

## Paukemelun mittausdatan analyysi

Paukemelun mittausdatasta analysoitiin koetalossa mitatun paukemelun esiintymisen ajallista yhteyttä CLT-massiivipuu-elementtien molemmilta pinnoilta mitattuun lämpötilaan ja ilman suhteelliseen kosteuteen. Paukeääniä on mitattu siten, että arkisin mittauksen keruu on päällä klo 0.00 – 7.30 sekä 18.00 – 24.00 ja lauantaisin ja sunnuntaisin 24 h. Tämä aiheutti ongelmia, kun haluttiin tutkia paukeäänien esiintymisfrekvenssien ajallista vaihtelua lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vaihtelujen kanssa, joita mitattiin koko ajan. Mittausdatan paukeäänit onkin graafisissa tarkasteluissa arvioitu spline-interpoloinnilla niiltä osin, jolloin mittalaite on ollut pois päältä. Mittausaika kesti maaliskuulta 2014 tammikuulle 2015.

### Mittausdatasta analysoidut suureet

Mittausdatasta on konstruoitu kuukausittaiset graafiset esitykset, joissa nähdään **paukemelun** esiintymisen ajalliset yhteydet CLT-elementin ulko- ja sisäpinnoilta mitattuihin **lämpötilan**, ilman **suhteellisen kosteuden** sekä myös lasketun **vesihöyryn osapaineen** vaihteluihin. Osoittautuu, että **absoluuttisen kosteuden ja vesihöyryn osapaineen vaihtelut korreloivat samalla tavalla paukeäänien esiintymisfrekvenssin vaihtelun kanssa**. Tämä on perusteltua, kun tarkastelee näiden suureiden keskinäistä riippuvuutta.

Ilman lämpötila ja suhteellinen kosteus määrittävät ilmassa olevan vesihöyryn absoluuttisen kosteuden  $\rho$  ( $\frac{kg}{m^3}$ ) eli ilmassa olevan vesihöyryn massan tilavuusyksikköä kohden. Toisaalta ne määrittävät myös ilmassa olevan vesihöyryn osapaineen yhtälön (1) mukaisesti.

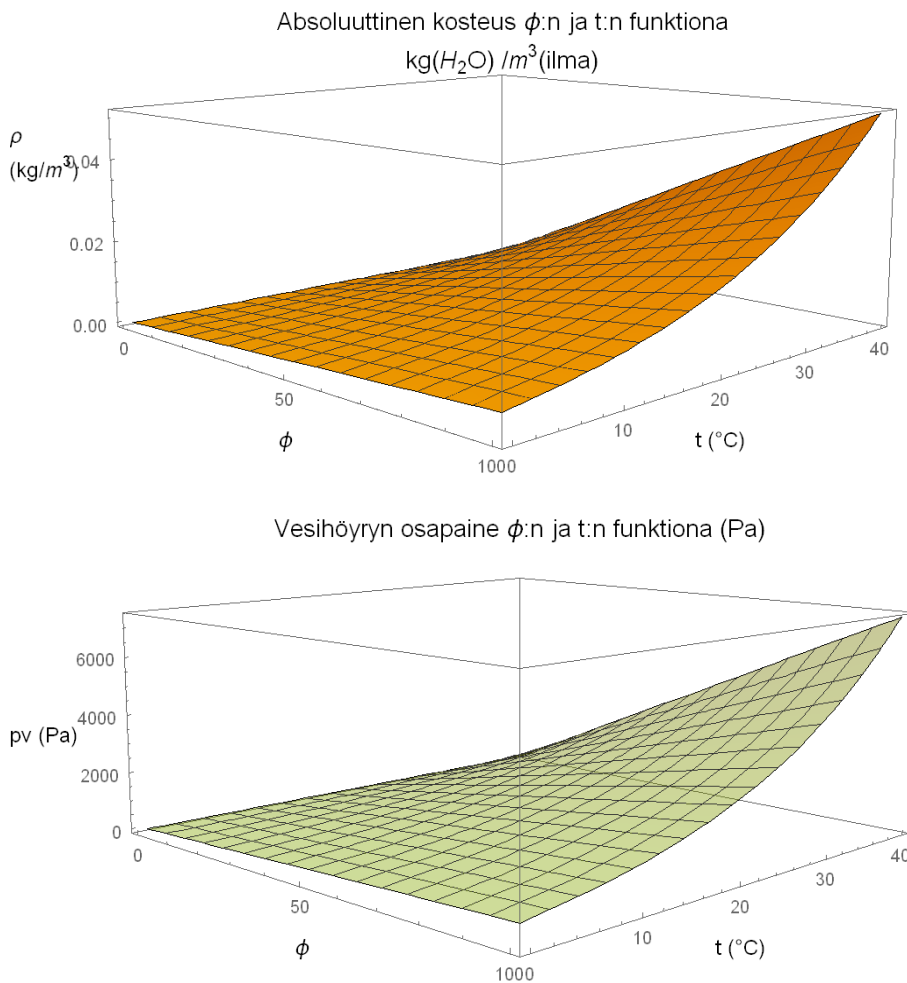
$$p_v(\phi, t) = \phi p_{sat}(t), \quad (1)$$

