelle tehtiin vastaavat pls- kalibrointimallit kosteuden ennustamiseksi kuin selluhakkeellekin.

PLS-kosteusmalli #101, kalibrointisarja 7.11.2007, testisarja 8.11.2007

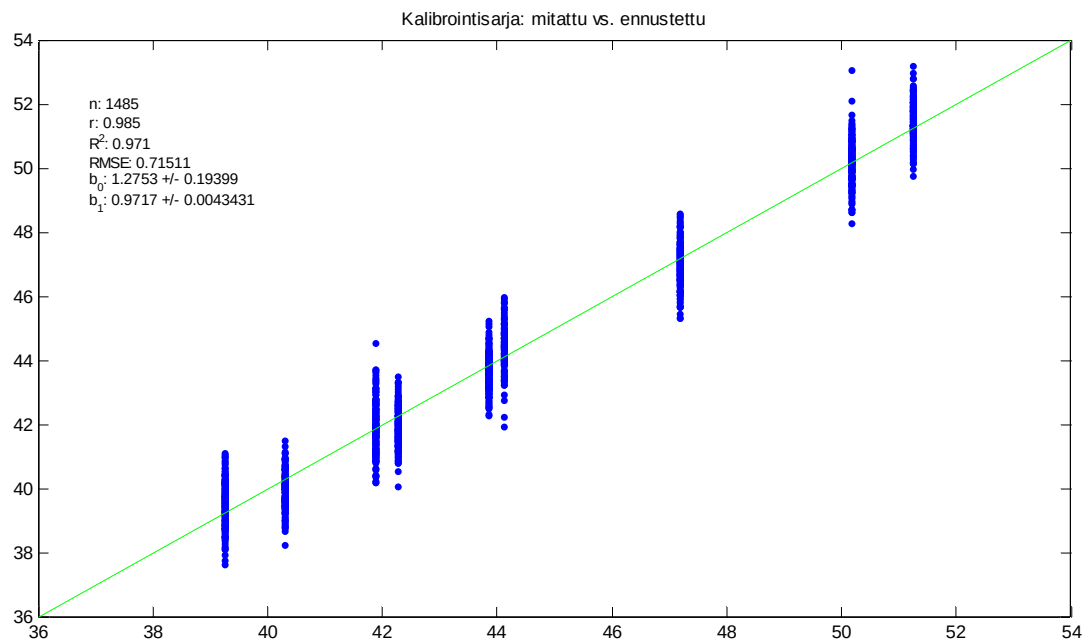
Syksyllä 2007 tehdyissä metsähakkeen kostutusajoissa massaa oli ensin kostutettu määräajoin ja sitten poistettu osa määrästä massasta ja korvattu kuivalla massalla. Kostutusajojen tuloksista luotiin 2 PLS-mallia (#101 ja #102), joiden referenssinä käytettiin keskiarvokosteutta (ENAS-kosteuden ja massatasekosteuden keskiarvoa) ja malliin otettiin spektrejä aikavälillä 2 min ennen ja 0 min jälkeen referenssikosteuden kellonajan. Mallin #101 kalibrointidata otettiin päivältä 7.11.2007 ja testidata päivältä 8.11.2007. Kalibroinnin PLS-menetelmässä käytettiin 6 latenttia muuttujaa ja esikäsittelymenetelmänä OSC-korjausta (2 osc-komponenttia).



Kuva 57 Kalibrointisarjan raakaspektrit.

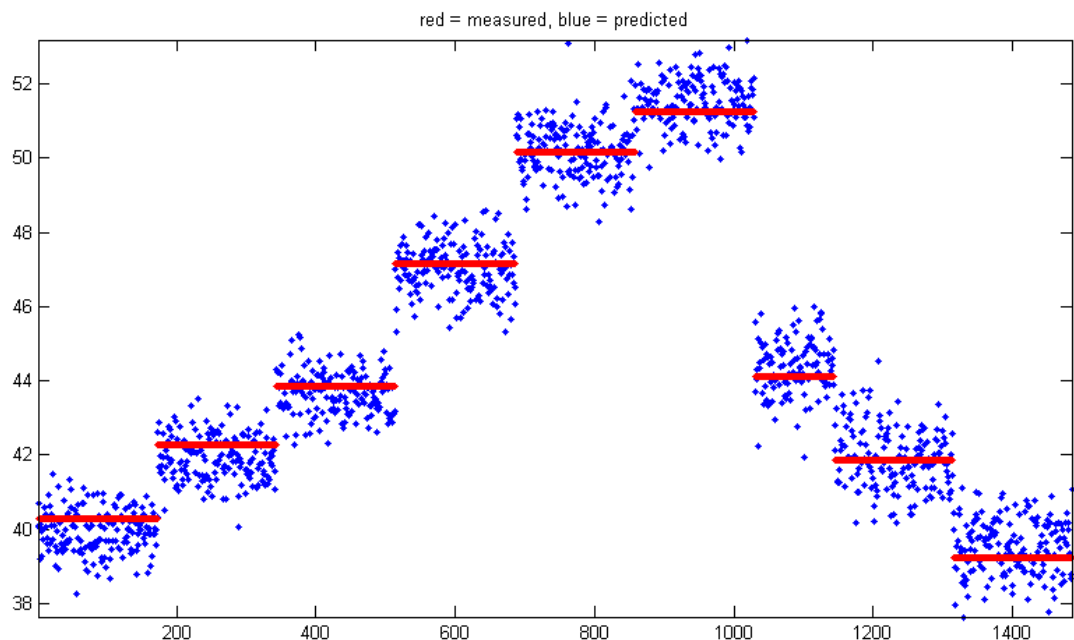


Kuva 58 Kalibrointisarjan esikäsiteltyt spektrit.



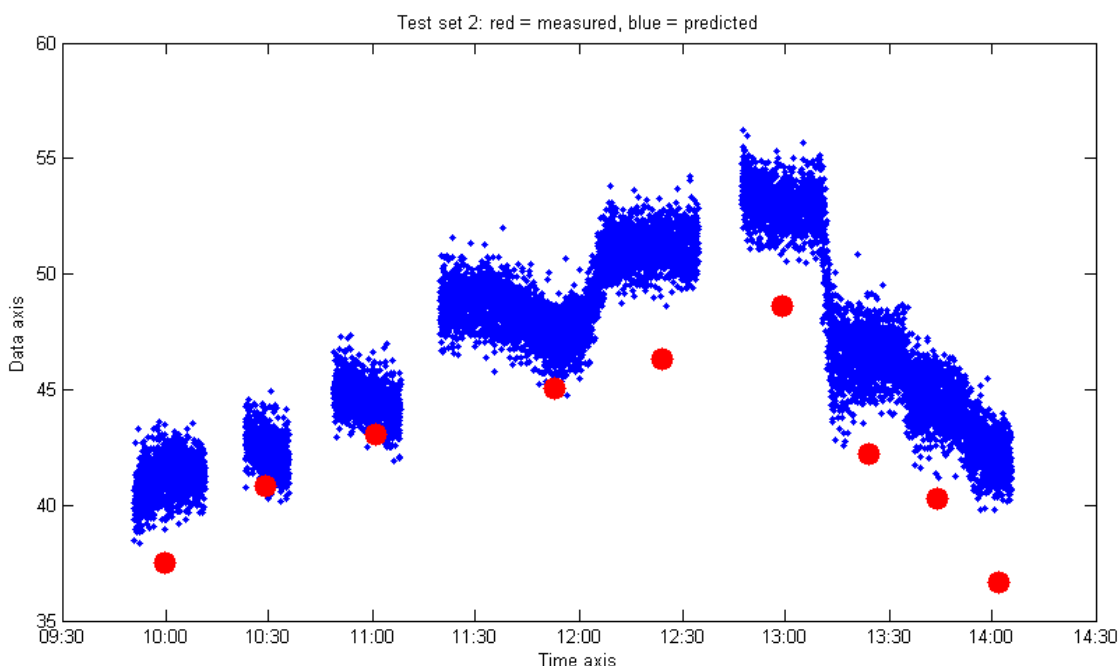
Kuva 59 Kalibrointisarjan kosteusennuste omille spektreilleen referenssikosteuden funktiona.

Kuvasta 59 nähdään, että referenssipisteitä oli 9 kpl ja kalibrointi sarjan absorbanssispektrejä (siniset pisteet) oli 1485 kpl. Kun kalibrointisarjasta muodostetaan kosteusennuste omille spektreilleen referenssikosteuden funktiona, niin keskivirhe on noin 0.7 kosteusprosenttiyksikköä.



Kuva 60 Kalibrointisarjan kosteusennuste omille spektreilleen referenssikosteuden funktiona.

Kuvassa 6+0 nähdään, että siniset pisteet (yksittäisten spektrien ennusteet) jakautuvat tasaisesti punaisen viivan molemmille puolille ja mahdollisimman lähelle punaista viivaa, mikä kuvastaa mallin hyvyttä.

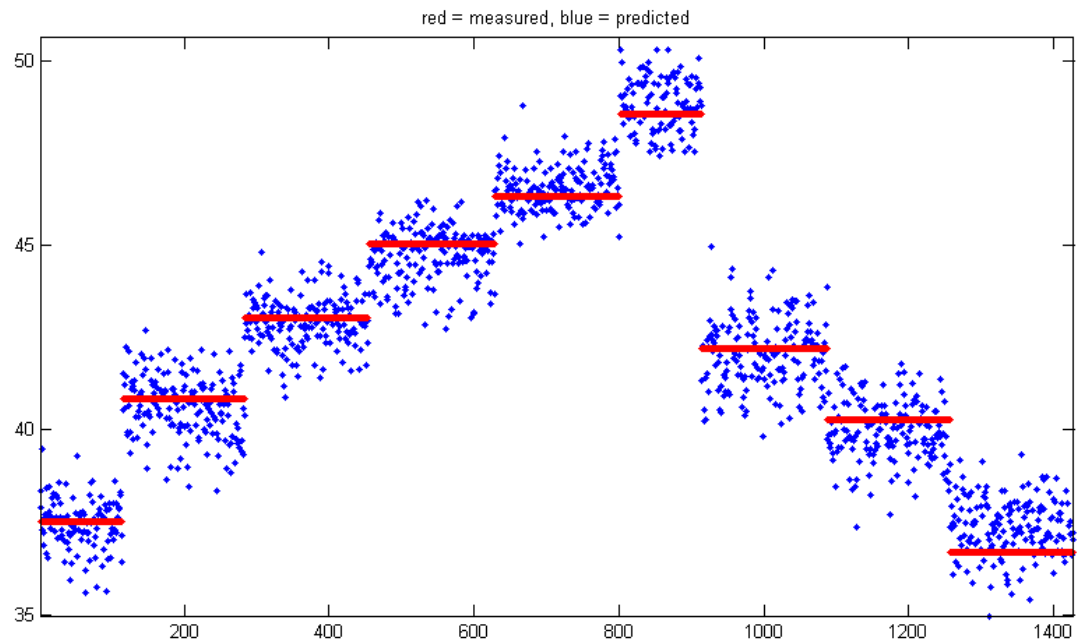


Kuva 61 Kosteusennuste testisarjan 8.11.2007 spektreille referenssikosteuden funktiona.

Mallin testisarjana on siis kaikki data päivältä 8.11.2007. Kuvasta 61 nähdään, että testisarjalla ennustekosteudet ovat koko ajan suurempia kuin referenssikosteudet, vaikka oikea trendi silti löytyy. Tämä saattaa kuvastaa NIR-mittauksen pintamittausluonnetta – 8.11. – ajon metsähake sisälsi enemmän hienoaainesta kuin 7.11. – ajon hake ja hienoaines sitoo paremmin kosteutta ja lajittuu hihnoilla pohjalle. Kun 7.11. – datan perusteella tehdään ennustemalli, niin se antaa ”kosteamman” mallin so. myös kosteammat ennustepisteet 8.11. testisarjalle.