missä  $\phi$  = suhteellinen kosteus ja  $p_{sat}$  = kylläisen ilman vesihöyryn osapaine, joka riippuu vain lämpötilasta  $t$ . Kylläisen ilman vesihöyryn osapaine on kokeellisesti taulukoitu ja se voidaan muuttaa malliksi käyttämällä esimerkiksi polynomifunktion sovitusta. Suhteellisen hyvä malli saadaan jo 3. asteen polynomifunktiolla, mutta korkeamman asteisilla polynomeilla voidaan sovitusta tarkentaa lisää.

Käyttämällä ideaalikaasun tilanyhtälöä voidaan absoluuttiselle kosteudelle johtaa seuraava riippuvuus vesihöyryn osapaineesta (Hautala M., Peltola H., 2002)

$$\rho(\phi, t) = \frac{p_v(\phi, t)}{461.4 (t+273.15) \frac{J}{kg}} = \frac{\phi p_{sat}(t)}{461.4 (t+273.15) \frac{J}{kg}}, \quad (2)$$

missä lämpötila  $t$  annetaan Celsius-asteina. Yhtälöt (1) ja (2) osoittavat, että vesihöyryn osapaine ja absoluuttinen kosteus ovat molemmat suoraan verrannollisia suhteelliseen ilmankosteuteen  $\phi$ . Lämpötilariippuvuus noudattaa molemmilla samanlaista konveksin polynomifunktion mallia kuin kylläisen ilman vesihöyryn osapaineella  $p_{sat}(t)$ . Absoluuttisella kosteudella polynomi on kaavan (2) nojalla yhtä astetta alempi kuin vesihöyryn osapaineella.