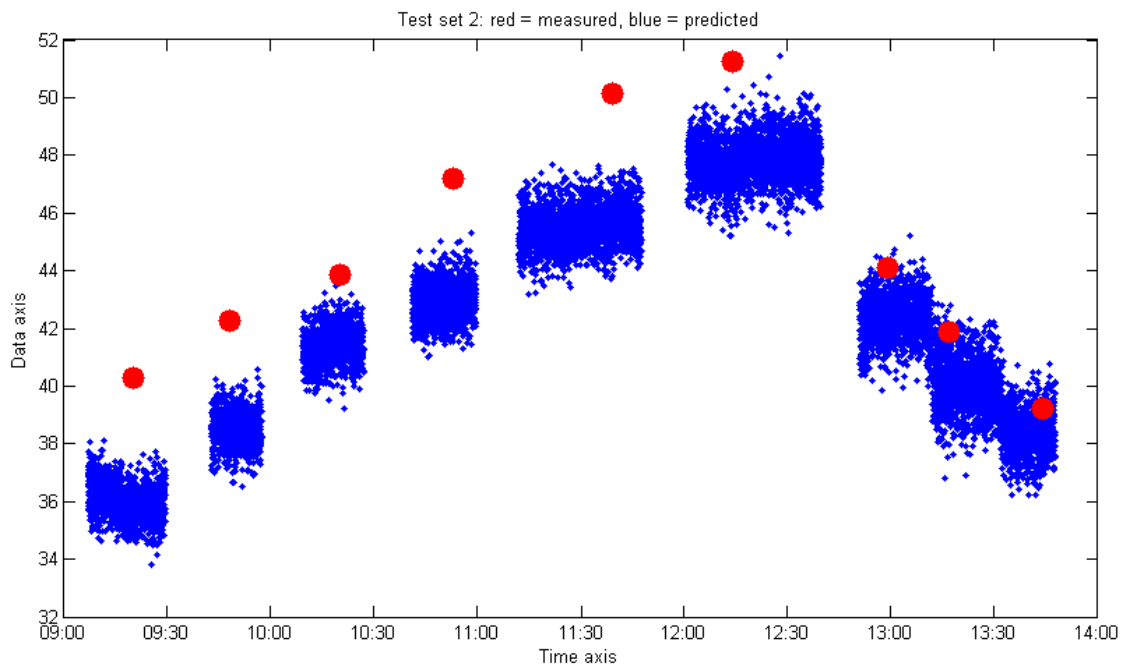
PLS-kosteusmalli #102, kalibrointisarja 8.11.2007, testisarja 7.11.2007

Mallin #102 luomisessa käytettiin samoja parametrejä kuin mallin #101 luomisessa, ainoastaan kalibrointisarjan ja testisarjan luomisessa käytetyt päivät vaihdettiin keskenään.



Kuva 62 Kalibrointisarjan kosteusennuste omille spektreilleen referenssikosteuden funktiona.

Mallin #8 referenssipisteitä oli 9 kpl (punaiset viivat) ja kalibrointisarjan absorbanssispektrejä (siniset pisteet) 1428 kpl (kuva 62). Kun kalibrointisarjasta muodostetaan kosteusennuste omille spektreilleen referenssikosteuden funktiona, niin keskivirhe on noin 0.8 kosteusprosenttiyksikköä.



Kuva 63 Kosteusennuste testisarjan 7.11.2007 spektreille referenssikosteuden funktiona.

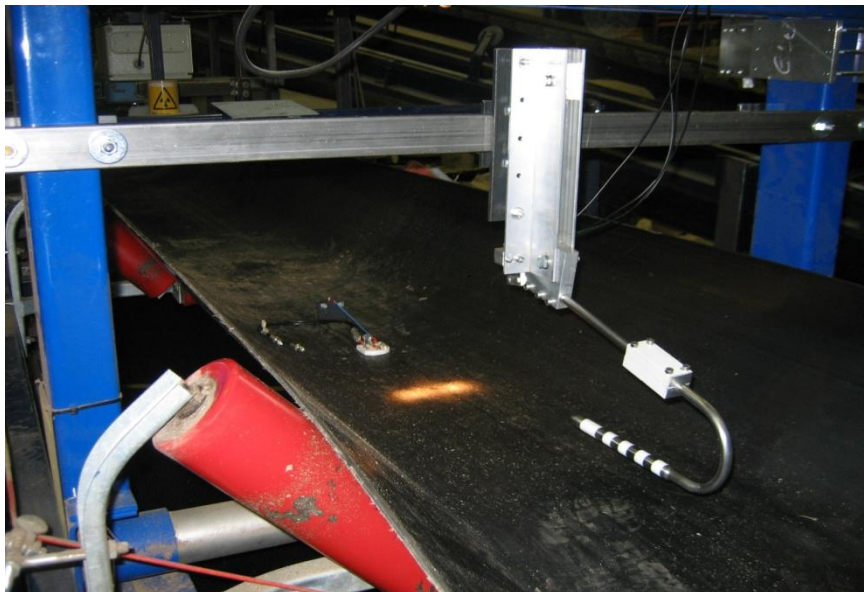
Mallin testisarjana on siis kaikki data päivältä 7.11.2007. Kuvasta 63 nähdään, että testisarjalla ennustekosteudet ovat koko ajan pienempiä kuin referenssikosteudet, vaikka oikea trendi silti löytyy. Tässä tapauksessa tilanne on päinvastainen edelliseen tapaukseen: 8.11. –data an-

taa ”kuivemman” mallin, minkä vuoksi ennustepisteet 7.11. –testisarjalle ovat kuivempia kuin referenssipisteet.

4.3 Impedanssi- ja akustiset mittaukset

4.3.1 Hakkeiden linjamittaukset VTT:llä

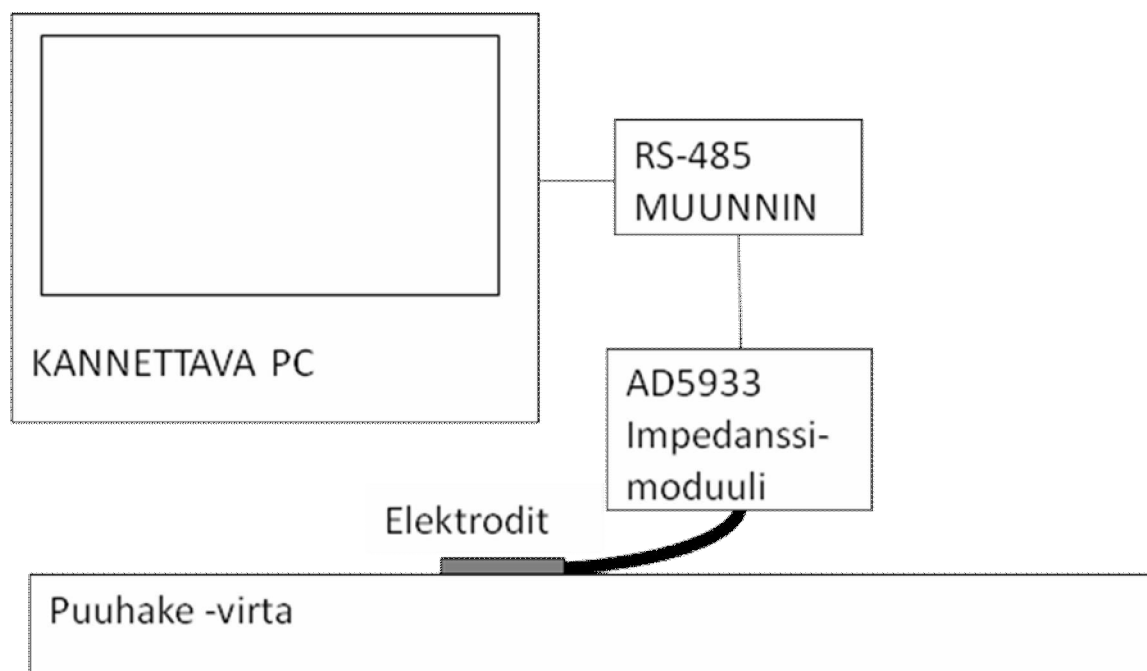
Kuopion yliopisto on hankkeen aikana kehittänyt uudet impedanssimittaussysteemit hakkeen kosteuden mittausta varten. Kaksi erityyppistä mittaussysteemiä on ollut kehitettävänä ja testattavana. Toinen mittaussysteemi perustuu tarkkaan ja nopeaan impedanssimittaukseen. Kehitetyssä menetelmässä neljä elektrodiä sisältävä mittaussondi 'torpedo' ui hakkeen sisässä on-line -mittauksen ollessa käynnissä (kuvat 64 ja 65). Mittaukseen on myös liitetty akustinen emissio –mittaus kytkemällä AE-anturi mittaussondiin, jolloin linjamittauksessa sondiin iskeytyvät hakepalat aiheuttavat mitattavia akustisia emissioita. Toinen kehitetty mittaussysteemi perustuu pintaelektrodeilla tehtäviin mittauksiin hakevirrasta, jolloin sähkökenttä muodostuu mitattavan hakepatjan pintakerrokseen on-line –mittauksessa (kuva 66). Tässä systeemissä käytettiin vasta markkinoille tullutta edullista ja kompaktia impedanssipiiriä AD5933 ja mittaus tehtiin käyttäen RS485-sarjaliikennettä mittaussysteemin ja tietokoneen välillä. Molemmat mittaussysteemit ohjelmoitiin, asennettiin ja niillä toteutettiin selluhakkeen ja metsähakkeen on-line -mittausajot VTT:n koehihnalla Jyväskylässä.



Kuva 64 Impedanssimittauksiin valmistettu torpedo-sondi, sisältäen neljä elektrodiä.



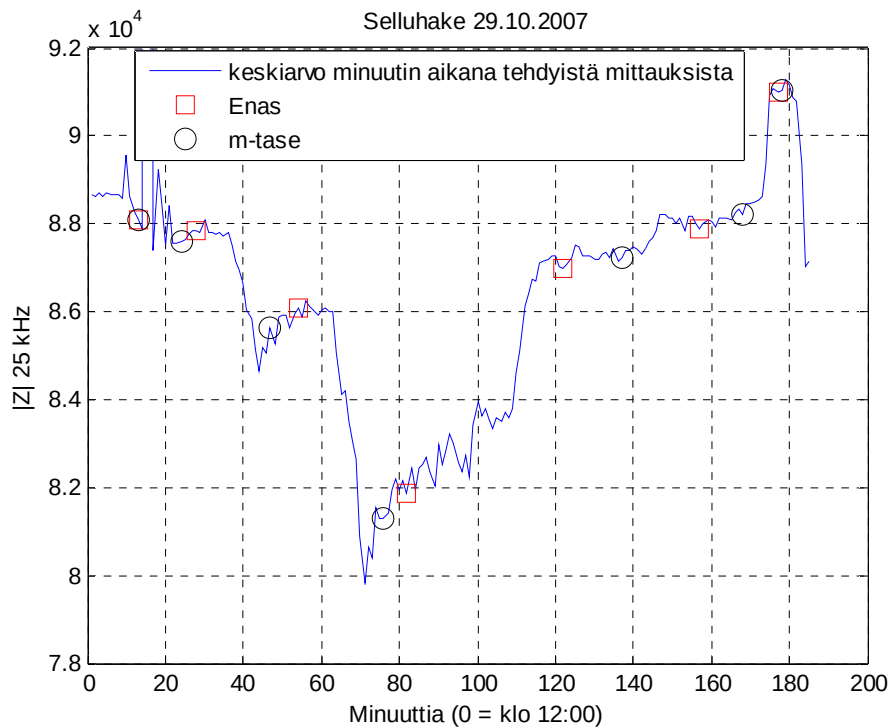
Kuva 65 Impedanssimittauksissa käytetty torpedo-sondi linjamittauksessa. Akustisen emission anturi on kytketty sondin yläpuolella olevaan adapteriin.