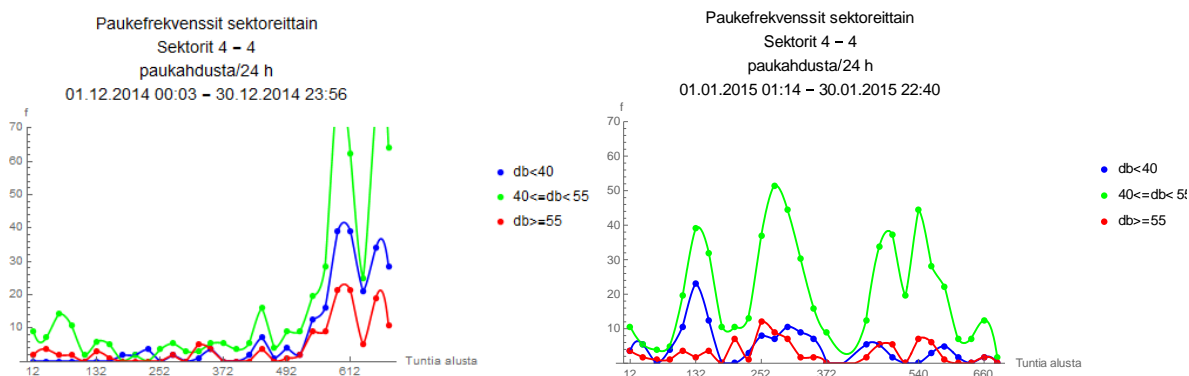


Kuva 1. Absoluuttinen kosteus (ylempi) ja vesihöyryn osapaine (alempi) suhteellisen kosteuden ja lämpötilan funktiona

Lineaarinen riippuvuus suhteellisesta kosteudesta ilmenee suorina vakiolämpötilassa ja käyräviivainen riippuvuus lämpötilasta näkyy siirryttäessä pinnalla vakio ilmankosteudessa. Kuvan 1 mallinnuksessa kylläisen ilman vesihöyryn osapaine  $p_{sat}$  on laskettu spline-interpoloinnilla taulukkotiedoista (Y.A. Çengel, M.A. Boles, 2011).

## Tulokset

Paukemelun esiintymisfrekvensseistä on tehty kuukausittaiset ja sektorikohtaiset desibelija-kaumien graafit (esimerkkinä **Kuva 2.**). Niissä on kuvattu vuorokautiset paukeäänien esiintymisfrekvenssit kolmella desibelialueella  $db < 40$ ,  $40 \leq db < 55$  ja  $db \geq 55$ . Kaikkiin kuvauksiin on liitetty tieto sektorista, paukeäänien laskentavälistä sekä mittausjaksosta.



Kuva 2. Joulukuun 2014 ja tammikuun 2015 paukeäänien jakaumat eri desibelialueilla sektorilla 4

Sektorikohtaisista graafeista voidaan havaita selvästi mm.

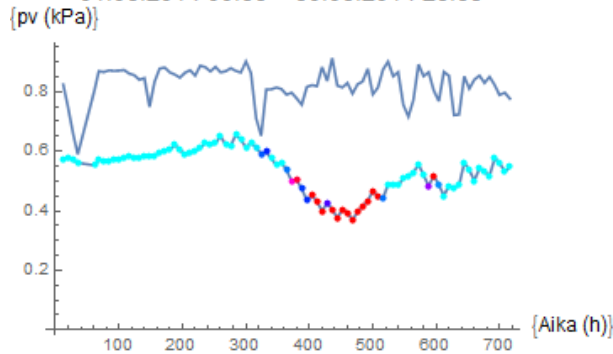
- Paukeäänien esiintymisfrekvenssien ”piikit” ajoittuvat kaikilla desibelialueilla muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta samalle mittausajanjaksolle
- Pitempään jatkuvat suuret esiintymisfrekvenssit ilmenivät lähes kaikilta seinäsektoreilta samalla mittausajanjaksolla. Seinäsektoreissa sekä ylä- että alakerrassa esiintyi aika suuriakin eroja.
- Yleisesti paukemelun esiintymisfrekvenssit olivat korkeita vain talvikuukausina maaliskuussa ja joulukuussa 2014 sekä tammikuussa 2015.

Paukeäänien mahdollista ajallista riippuvuutta ilman suhteellisen kosteuden, lämpötilan ja lasketun vesihöyryn osapaineen vaihteluista on tutkittu mittausdatasta edellisten lisäksi kolmen muun kuukausittaisen ja sektorikohtaisen kuvaajan avulla (**Kuva 3.**).

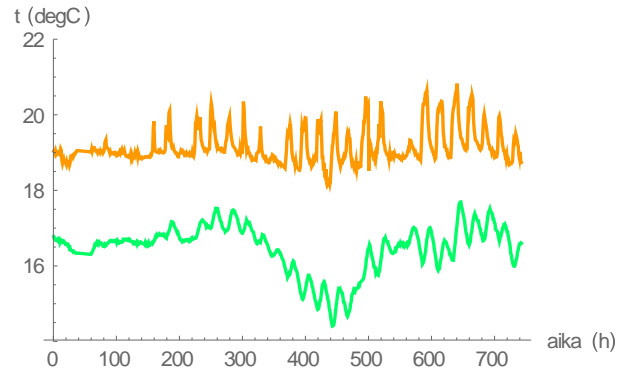
- **Lämpötilan** ja **suhteellisen kosteuden** ajalliset vaihtelut kunkin CLT-elementin sisä- ja ulkopinnalla. Mittaukset oli tehty minuutin välein, mutta graafeihin on laskettu tuntikeskiarvot.

- Lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvoista lasketun **vesihöyryn osapaineen** vaihtelut CLT-elementin sisä- ja ulkopinnalla. Ulkopinnan murtoviivaan on liitetty väritetyt pisteet, jotka kuvaavat kyseisillä ajankohdilla vallitsevan **paukeäänien esiintymistiheyden suhteellista voimakkuutta** kyseisellä mittausjaksolla laskentavälinä 8 h. Vaalean sininen merkitsee korkeintaan 50%:sta arvoa mittausjakson maksimista, josta asteittain muuttuen punaiseksi, joka vastaa maksimia.

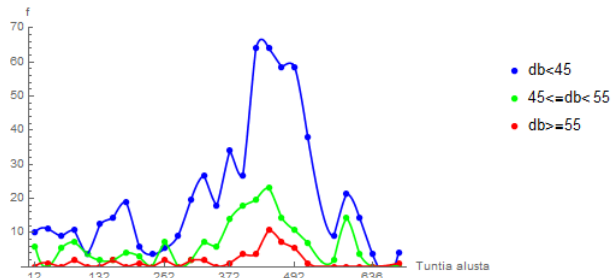
Pauke-pv kuvaus: 2014\_03\_01\_31\_pohjois.csv  
Sektorit {1, 6}, paukahdusta/8 h, sensoriD {1, 2}  
01.03.2014 00:33 – 30.03.2014 23:35



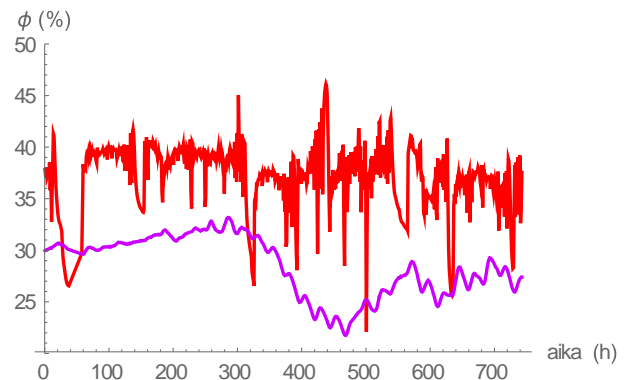
Sen 1 (CLT-sisä) & Sen 2 (CLT-ulko)  
Maalis – 2014



Paukefrekvenssi  
Mikrofonin sektorit {1, 6} Yläkerta  
paukahdusta/24 h  
01.03.2014 00:33 – 30.03.2014 23:35