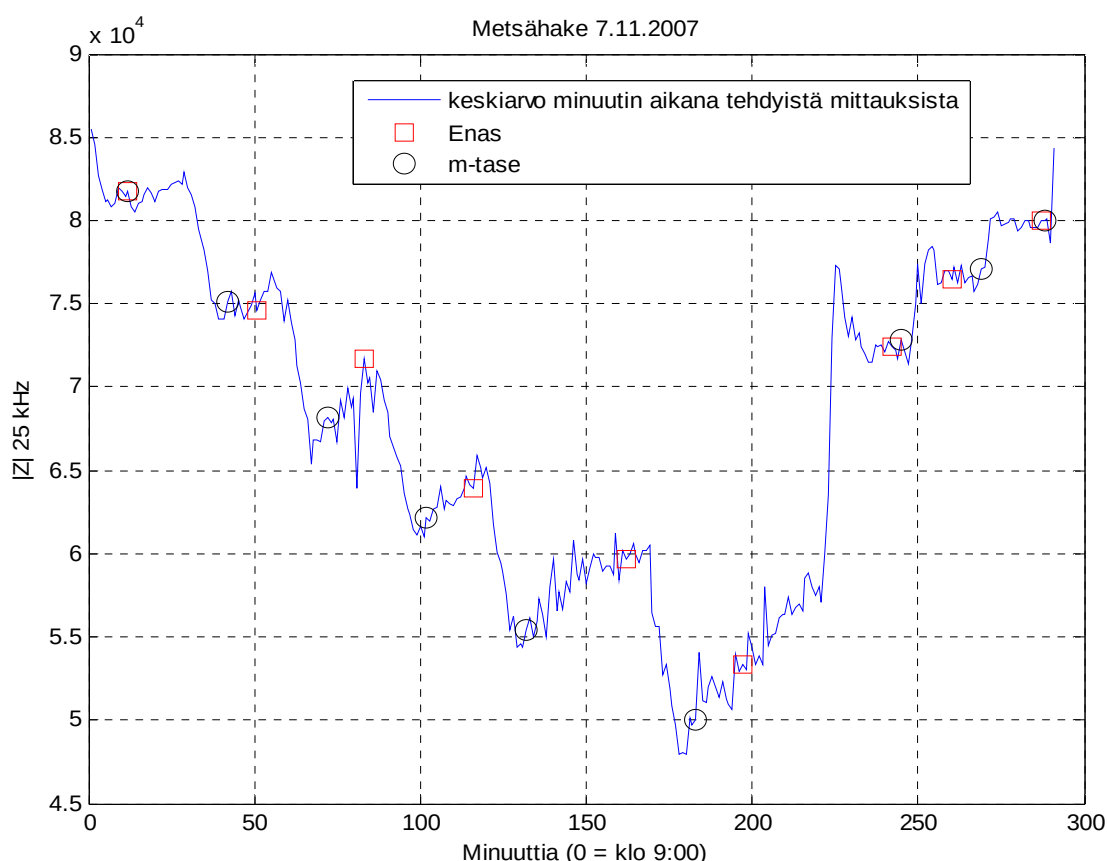
**Mittaussysteemi puuhakkeelle:
AD5933 -Impedanssimittaus**

Kuva 66 AD5933-impedanssimittaus.

Kuvissa 67 ja 68 on esimerkkejä impedanssivasteista syksyn 2007 linjamittauksista VTT:llä. Kuvissa on esitetty kahden päivän seurantamittaukset, mitattu impedanssisuure oli impedanssin itseisarvo 25 kHz:n taajuudella. Kuvista voidaan selvästi havaita hihnalla olevan hakkeen kosteuden muutokset kun hakkeeseen on lisätty aluksi vettä sekä lopussa kuivattua haketta (tarkempi selvitys kunkin päivän linjamittauksen tapahtumista on esitetty kappaleessa 2. Kuvissa näkyy myös referenssikosteuksien määrittäjäkohdat. Kuvista 67 ja 68 voidaan havaita myös selvä ja jatkuva hakkeen kosteuden muutos myös sen jälkeen kun esimerkiksi vettä on lisätty hakkeeseen. Veden lisäys havaitaan nopeana laskuna impedanssissa, heti veden lisäyksen jälkeen impedanssi alkaa jälleen kasvaa pinnan kuivumisen ja veden imeytymisen johdosta.



Kuva 67 Esimerkki torpedo-mittauksen impedanssivasteesta syksyn 2007 selluhake-ajoista VTT:llä.



Kuva 68 Esimerkki torpedo-mittauksen impedanssivasteesta syksyn 2007 metsähake-ajoista VTT:llä.

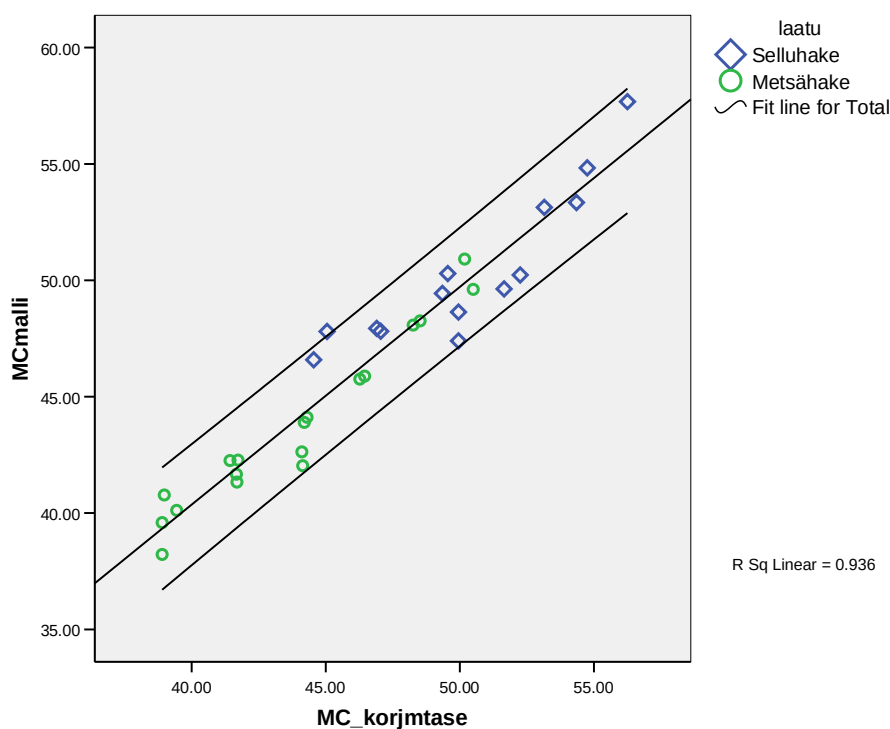
Impedanssimittausten korrelaatiot massatasekosteuksien suhteen VTT:n linjamittauksissa syksyllä 2007 on esitetty taulukossa 3. Parhaat tulokset saatiin korjatulle massataseelle, joka laskettiin olettamalla peräkkäisinä päivinä samoista hakekasasta otettujen hake-erien lähtökosteudet samoiksi (Taulukko). Kaksiparametrisilla regressiomalleilla voitiin tehdä lineaarinen sovitus molemmille haketyypeille (Kuva 69).

Taulukko 3 Impedanssimittausten korrelaatiot massatasekosteuksien suhteen VTT:n linjamittauksissa syksyllä 2007.

Korrelaatio kanssa	massatase-kosteuden	Mittauspäivä				
		Selluhake			Metsähake	
		25.10.07	29.10.07	06.11.07	07.11.07	08.11.07
Z (25 kHz)		-0.84(*)	-0.90(**)	-0.84(*)	-0.98(**)	-0.98(**)
Z (4 kHz)		-0.88(*)	-0.89(**)	-0.84(*)	-0.93(**)	-0.95(**)
ϕ (25 kHz)		0.92(*)	0.90(**)	0.84(*)	0.98(**)	0.97(**)
ϕ (4 kHz)		0.96(**)	0.92(**)	0.85(*)	0.97(**)	0.84(**)

Taulukko 4 Impedanssimittausten korrelaatiot korjattujen massatasekosteuksien suhteen VTT:n linjamittauksissa syksyllä 2007.

Korrelaatio keskiarvo-kosteuden kanssa		
	Selluhake	Metsähake
Paras korrelaatio yksittäisen parametrin kanssa	0.89 (**)	-0.98(**)
Regressiomallin R (kaksi parametria)	0.90	0.98
Regressiomallin estimaatin standardivirhe	1,7 %	0,9%

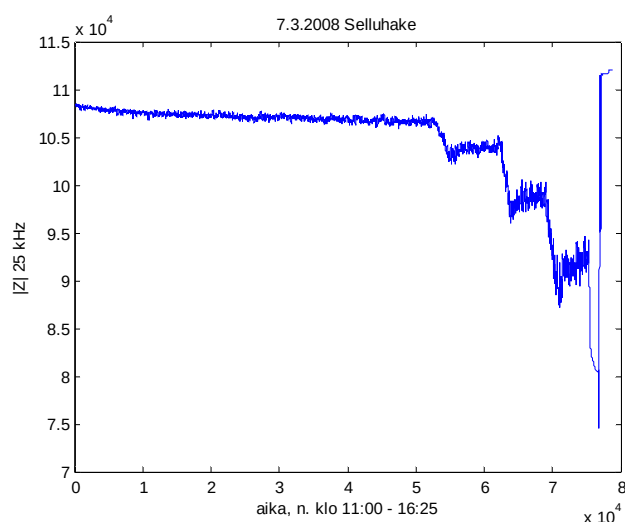


Kuva 69 Kaksiparametrisella regressiomallilla määritetyt kosteusarvot syksyn impedanssin linjamittauksille VTT:llä korjatun massatasekosteuden funktiona. Kuvassa näkyvät suorat kuvaavat lineaarista sovitusta ja 95 %:n luottamusväliä. Standardoitu keskivirhe 1,26 % yks.

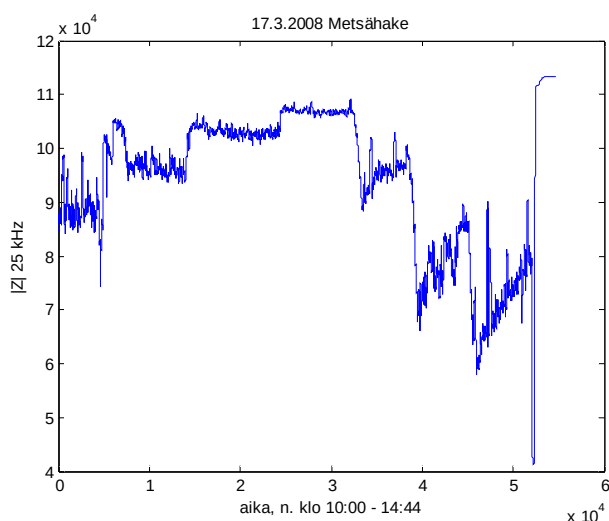
$$MC_{malli} = -0.00037304 \times Z_{25 \text{ kHz}} + 10.488 \times \phi_{25 \text{ kHz}} + 89,503 \text{ selluhakkeelle}$$

$$MC_{malli} = -0.00037304 \times Z_{25 \text{ kHz}} + 10.488 \times \phi_{25 \text{ kHz}} + 71,503 \text{ metsähakkeelle.}$$

Laitteistoa ja ohjelmistoa kehitettiin eteenpäin ja uusi on line -yhdistelmämittaus toteutettiin VTT:llä keväällä 2008. Testeissä käytettiin 'torpedo' -mittaussysteemiä, jossa oli yhdistettynä impedanssi- ja akustinen emissio -mittaus. Nyt testattiin eri menetelmien vasteita myös jäätyneelle ja osittain jäätyneille hakkeille. Mittaukset tehtiin sekä sellu- että metsähakkeelle. Kuvissa 70 ja 71 on esitetty kahden päivän seurantamittaukset, mitattu impedanssisuure oli impedanssin itseisarvo 25 kHz:n taajuudella. Kuvassa 70 on jäätyneeseen selluhakkeeseen aluksi lisätty vastaavaa jäätyntä haketta, jolloin impedanssivaste on lähes muuttumaton. Kuvaajassa voidaan kuitenkin havaita pieni lasku mikä oletettavasti johtui hihnalla olevan jäätyneen hakkeen osittaisesta sulamisesta. Metsähakemittauksessa (kuva 71) jäätyneeseen hakkeeseen lisättiin aluksi kuivattua haketta, lisäykset näkyvät kuvaajassa pieninä impedanssin kasvuina. Molemmista kuvista voidaan selvästi havaita hihnalla olevan hakkeen kosteuden muutokset kun hakkeeseen on lisätty lopuksi vettä. Myös näistä kuvista voidaan havaita hakkeen kosteuden muutos sen jälkeen kun vettä on lisätty hakkeeseen.

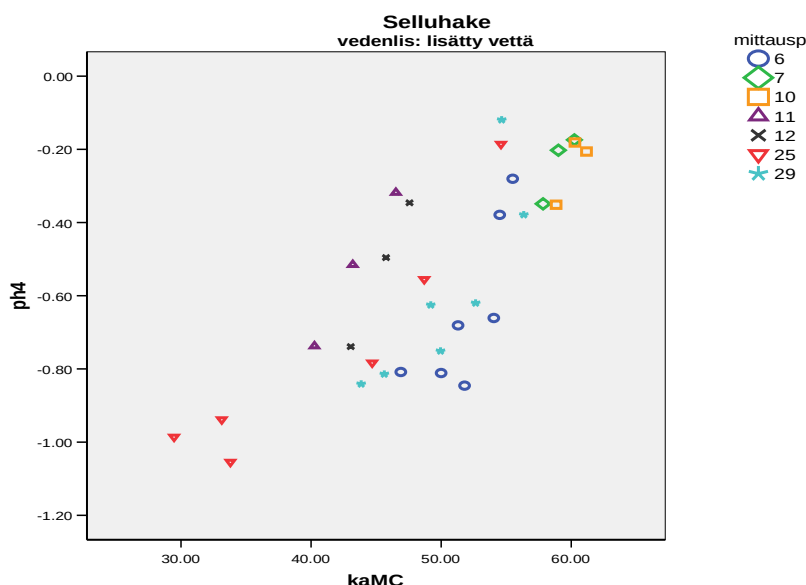


Kuva 70 Esimerkki torpedo-mittauksen impedanssivasteesta keväään 2008 selluhake-ajoista VTT:llä.