Sen 1 (CLT-sisä) & Sen 2 (CLT-ulko)  
Maalis – 2014



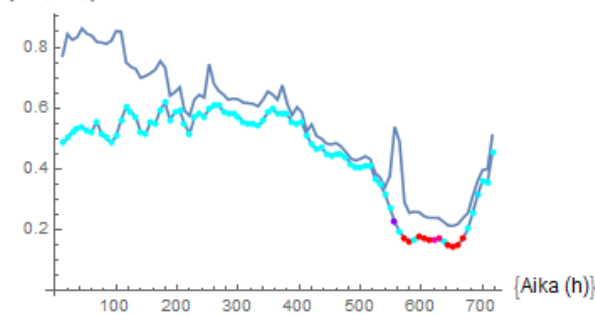
Kuva 3. Maaliskuun 2014 mittaus tulokset pohjoisseinän sisä- ja ulkopinnalta. a) (vasen ylä) CLT-elementin vesihöyryn osapaine sekä paukemelun esiintymisfrekvenssit (merkitty ulkopinnan murtoviivaan pisteillä). b) (vasen ala) Paukeäänien jakaumat eri desibelialueilla c) Lämpötilan ja d) suhteellisen kosteuden vaihtelu.

Mittausdatan graafisten tarkastelujen tuloksena saadaan seuraavaa:

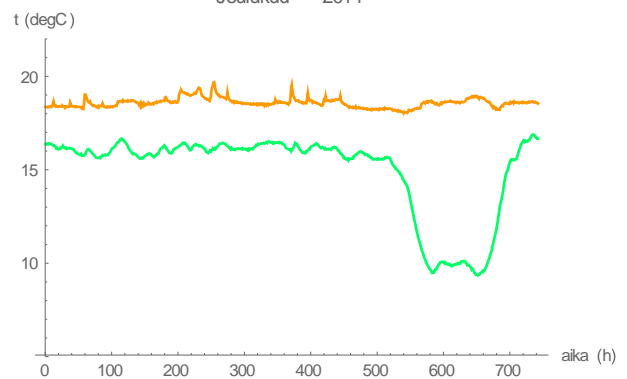
- Merkittävää paukemelua näyttäisi syntyvän tilanteessa, jossa CLT-elementin ulko- tai sisäpinnan lämpötila (vihreä) ja suhteellinen kosteus (violetti) molemmat saavuttavat hyvin alhaisen tason, jolloin vesihöyryn osapaine elementin pinnalla samalla pienenee

voimakkaasti. Tämä tapahtui elementin ulkopinnalla maaliskuussa 2014 ja tammi-  
kuussa 2015, jolloin elementin sisäpinnan ja ulkopinnan välillä oli selkeä vesihöyryn osa-  
paineen ero. Edellisten lisäksi joulukuussa 2014 vesihöyryn osapaine laski alhaiseksi  
myös sisäpinnalla ollen samaa suuruusluokkaa ulkopinnan kanssa, mikä johtui siitä, kun  
ilmankostutin oli pois päältä (**Kuva 4.**). Tämä viittaisi siihen, että elementin sisä- ja ulko-  
pinnan välinen jännite ei olisi paukeäänien ensisijainen aiheuttaja, vaan äänet syntyvät  
pinnan olosuhdemuutoksista.

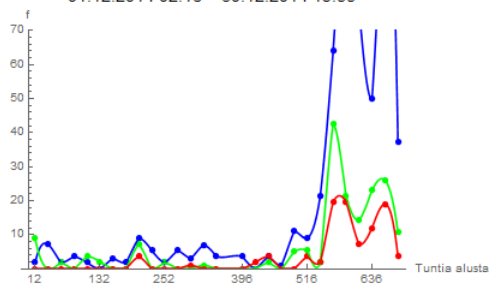
Pauke-pv kuvaus: 2014\_12\_01\_31\_pohjois.csv  
Mikr.Sek {7, 12}, paukahdusta/8 h, sensorID {13, 14}  
01.12.2014 02:16 - 30.12.2014 19:55  
[pv (kPa)]