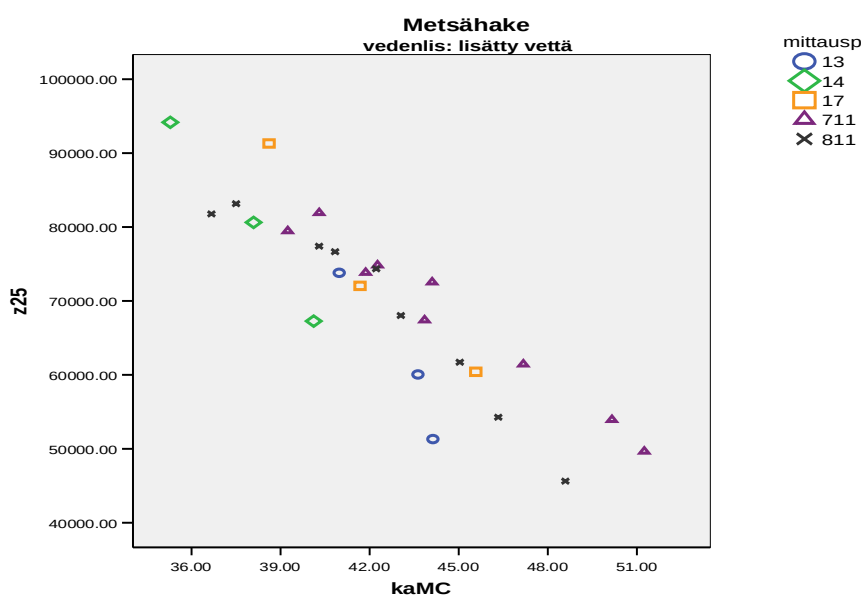


Kuva 71 Esimerkki torpedo-mittauksen impedanssivasteesta keväään 2008 metsähake-ajoista VTT:llä.

Eri päivinä tehdyistä linjamittauksista VTT:llä 2007-2008 on esitetty veden lisäyksen aiheuttamat impedanssivasteet kuvissa 72 ja 73.

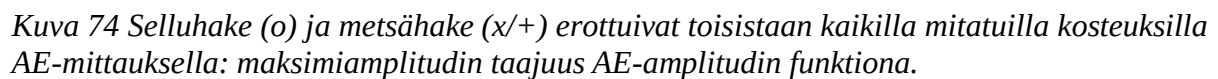


Kuva 72 Impedanssimittauksen vaihevaste 4 kHz:n taajuudella selluhakkeella punnitus/kuivauksella määritetyn kosteuden funktiona. Linjamittaukset VTT:llä syksyllä 2007 ja keväällä 2008.

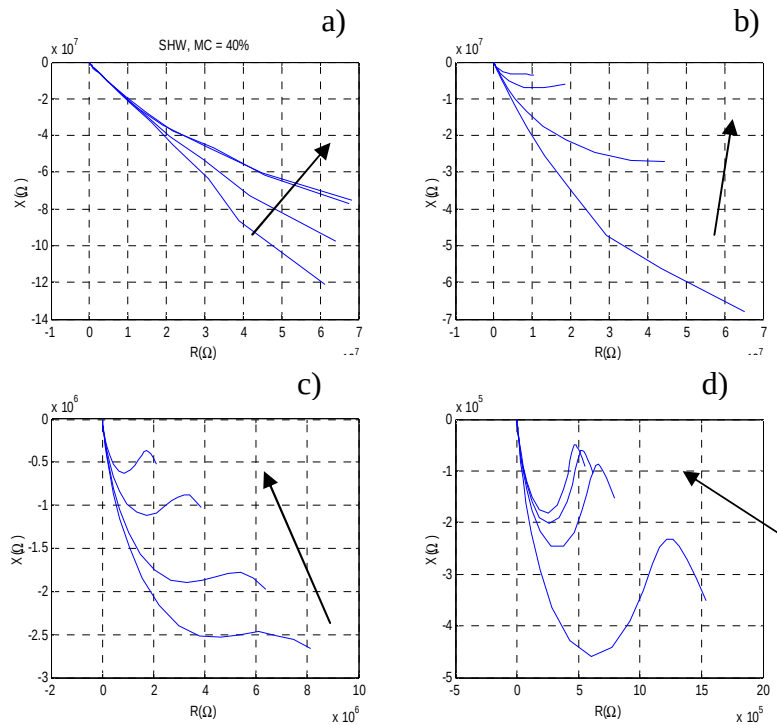


Kuva 73 Impedanssin itseisarvo 25 kHz:n taajuudella metsähakkeella punnitus/kuivauksella määritetyn kosteuden funktiona. Linjamittaukset VTT:llä syksyllä 2007 ja keväällä 2008.

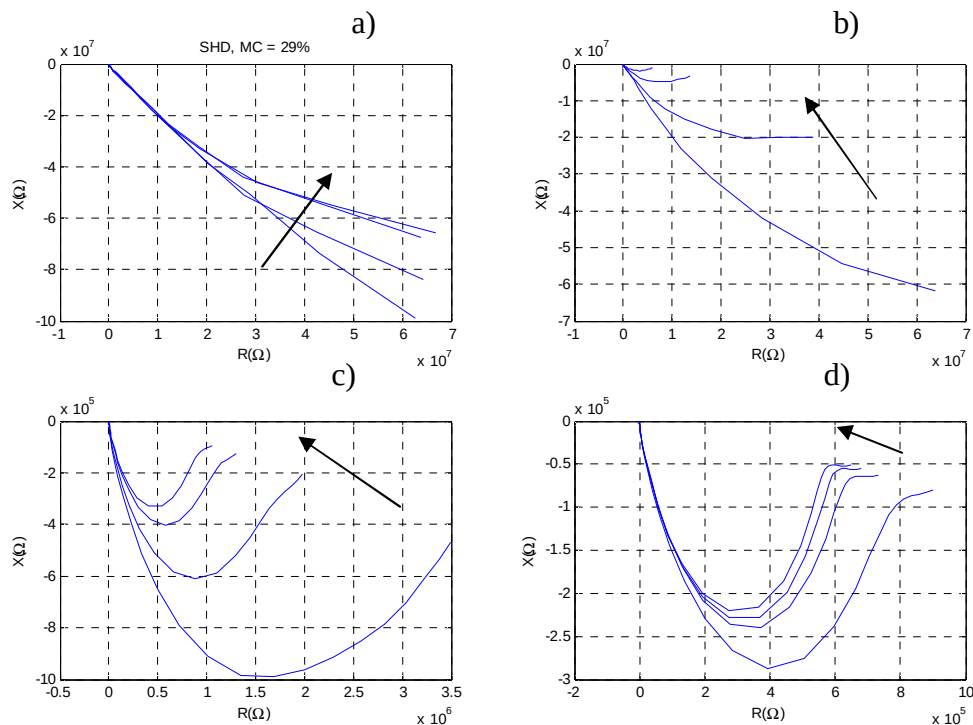
Akustinen emissio –mittausta selvitettiin VTT:n linjamittauksissa potentiaalisena menetelmänä luokitella erityyppisiä hakemateriaaleja. Tulokset näyttävät lupaavilta ja mm. selluhakkeet poikkesivat metsähakkeista luokittelemalla AE-mittaukset amplitudin ja taajuuden funktiona (kuva 74). Enemmän suurempikokoisia partikkeleja sisältävä selluhake aiheuttaa amplitudiltaan suurempia emissioita, mutta emissioiden taajuus on keskimäärin pienempi kuin metsähakkeella, jolloin linjassa on enemmän pienikokoisia partikkeleita. Tutkimuksissa kosteudet olivat yli syiden kyllästymispisteen, joten hakepalasten akustinen impedanssi oli samaa luokkaa ja näin ollen kosteuden suhteen ei havaittu merkittäviä muutoksia. Tehdyt testit AE-mittauksella olivat esikoetyyppisiä, mutta tulosten valossa näyttää ilmeiseltä että AE:ta voitaisiin jatkossa hyödyntää hakevirtojen analysoinnissa.



Laboratoriotutkimuksissa tehtiin mittaussarjat, joissa laajoilla impedanssispektrimittauksilla on tutkittu osittain jäätynyttä haketta eri kosteuksissa sekä myös siten, että hakepatja on sisältänyt kosteusjakauman. Tämän jälkeen tuloksia on analysoitu ja verrattu mm. VTT:n linjamittausten tuloksiin ja tulokset ovat vastanneet hyvin toisiaan. Vertailun perusteella voidaan arvioida että hakkeen liikkuminen elektrodien tuottamassa sähkökentässä aiheuttaa vain hyvin pienen muutoksen vasteisiin. Muutos on voimakkaasti taajuusriipuvainen. Analyysien mukaan linjamittaus ei aiheuta merkittävää muutosta impedanssimittauksen tarkkuuteen suhteessa staattiseen mittaukseen. Analyysien perusteella impedanssimenetelmällä voidaan mitata selluhakkeen ja metsähakkeen kosteutta. Myös jäätyneen ja osittain jäätyneen hakkeen analysointi on mahdollista ja laboratoriossa tehtyjen spektrianalyysien perusteella on voitu erottaa eri kosteiset hakenäytteet sulamisen eri vaiheissa (kuvat 75 ja 76).

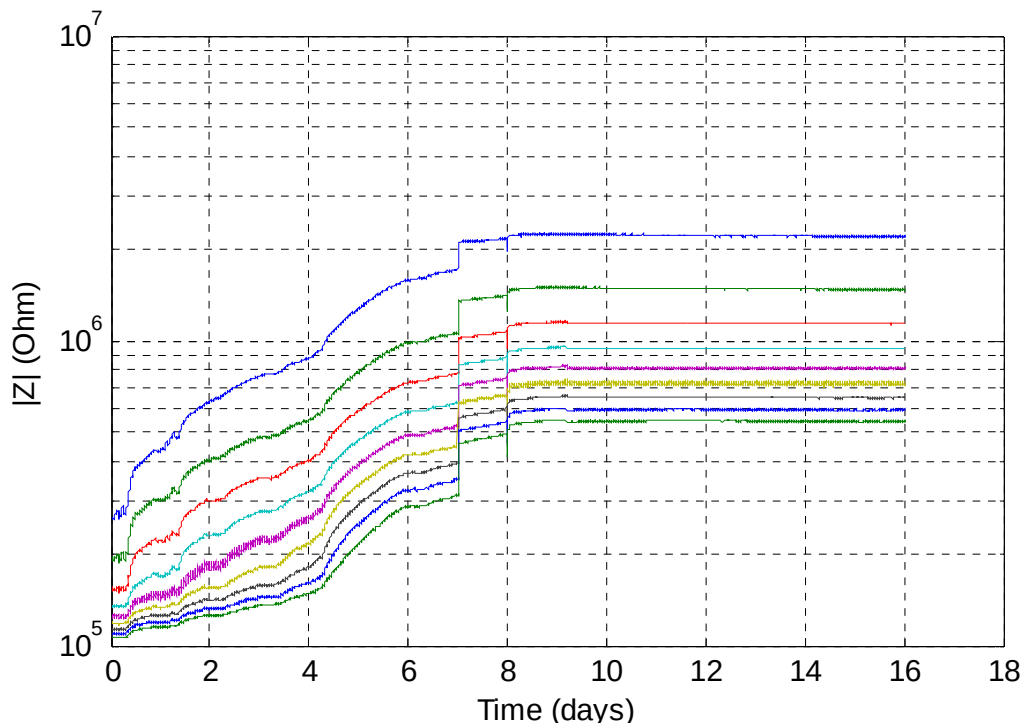


Kuva 75 Selluhakenäytteen (MC=40%) sulaminen laboratoriossa, 10 x 10 mm levyelektrodit, impedanssispektri 100 Hz – 1 MHz. Nuoli esittää sulamissuuntaa ja sulaminen etenee kuvasta a) kuvaan d). Laboratoriomittaus Solartron impedanssilaitteella.



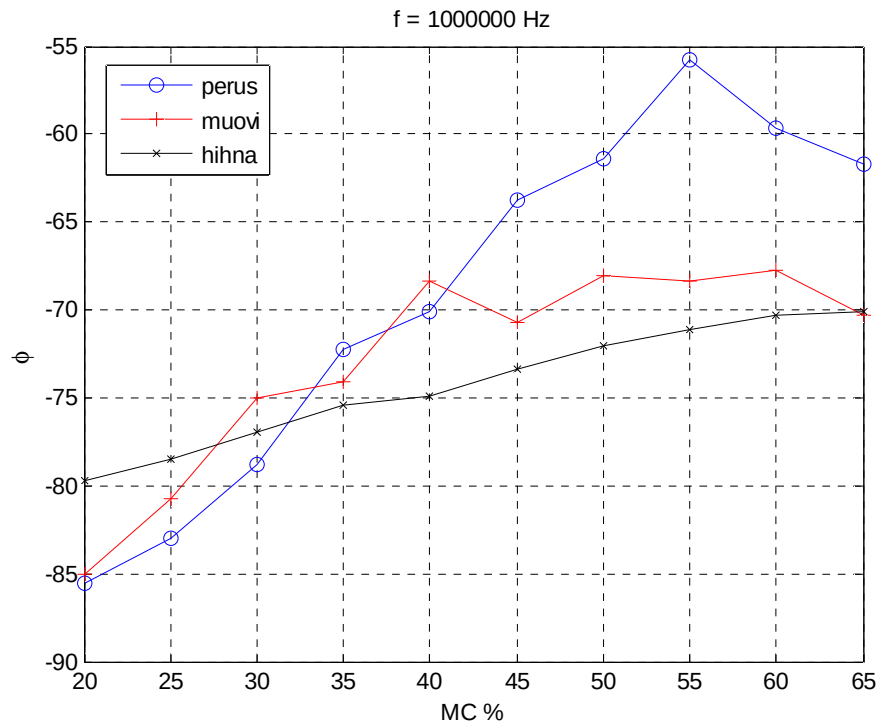
Kuva 76 Selluhakenäytteen (MC=29%) sulaminen laboratoriossa, 10 x 10 mm levyelektrodit, impedanssispektri 100 Hz – 1 MHz. Nuoli esittää sulamissuuntaa ja sulaminen etenee kuvasta a) kuvaan d). Verrattessa edelliseen kuvaan (Kuva 3.3.12, MC=40%) havaitaan erilainen spektrin muoto sulamisen eri vaiheissa mikä mahdollistaa kosteusanalyysin myös osittain sulaneesta hakkeesta. Laboratoriomittaus Solartron impedanssilaitteella.

Kuvassa 77 on esimerkki pitkäaikaisesta (16 vrk) AD5933-pohjaisesta hake-erän kuivumisen seurantamittauksesta, jossa hakehihnapalaan on kiinnitetty Al-kalvo –elektrodit. Tehdyissä kokeissa saatiin samantyyppisiä tuloksia kuin vastaavankokoisilla levyelektrodeilla tehdyissä testeissä, joissa impedanssin mittauslaitteena käytettiin tarkkaa Solartron –mittalaitetta.



Kuva 77 Esimerkki AD5933 –pohjaisella impedanssimittauksella tehdystä laboratoriotestistä kuivuvalla hakkeella hihnaan kiinnitetyillä kalvoelektrodeilla (10 x 10 mm): n. 7 vrk:n kohdalla 3 vrk:n keskeytys mittauksessa (hyppy). Taajuudet: 5 kHz – 45 kHz, viivat esittävät eri taajuuksia; suurin impedanssi vastaa pienintä taajuutta. Impedanssivaste vastaa tarkalla kaupallisella Solartron-analysaattorilla tehtyjä määrittäyksiä.

Laaja spektrivaste mitattiin käyttämällä Solartron mittalaitetta ja 10 x 10 mm levyelektrodeja. Mittaukset tehtiin johtavilla elektrodeilla ja kapasitiivisilla elektrodeilla, joissa dielektrinen kalvo johtavien elektrodien päälle muodostettiin PE-muovikalvolla. Mittaukset tehtiin levyelektrodeilla myös hihnan läpi. Hihna oli teollisuuden kuljetushihnamateriaalia vastaten VTT:n kuljetushihnaa. Kuvassa 78. on esitetty esimerkkejä vaihevasteista 1 MHz:n taajuudella. Merkittävä havainto oli se, että hihnan läpi saatiin lineaarinen vaste koko kosteuden mittausalueella 20 – 65%. Johtavilla ja kapasitiivisilla elektrodeilla havaittiin selvä epälineaarinen muutos suurilla kosteuksilla. Vastaava epälineaarinen muutos vaihevasteessa voitiin havaita myös VTT:n linjamittauksissa suurimmilla kosteuksilla.



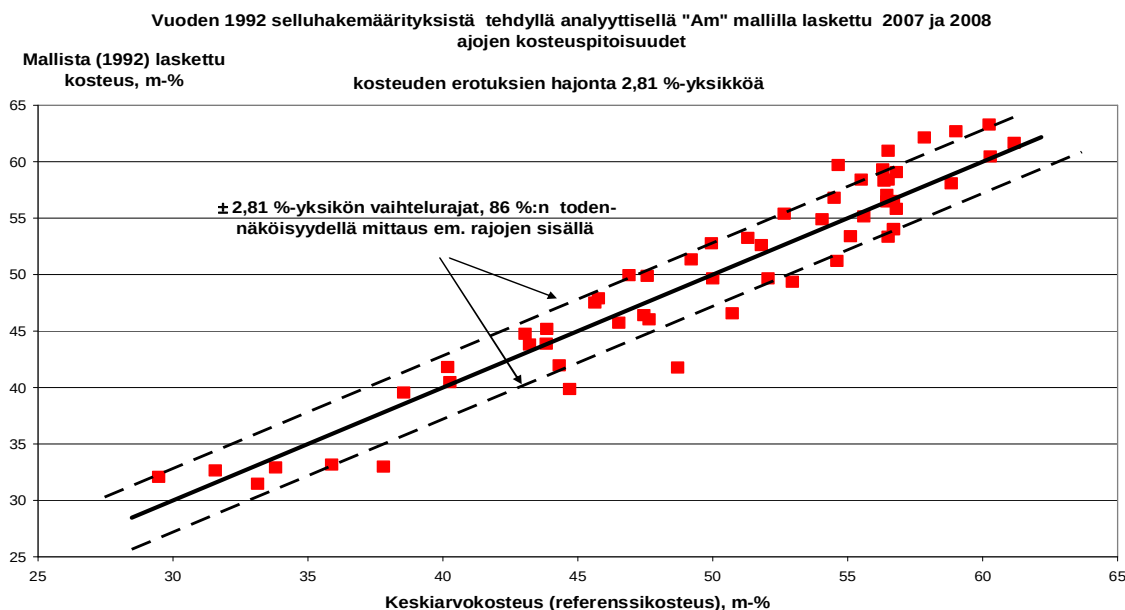
Kuva 78 Laboratorio-impedanssimittaukset Solartronilla: o – norm; + muovin läpi; * - hihnan läpimittaus; 10 x 10 mm levyelektrodit, $f = 1$ MHz. Vaihevaste suurilla kosteuksilla hihnan läpimittauksella on selvästi lineaarisin.

5 Tulosten tarkastelu

5.1 Radiometriset mittaukset

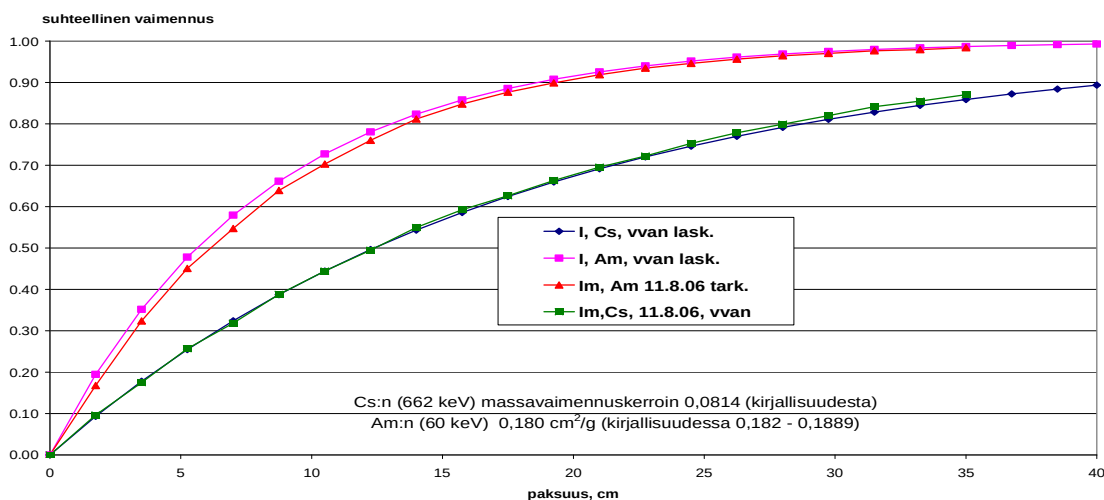
Saadut tulokset ovat hyvin linjassa jo ”vanhahtavastakin” kirjallisuudesta saadun selluhaketiedon kanssa eikä sinänsä tuo uutta ratkaisua varsinaisen mittausmenetelmän periaatteen osalta. Sovelluksen ja tarkkuuden osalta on tuotettu uutta tietoa, koska tulokset on saatu melkein käytännön kokoluokasta käyttäen tarkempaa referenssimittausta. Siksi sovellus tämän tiedon perusteella tietyllä tehtaalla tietylle hakkeelle saavutetulla edustavuustasolla on mahdollinen. Tämän tietyn puulajin hakkeen tulee sisältää samassa suhteessa pinta- ja sydänpuuta so. käyttää riittävän suuria hake-eriä ja keskiarvoistusta. Jos käytetään 1 Hz:n detektointinopeutta, niin tarvitaan n. 2 min keskiarvoistus. Detektointinopeuden noustessa keskiarvoistusaika vastavasti laskee samassa suhteessa.

Mittausten tarkkuutta tutkittiin myös käyttäen vuonna 1992 TKK:lla Am-241-lähteellä mäntyhakkeelle tehtyä sovitettua mallia (Puumalainen) sekä syksyn 2007 että kevään 2008 koelinja-ajojen ennustekosteuden laskemiseen. Näin saatiin lähes vastaavan tasoinen tarkkuus kuin syksyn 07 –mallilla kevään 2008 kosteuksia laskettaessa (kuva 79).



Kuva 79 Radiometriseen ²⁴¹Am –lähteeseen perustuvan selluhakemittauksen tarkkuus (malli 1992 mittauksista).