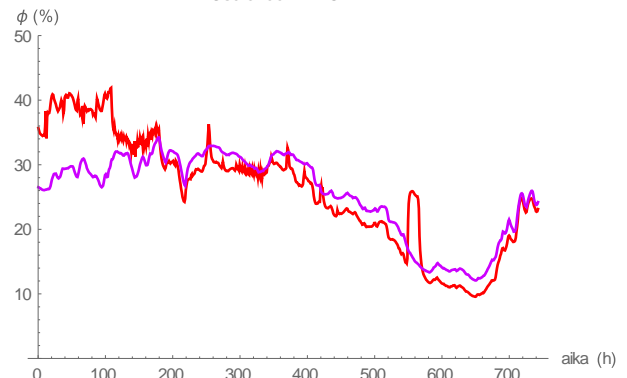
Sen 13(CLT-sisä) & Sen 14(CLT-ulko)  
Joulukuu - 2014



Paukefrekvenssi  
Mikrofonin sektorit {7, 12} Alakerta  
paukahdusta/24 h  
01.12.2014 02:16 - 30.12.2014 19:55



Sen 13(CLT-sisä) & Sen 14(CLT-ulko)  
Joulukuu - 2014



Kuva 4. Joulukuun 2014 mittaustulokset pohjoisseinän sisä- ja ulkopinnalta. a) (vasen ylä) CLT-elementin vesihöyryn osapaine sekä paukemelun esiintymisfrekvenssit (merkitty ulkopinnan murtoviivaan pisteillä). b) (vasen ala) Paukeäänien jakaumat eri desibelialueilla c) Lämpötilan ja d) suhteellisen kosteuden vaihtelu.

- Kesäkuukausina paukeäänien esiintymisfrekvenssit ovat matalia, vaikka elementin ulkopinnan lämpötila ja samalla vesihöyryn osapaine vaihtelevat merkittävästi niin lyhytkestoisesti kuin myös pitkäkestoisesti. Syksyllä CLT-elementin ulkopinnan lämpötilan ja suhteellisen kosteuden keskimääräiset tasot alkoivat hiljalleen laskea, mutta paukemelua ei esiintynyt runsaammin. Kesällä ja syksyllä suhteellisen kosteuden ja vesihöyryn osapaineen keskimääräiset tasot ovat kuitenkin vielä suhteellisen korkeita talvikuukausiin nähden.
- Lyhytkestoiset vuorokauden sisällä tapahtuvat lähinnä suhteellisen kosteuden vaihtelujen aiheuttamat vesihöyryn osapaineen laskut eivät aiheuta merkittävästi paukemelua.

## Johtopäätökset

Aikavälillä tammikuu, 2014 – tammikuu, 2015 CLT-koetalon massiivipuulementeissä suoritettujen mittaustulosten analyysin perusteella voimakkaamman paukemelun esiintyminen liittyy elementin pinnalla tapahtuviin lämpötila- ja kosteusolosuhteiden muutoksiin. Tyypillisesti runsasta paukemelua esiintyi, kun elementin pinnalle muodostui poikkeuksellisen kylmät ja kuivat olosuhteet, jolloin vesihöyryn osapaine ja samalla absoluuttinen kosteus laskevat hyvin alhaiselle tasolle.

Mittausjakson aikana vesihöyryn osapaineen keskimääräinen taso CLT elementin ulkopinnalla kasvoi maaliskuusta 2014 keskimääräisestä arvosta **0.5 kPa** elokuuhun arvoon **1.5 kPa**, josta se taas aleni asteittain joulukuun kuivempiin ajanjaksoihin arvoon **0.2 kPa** saakka ja tammikuussa 2015 alimmillaan jopa arvoon **0.15 kPa** saakka. Vastaavat suhteellisen kosteuden tasot runsaamman paukemelun yhteyksissä olivat 10 % - 20 %.

## Lähteet

Hautala M., Peltola H., 2002, Insinöörin (AMK) FYSIIKKA, Osa 1

Y.A. Çengel, M.A. Boles, 2011, Thermodynamics 7<sup>th</sup> ed., ISBN 978-0-07-352932-5