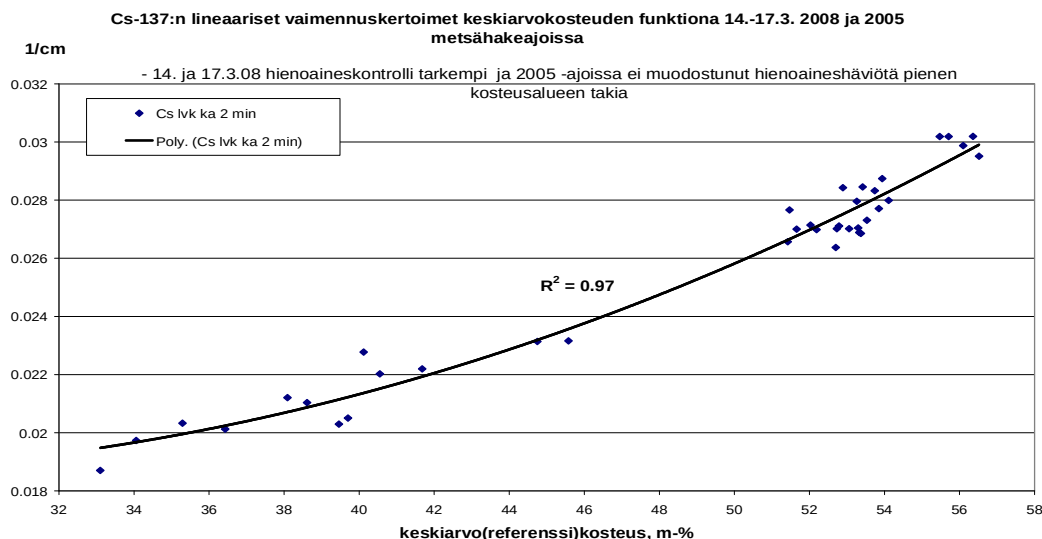
Koelinjamittauksissa ja TKK:lla 1992 laboratoriokokoluokassa tehdyissä Am-241 –mittauksissa lähteiden kollimointi tuotti pääosin 60 kV:n fotonivuot. Koelinjamittauksen osalta tämä on todettu Käsittelytekniikka –hankkeessa tehdyissä puun vaimennusmittauksissa, jossa on verrattu kirjallisuustietojen (puun massavaimennuskertoimet) perusteella laskettuja ja mitattuja vaimennuskäyriä (Järvinen 2006) (kuva 80). Toinen virhelähde voi olla pintamittauksen eroavuus. TKK:n 1992 –laboratoriotutkimuksissa mitattiin 15 cm:n staattista hakepatjaa käyttämällä tunnetussa kosteudessa olevia mäntyselluhake-eriä. Liikkuvan hakepatjan paksuus koelinja-ajoissa on hyvin lähellä em. arvoa. Staattisia mittauksia puumateriaaleilla on myös tehty koelinjan Am-241 –lähteellä laboratoriossa Käsittelytekniikka –hankkeessa (Hillebrand 2005). Em. kokeissa mitatut lineaariset vaimennuskertoimet (matkavaimennuskertoimet) ovat lähellä keväällä 2007 ja 2008 koelinjassa mitattuja vastaavia samassa kosteudessa olevia puumateriaaleja, jotka tosin olivat metsähakkeita ja purua.



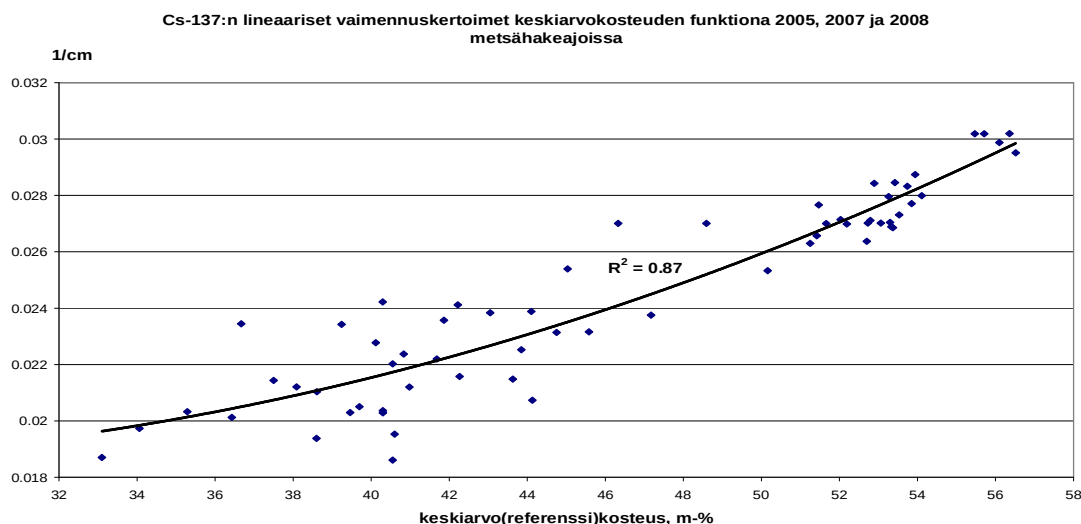
Kuva 80 Vesivanerilla mitattu ja laskettu gammasäteilyn vaimennus paksuuden funktiona.

Kun metsähakkeen osalta tarkastelua laajennetaan koskemaan tämän hankkeen kevään 2008 kahden ajon lisäksi myös Käsittelyhankkeessa 2005 vastaavalla materiaalilla tehtyjä mittauk-

sia, niin saadaan parempi yhteys kosteuden ja Cs-137:n vaimennuskertoimien välille (kuva 81) kuin vuoden 2008 kahdessa ajossa (14. ja 17.3). Kun samaan kuvaan lisätään kaikki vuosien 2005, 2007 ja 2008 pisteet niin vieläkin kosteuden ja vaimennuskertoimien soviteyhtälön standardipoikkeama on yllättävän hyvä (kuva 82). Tähän vaikuttaa se, että 2005 – mittauksissa ripehienoinesta ei juurikaan kertynyt vähäisen kostutuksen (kosteusalueen) takia ja myös pitempi keskiarvoistus (2 min vs. 5 min).

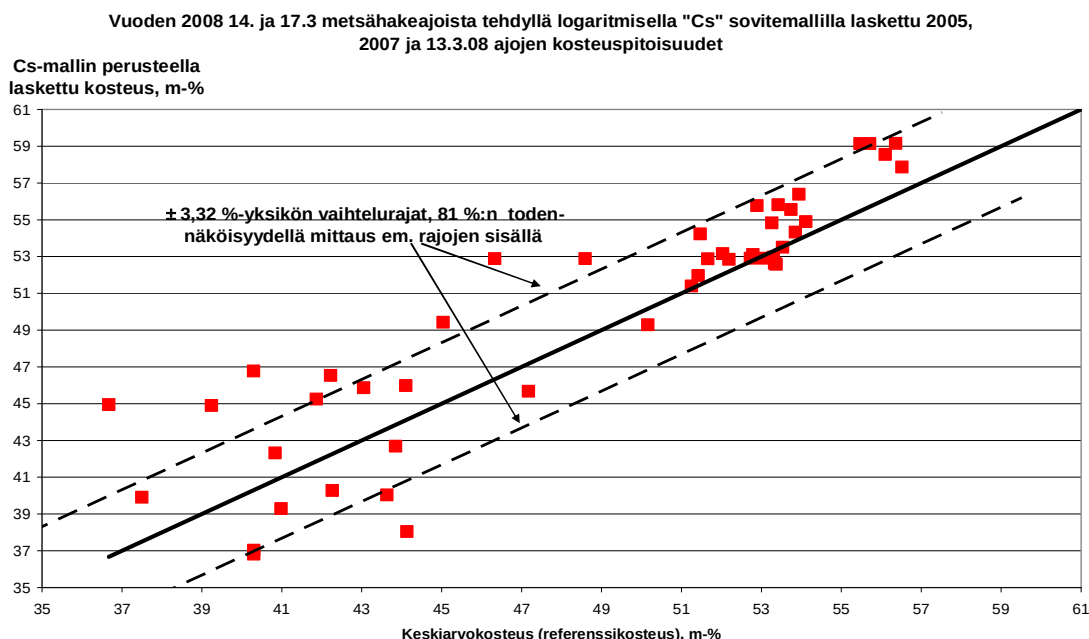


Kuva 81 Kosteus vs. lineaarinen vaimennuskerroin (^{137}Cs) kahdessa 2008 ajossa sekä vuoden 2005 metsähakemittauksissa.



Kuva 82 Kosteus vs. lineaarinen vaimennuskerroin (^{137}Cs) kaikissa (2005, 2007 ja 2008) koe-linjalla tehdyissä metsähakeajoissa.

Metsähakemittauksista tehtiin samanlainen tarkkuustarkastelu kuin selluhakkeella eri vuosilta. Kevään 2008 14. ja 17.3. – ajoista tehtiin sovitemalli, jolla ennustettiin vuoden 2005, 2007 ja 13.3.2008 – ajojen kosteuspitoisuutta (kuva 83)



Kuva 83 Radiometriseen ¹³⁷Cs –lähteeseen perustuvan metsähakemittauksen tarkkuus (malli 2008 14. ja 17.3.-mittauksista).

Kuvassa 83 mallilla lasketun ja referenssikosteuden erotuksien hajonta on $\pm 3,32 \%$ -yksikköä ja runsas 80 % lasketuista kosteuspitoisuuksista asettuu em. rajojen sisälle. Suurin osa virheestä muodostuu näytteenoton heikosta edustavuudesta, hienoaineksen häviöstä ja lajittumisesta sekä niiden yhteisvaikutuksesta ajon aikana.

Metsähakemittauksien tulkintaa verrattuna selluhakkeeseen vaikeuttaa koelinja-ajoissa tapahtuva suuri hienoaineshäviö, joka tulee hihnojen alle putoavasta ripemateriaalista. Hienoaines on lähinnä neulasmassaa, joka on jo alun pitäen kosteampaa ja imee kosteutta helpommin kuin suuremmat hakepalat. Tämä vaikuttaa suoraan sekä irtotiheys- että radiometrisiin mittauksiin ja kosteusmäärittäisiin näytteenoton kautta. Tällaista tilannetta ei esiinny, jos materiaali ei kierrä, vaan ”ohittaa” mittauspaikan kerran. Vertailu aikaisempien vuosien metsähakemittauksiin tukee tätä päätelmää.

5.2 Lähi-infrapuna (nir) mittaukset

Projektissa on NIR-mittauksen osalta saatu hyviä tuloksia resursseihin nähden. Vertailukohtana voidaan käyttää Ruotsissa viime vuosina tehtyjä on-line NIR-mittauksia, joissa on myös sovellettu PLS-mallinnusta biopolttoaineiden kosteussuunnustamallien tekemiseen CHP-laitosten syöttölinjoille ja polttoainevastaanottoihin. Kyseessä ovat olleet laajamittaiset kokeet (Lycksele Energi, Skellefteå Kraft, Eskilstuna Miljö & Energi), jotka eivät kuitenkaan vielä ole tuotantokäytössä. Karlsson ja Lestander et al 2008 ovat päässeet metsähakemallien kosteustarkkuudessa 3,30 % (RMSEP, kaikki) ja kostutetulla metsähakkeella 3,77 % (RMSEP, fuktat bränsle) tasoon, joka on lähes yhtä hyvä tarkkuus kuin tässä projektissa tehtyjen selluhakkeen kosteussuunnusteiden tarkkuus. Tässä projektissa tehtyjen metsähakkeen kosteussuunnusteiden tarkkuus ei vielä yllä samaan tasoon. Syynä ruotsalaisten saamaan parempaan tarkkuuteen saattaa olla erot valaisutehossa, mittaustäsisyyksissä, spektrograafin ominaisuuksissa, keskiarvoistuksissa ja mittapään rakenteessa.

Yhdistelmämittaus –hankkeen ir -mittapää on alun perin tehty selluhakkeelle VTT Oulun Nirwood-projektissa vuonna 2005, jolloin aaltolukualueella voi olla merkitystä metsähakemitta-

uksissa. Tätä mittapäätä käytettiin kustannussyistä, koska uuden ”proben” tekeminen olisi vaatinut käytännössä oman projektinsa.

Ruotsalaiset ovat käyttäneet laajempaa aallonpituusaluetta ennustemallin kalibroinnissa kuin tässä projektissa. Laskentaperiaatteet ovat Yhdistelmämittaus -hankkeessa olleet aivan samat kuin, mitä Ruotsissa on käytetty. Nirwood -mittapäätä ei ollut myöskään suojattu ulkoiselta lämpösäteilyltä, jolla saattaa olla merkitystä. Ulkoisen lämpösäteilyn kompensointi olisi jatkossa mahdollista toteuttaa mittapään verhoilulla ja signaalin moduloinnilla, mutta vakioitu ja mahdollisimman lyhyt mittaustäisyys on myös tärkeää. Ruotsalaisten saavuttamaan tarkkuuteen pääseminen tämän projektin jatkoprojekteissa edellyttää vähän suurempaa panosta mittauksen käytännön tekniikkaan ja laskentaan. Toisaalta nimenomaan yhdistelmämittaus NIR-mittauksen, radiometrisen ja impedanssitekniikan avulla saattaa kompensoida mahdolliset puutteet NIR-mittauksessa ja tuottaa riittävän tarkkuuden ja luotettavuuden pienemmälläkin panoksella.

5.3 Impedanssi- ja akustiset mittaukset

Tässä hankkeessa kehitetty sähköiseen impedanssiin ja AE -mittaukseen perustuva puuhakkeen on line -mittaussysteemi on tietävästi ensimmäinen laatuaan ja näin ollen vertailua aiempiin ei ole mahdollista tehdä. Verrattaessa sähköistä mittausta esimerkiksi radiotaajuuksilla ja mikroaaltotaajuuksilla mittaaviin on line -mittaussysteemeihin matalemmilla taajuuksilla toimivan sähköisen impedanssin käyttö mahdollistaa myös jäisen hakkeen analysoinnin. Radio- ja mikroaaltotaajuuksilla vaste aiheutuu pääosin vesidipolien pyörimisestä suurtaajuuskentässä. Näin ollen em. menetelmät eivät ole kovin käyttökelpoisia mikäli hakkeessa on myös jäätynyttä vettä ja vesi on kiteiseessä muodossa. Tällöin vastaavaa dipolipolarisaatiota ei tapahdu ja puulajista riippuen jään ja puun dielektriset arvot eivät suurilla taajuuksilla poikkea merkittävästi toisistaan.

Merkittävä parannus aiemmassa hankkeessa tehtyihin hakkeen linjamittaustesteihin Jyväskylän VTT:llä (Biomassapolttoaineen käsittelytekniikan kehittämishanke, Tekes-hanke 2091/31/04) oli uuden torpedo-sondin käyttöönotto, jolloin päästiin astetta tarkempiin mittauksiin kuin käyttämällä hakepatjan pinnasta mittaavia antureita. Kaikkiin pinnalta mittaaviin tekniikoihin ja myös läpi mittaaviin tekniikoihin vaikuttaa käytännössä pinnan ominaisuudet, jotka voivat vaihdella paljonkin riippuen ulkoisista tekijöistä ja esimerkiksi oletettavasti kiintotiheyden vaihtelut pintakerroksessa voivat olla merkittävästi suurempia kuin syvemmässä hakekerroksessa. Torpedo-mittaus eliminoi hyvin tämän tyyppisiä mittauksen virhelähteitä. Torpedo-sondi oli ensimmäinen versio ja on selvää, että teknistä toteutusta täytyy vielä parantaa jotta voidaan kehittää kenttäkelpoinen versio itsenäisiin pitkäaikaismittauksiin. Olennaista seuraavassa versiossa on se, että malli suunnitellaan siten, että materiaalia ei voi jäädä kiinni torpedoön. Lisäksi systeemiin voidaan esim. lisätä lämmityselementti, joka estää mahdollisen jään kertymisen käytännön oloissa mikäli hakepatja sisältää jäätynyttä haketta.

Tutkimuksessa impedanssimenetelmän tarkkuus oli samaa luokkaa kuin muilla käytetyillä menetelmillä. Impedanssimenetelmä soveltunee mahdollisesti paremmin hyvin epähomogeenisen metsähakkeen analysointiin kuin muut menetelmät. Tulokseen vaikuttanee myös käytetty torpedo-sondi, jolloin pinnan epähomogeenisuudet eivät vaikuttaneet mittaukseen. Tutkimuksen perusteella on selvää, että impedanssimittauksen tarkkuutta voidaan parantaa käyttämällä useampia taajuuksia kuin nyt viimeisissä testeissä käytettyjä kahta taajuutta. Useita taajuuksia käyttämällä päästään tarkempaan materiaalianalyysiin kun voidaan analysoida eri taajuusalueilla tapahtuvia dispersiota ja näin saadaan tarkempaa tietoa materiaalin sähköisistä ominaisuuksista eri tasoilla. Esimerkiksi hakepalasten sisäisissä soluseinämissä tapahtuvat polarisaatiot vaikuttavat eri taajuuksilla kuin hakepalasten pintapolarisaatio. Laboratoriossa tehdyt tutkimukset osittain jäätyneillä hakkeilla ja erilaisen kosteusgradientin omaavilla hakkeilla osoittivat, että mittauksen tarkkuutta voidaan parantaa siten, että voidaan tehdä yhä tarkempia määrittäyksiä entistä epähomogeenisemmasta hakkeesta.

Tietävästi täysin uutta puuhakkeen on line -mittaustekniikkaa sisältävät myös ensimmäiset kokeet yhdistetyllä AE-mittauksella. Alustavat testit käyttäen AE-tekniikkaa osoittivat menetelmässä olevan potentiaalia esimerkiksi tunnistaa erityyppisiä hakelaatuja. Menetelmän käyttö ei sisällynyt alkuperäiseen tutkimussuunnitelmaan joten laajoja analyysiä AE-mittauksista ei ollut mahdollista tehdä. Toisaalta saadut mittaustulokset toimivat hyvänä referenssinä kehitettäessä menetelmää eteenpäin.

6 Johtopäätökset

Erillisinä menetelminä kaikki kolme mittaustapaa: kehittynyt nir-mittaus, impedanssi- ja radiometrinen mittaus ovat sovellettavissa tiettyihin kohteisiin varsin hyvin. Kun hakkeen kosteusmittauksen tarkkuusvaatimukset esim. kosteusalueella 30 – 60 m-% edellyttävät alle ± 2 %-yksikön hajontaa yksittäisessä mittauksessa eli n. 5 %:n tarkkuutta alueesta yli 85 %:n todennäköisyydellä, niin mikään em. menetelmistä ei yksinään riitä kaikissa oloissa. Siksi menetelmien yhdistäminen on tarpeen. Erityisesti tällainen tilanne on, jos mittauksien täytyy toimia jatkuvatoimisena on-line -mittauksena em. tarkkuudella ”äärioloissa” so. hake voi olla hyvin kuivaa tai ylikostea tai jäässä. Sovelluksien osalta täytyy erottaa selluhakkeet tai yleensä tasalaatuisemmat hakkeet esim. hakkutähteistä tehdystä metsähakkeesta. Tasalaatuisilla hakkeilla tarkkuustavoitteen saavuttaminen on mahdollista, mutta metsähakkeella tavoite on vielä vaativa.

Radiometrisillä mittauksilla pääsee selluhakkeella jo varsin lähelle tarkkuustavoitetta suuria eriä mitattaessa. Ongelman muodostavat hakkeen tiheysmuutokset, kun hakkeen laatu (puulaji ja hakkuritekniikka) muuttuvat. Tämä tilanne tulee hallita joko etukäetiedon tai toisen mittausten menetelmän so. yhdistämisen kautta. Metsähakkeellekin radiometrinen mittaus näyttää tämän tutkimuksen pohjalta hyvin mahdolliselta, jos tarkkuudesta voidaan jonkun verran tinkiä. Suuret kosteusmuutokset näkyvät hyvin, mutta pienet muutokset voivat ”hukkaa” tiheysvaihtelun alle. Jos voidaan olettaa, että hakkuritekniikka on samantyyppinen, so. palakoko ei paljon vaihtele, ja hakkeen puulajikoostumus on myös suhteellisen stabiili, niin tiheysmittaus kuvaa varsin hyvin myös kosteuspitoisuutta. Tässäkin pätee se seikka, että menetelmiä yhdistämällä ominaistiheyden muutoksen vaikutusta voidaan vähentää.

Mittauksien yhdistäminen lisää kaikenlaisissa ratkaisuisissa ja oloissa myös varmuutta, joka tarkoittaa lähinnä, että täysin väärin mittaustuloksien todennäköisyys laskee merkittävästi: käytännössä melkein puolittuu, jos käytetään kahta menetelmää.

Tässä hankkeessa tavallaan ”sivutuotteena” tullut tieto, että selluhakkeen ominaistiheys suurissa erissä on lähinnä riippuvainen kosteuspitoisuudesta, jos hakkeen puulaji ja palakoko eivät vaihtelee, antaa monia uusia kehittämisenäkymiä sekä kosteusmittaukseen että jopa kuivaustuoretiheyden on-line – mittaukseen. Tämä tulos kannattaa varmentaa jatkomittauksilla erityyppisissä oloissa. Jos asia on laajemmin pätevä, niin kotimaisten ja monien eksoottisten puulajien kosteuspitoisuuden mittaus voidaan toteuttaa kohtuullisella tarkkuudella edullisesti ja teknisesti yksinkertaisesti. Jos tarkkuutta ja varmuutta halutaan nostaa, niin tässäkin yhdistämisellä päästään eteenpäin.

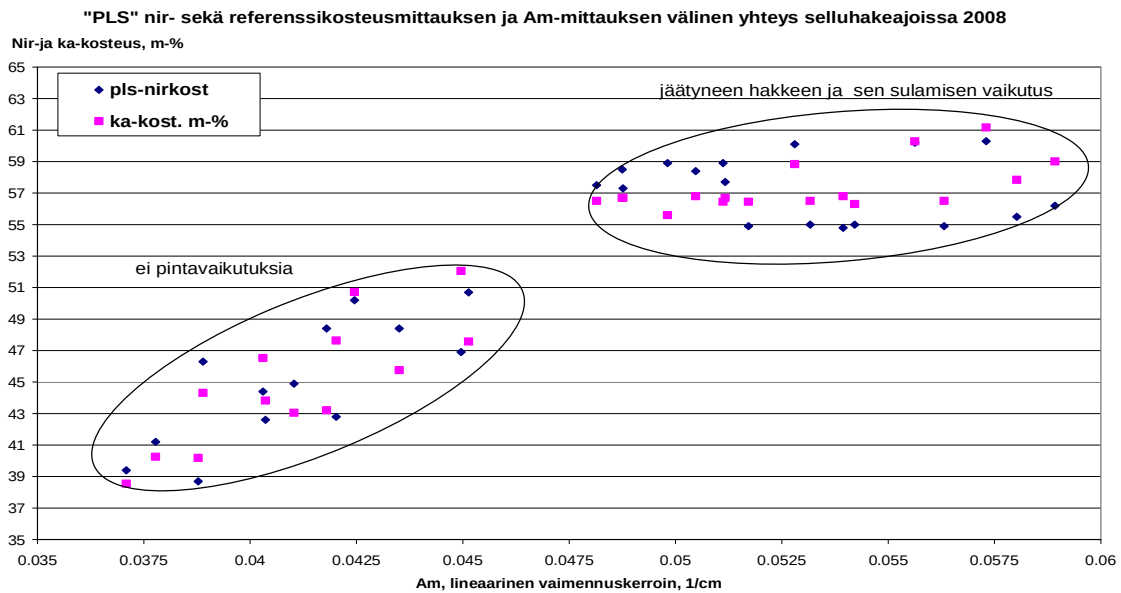
7 Mittausten yhdistäminen

Hakkeen kosteuden tarkkaan mittaukseen lienee ainoa mahdollisuus käyttää useita mittaustekniikoita, joita yhdistelemällä voidaan päästä mahdollisimman luotettaviin tuloksiin. Tässä hankkeessa on tarkasteltu nir-, impedanssi- ja gammamittausta sekä akustisen emission (ae) mittausta lähinnä hakeominaisuuksien kannalta. Kaikilla hankkeen menetelmillä saa suhteellisen hyvän vasteen kosteuteen ja monissa tapauksissa se voi olla riittävä ja taloudellisesti perusteltu. Mitattavien materiaalien sisäisen ominaisuusvaihtelun so. epähomogeenisuuden kasvassa erillisten menetelmien tarkkuus kuitenkin laskee. Kaikilla hankkeessa käytetyillä mittausten menetelmillä on hyvät puolensa ja tiettyjä puutteita:

- Nir-mittauksen etuna on nopea adaptointi ja muunneltavuus eri oloihin ja heikkoutena pintamittausluonne sekä edellytys suhteellisen tasalaatuisesta materiaalista (esim. sellaisenaan sovellus metsähakkeelle voi olla haasteellista),
- impedanssimittaus näyttäisi mahdolliselta jopa metsähakkeelle, mutta hyvin kostean alueen mittaus on haasteellista; menetelmä vaatii jäiselle hakkeelle oman kalibrointimallin ja elektroditekniikkaa tulee kehittää käytettävämmäksi,
- gammamittaus soveltuu kuitupuu- ja teollisuushakkeelle, joka tehty samalla hakkuri-tekniikalla samasta puulajista; tiheyden muutokset edellyttävät kalibrointia, jää/lumi vaikuttaa mittaukseen vähän; metsähakesovelluskin on mahdollinen jollakin tarkkuudella, menetelmistä teollisen käytön kannalta ”robustein”.

Hankkeessa käytettyjen mittauksien yhdistämisellä täytyy ratkaista pintamittauskysymys, ”yli- kuivan ja kostean” alueen (< 30 ja > 60 m-%) mittaus sekä tiheysmuutosten ja veden olomuodon aiheuttamat virheet. Useissa muissakin yhdistelmissä nämä tekijät ovat merkittäviä.

Pintamittauksen ja veden olomuodon vaikutusta ja sen muutosta so. sulamista voidaan analysoida tutkimalla myös menetelmien riippuvuutta toisistaan. Kuvassa 84 on keskiarvokosteuspisteet (referenssikosteus) ja nir-kosteusmittaukset Am-241:n lineaarisen vaimennuskertoimen funktiona 2008 selluhakeajoissa. Kuvan pisteet voi yhdistellä kahteen joukkoon: ensimmäisessä kosteusalue on melkein 14 % -yksikköä ja pintakosteutta ei ole; toisessa ryhmässä on ollut jäätynyttä haketta, joka on sulanut pinnalta ja se on vaikuttanut kumpaankin mittaukseen, nir-mittaukseen pintamittausluonteen vuoksi ja radiometriseen mittaukseen mahdollisesti jonkun verran pinnankorkeusmittauksen kautta, koska pinnalta kosteat hakepalat muodostavat tiiviimmän patjan kuin jäätyneet palat. Jälkimmäisessä joukossa kosteusalue on ollut pieni n. 6 %-yksikköä, mikä tuo esiin myös mittauksien hajonnan.



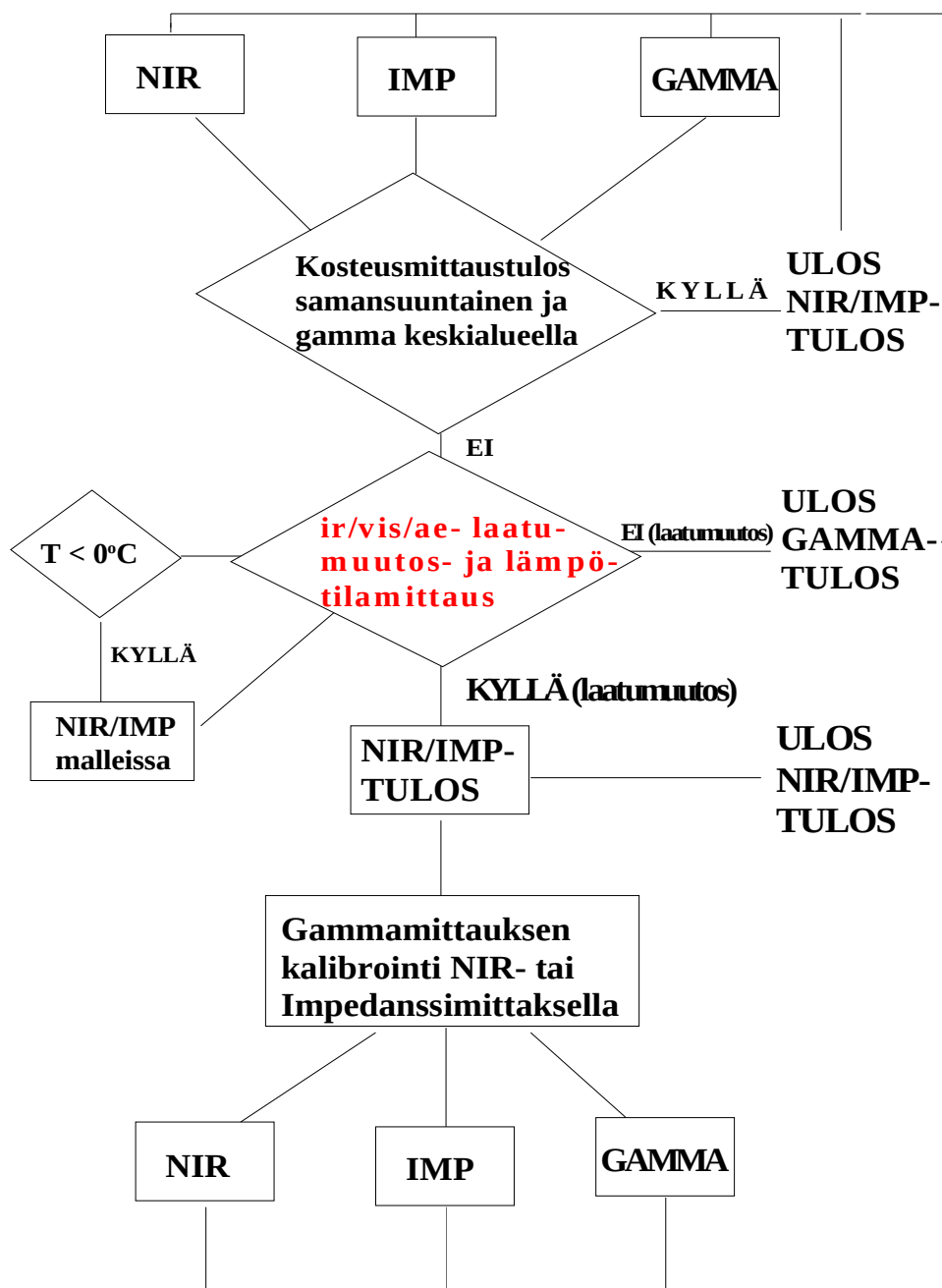
Kuva 84 Nir –kosteus- ja radiometrisen kosteusmittauksen riippuvuus 2008 selluhakeajoissa.

Menetelmien yhdistämiseen voidaan kehittää monia tapoja, mutta jokaisessa tapauksessa pitää alkuun pystyä tekemään looginen malli yhdistämiselle, joka voidaan toteuttaa edelleen ohjelmallisesti ja piiriratkaisuilla. Lähestymistapa voi olla esimerkiksi seuraava:

- kaikkien mittauksien on näytettävä samansuuntaisesti. Jos on eroavuuksia, niin nir, näkyvän valon spektri (vis) ja/tai ae -mittauksesta varmistetaan, että hakelaatu so. puulaji eikä partikkelikoko ole muuttunut. Jos laatu ei ole muuttunut, niin muita mittauksia korjataan gammamittauksella tai käytetään pelkästään sitä,
- ir-lämpötilamittauksella varmistetaan hakkeen lämpötila. Jos hake on jäässä, niin se huomioidaan nir- ja impedanssimalleissa tai kalibroinnissa,
- jos hakelaatu on muuttunut, niin käytetään edelleen nir/impedanssi-mittausta ja gammamittaus kalibroidaan uudelleen niiden mukaan.

Em. mittaustavan soveltamista tehdashakkeelle edesauttaa tieto, että hakkeen irtotiheys ei olennaisesti vaihtelee ellei puulaji ja/tai hakkuri muutu. Jos muutoksia ei ole, niin irtotiheys riippuu lähinnä kosteudesta.

Menetelmä voidaan esittää myös lohkokaaviona:



8 Jatkoehdotukset

Jatkoehdotus pohjautuu esitettyyn yhdistelmämenetelmän lohkokaavioon. Jatkohankkeessa keskitytään hakkeen laatumuutosten mittaukseen käyttäen ir- , näkyvän alueen (vis) – spektrometriaa sekä akustisen emission mittausta. Lisäksi kehitetään yhdistämistä mallitasolla eri menetelmien osalta. Hakkeen laatumuutosten mittaus voidaan helposti yhdistää eri menetelmiin. Laatumuutosten mittauksessa tarvitaan myös uusia koelinja-ajoja. Menetelmien yhdistämisessä mallitasolla voidaan käyttää myös tässä hankkeessa saatua dataa. Uusia koelinja-ajoja tarvitaan lähinnä verifiointiin.

Tutkitaan sellu- ja metsähakkeen ominaistiheyden vaihtelu eri puulajeista ja hakkuritekniikalla tuotetulla hakkeella. Selvitetään kuivatuoretiheyden ja tuoremassasta irtotilavuusmittauksella saadun irtotiheyden sekä radiometrisen tiheysmittauksen välinen yhteys. Jos tämä yhteys on määritettävissä esim. tyypillisellä selluhakkeen palakoolla tietyllä puulajilla, niin Metlan koko maata koskeva data on käytettävissä kosteuskalibrointiyhTELÖiden laskentaan. Tällöin myös radiometrinen mittaus on sovellettavissa kuivatuoretiheyden on-line – määrittelykseen.

Lähdeviitteet

Aikio, M., Suopajarvi, P., Tenhunen, J., Haapalainen, A., Seppänen, T., Alasaarela, I., Vasama, H. ja Mäntylä, M., Design and manufacturing method for IR analyzers based on mirror optics. Research activities in optoelectronics and electronics manufacturing, VTT Electronics, Oulu 2002, ss. 35-36.

Hietala, E., Evaluation of NIR techniques for on-line quality monitoring of wood raw material in pulp production, Nirwood project final report, VTT Oulu 17.5.2005.

Hillebrand, K., Polttoaineen epäpuhtauksien mittaus, Perusmittaukset γ -lähteellä Am-241, ClimBus –Teknologiaohjelma Biomassapolttoaineen käsittelytekniikan kehittäminen 2005-2007 –hanke, raportti johtoryhmälle 14.6.2005.

Järvinen, T., Malinen, J., Tiitta, M. ja Teppola P., State of art –selvitys puun kosteusmittauksesta, VTT:n Tutkimusraportti 2007, 90 s., Metsäteho Oy Puun kosteusmittaus –hanke.

Järvinen, T., PDU-scale conveyor facility, ClimBus – Teknologiaohjelman vuosiseminaari, Hyvinkää 7.-8.6.2005, VTT Process, Poster –presentation.

Järvinen, T., Polttoaineen kosteuden mittaus matalaenergistä gammasäteilyä käyttäen, VTT:n Tutkimusraportti 2007, 14 s., Ilmastonmuutoksen hillinnän liiketoimintamahdollisuudet, ClimBus –Teknologiaohjelma Biomassapolttoaineen käsittelytekniikan kehittäminen 2005-2007.

Karlsson, M., Automatiserad fukthaltsmätning vid bränslemottagning, Bestwood Sverige, presentation in VF Seminarium, Eskilstuna 11.9.2008.

Laufenberg, T., Using gamma radiation to measure density gradients in reconstituted wood products, Forest Products Journal Vol. 36 (1986), No. 2, p. 59-62.

Lappalainen T. Kuitupuun tehdasmittauksen kehittäminen 1999. Puun kosteuden mittaustekniikat. Tutkimusselostus ENE31/T0027/99.

Lestander, T., Hedman, B., On-line NIR-fukthaltsmätning för styrning av panna i värmekraftverk, SLU Enheten för Biomassateknologi och Kemi (BTK), presentation in VF Seminarium, Eskilstuna 11.9.2008.

Lestander, T. et al, On-line NIR-fukthaltsmätning för styrning av panna i värmekraftverk, Sveriges lantbruksuniversitet, Vattenfall Research and Development, Värmeforsk AB, Sverige, Juni 2008.

Lindblad, J. ja Verkasalo, E., Teollisuus- ja kuitupuuhakkeen kuiva-tuoretiheys ja painomittauksen muuntokertoimet, Metsätieteen aikakauskirja 3/2001, s. 411-431.

Ojanen, T., Puun sähköiset mittausten menetelmät, VTT Tiedotteita 1189, Espoo 1990.

Puumalainen, P., Paperin laadun ja siihen valmistusprosessissa vaikuttavien tekijöiden on-line mittaukset. Tieteellisiä julkaisuja 29, LTKK, Lappeenranta 1993. 279 s.

Rosenberg, E., Schatvet, J. and Hoydal, K., In-kiln measurements of moisture content in timber at Moelven Våler As., Third European COST E15 Workshop on wood drying: softwood drying to specific end-uses, Helsinki, Finland 2001.

Siikanen, S., Zeiss-NIR – laitteistolla saatuja mittaustuloksia, Yhdistelmämittaus hakkeen kosteuden on-line -määrittämiseen, Ilmastomuutoksen hillinnän liiketoimintamahdollisuudet, ClimBus – Teknologiaohjelma, raportti johtoryhmälle 16.1. ja 18.6.2008.

Tiitta M. (1992) Gamma-ray instrument for measuring internal moisture content and density distributions in wood. VTT Julkaisuja 770, Espoo, Finland.

Tiitta, M., Tomppo, L. ja Lappalainen, R., Vertaileva kosteusmittaus, biomassapolttoaineen käsittelytekniikan kehittämishanke, päätulokset, Ilmastomuutoksen hillinnän liiketoimintamahdollisuudet, ClimBus – Teknologiaohjelma, Biomassapolttoaineen käsittelytekniikan kehittäminen 2005–2007 Tutkimusraportti, Kuopio 2007, 14 s.

Vakkilainen, E., Pesari, J., Polttotekniikan lisensiaattiseminaari 1983-1984, Lappeenranta, p. 44-52.

WO200045157 VTT:n patenttihakemus ”Pistemäisen gammasäteilyn vaimenemiseen perustuvasta kosteuden mittausten menetelmästä ”