



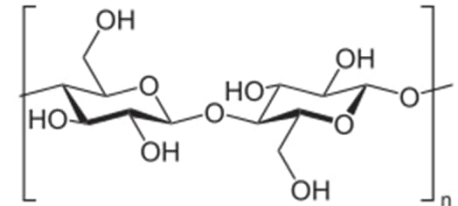
Kutterinlastulla eristettyjen seinien laskennalliset tarkastelut

ECOSAFE-hankkeiden loppuseminaari

**Petteri Huttunen
2.6.2023**

Tausta

- Puun ja puupohjaisten materiaalien lämpö- ja kosteustekniseen käyttäytymiseen vaikuttaa tiedettävästi seuraavat tekijät, joita ei oteta huomioon ”käyttövalmiissa” laskentaohjelmissa:
 - Tasapainokosteuden lämpötilariippuvuus (etenkin alle 0 °C alueella)
 - *Hystereesi* eli tasapainokosteuden riippuvuus historiasta sekä kosteuspitoisuuden kasvusuunnasta (adsorptio ja desorptio)
 - Ns. ei-Fickiaaninen käyttäytyminen (huokosilman ja puun solumassan välinen lokaali epätasapaino, ”sorption dynaamisuus”)
- Rakennusfysiikan tutkimusryhmässä meneillään väitöstutkimus, jossa näitä ilmiöitä on tutkittu kokeellisesti huokoisesta puukuitulevystä (LDF, 280 kg/m³). Tuloksia voidaan jossain määrin soveltaa myös muihin puupohjaisiin materiaaleihin (kuten esim. kutterinlastueristeelle).
- Kosteuden sitoutuminen (adsorptio) puussa perustuu selluloosaketjujen sisältämiin hydroksyyliiryhmiin (-OH), joihin vesimolekyyli takertuu muodostaen vetysidoksen. Sidos voi myös katketa palautuvana prosessina (desorptio).
- Eri puupohjaisten tasapainokosteuksia voidaan näin ollen arvioida materiaalin sisältämän selluloosamäärän eli käytännössä tiheyden perusteella.



Tasapainokosteuden lämpötilariippuvuus

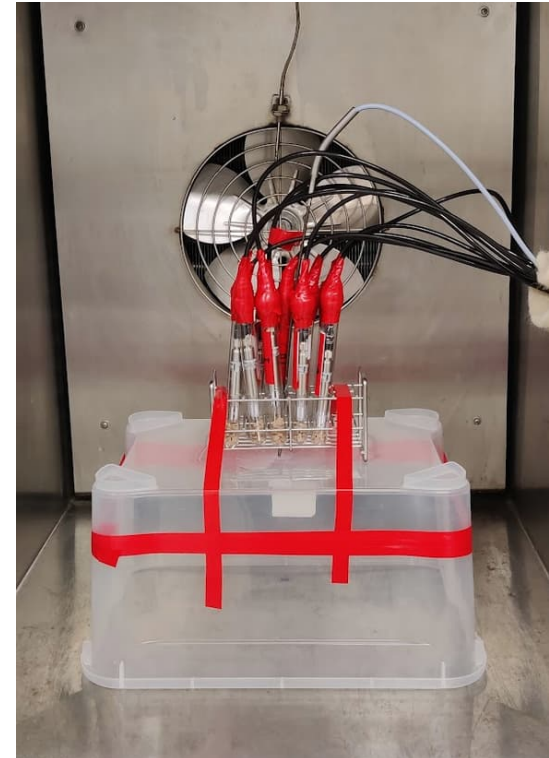
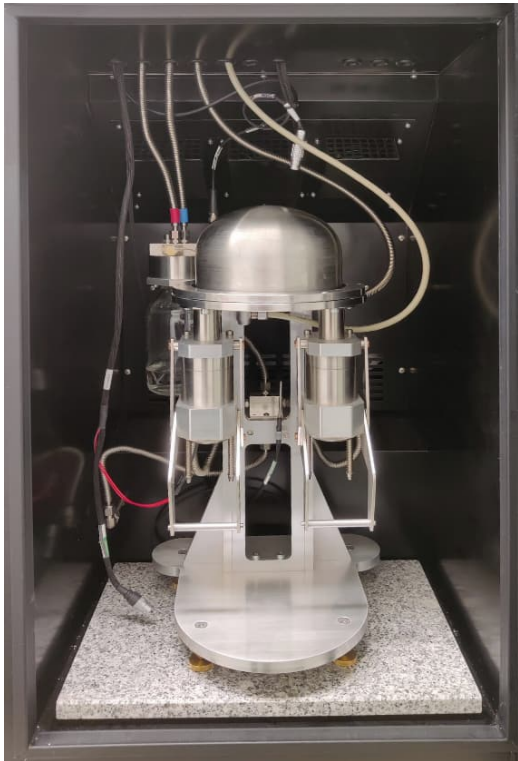
- Puun kosteuskapasiteetti **kasvaa** lämpötilan laskiessa.
 - Kirjallisuudessa jonkin verran epäselvyyttä: Käännykö kapasiteetin muutoksen suunta jossain kohtaa pakkasen puolella?
- Tämän tutkiminen suoralla menetelmällä (punnitukset eri olosuhteissa) on kuitenkin haasteellista johtuen mm. siitä, että suhteellista kosteutta on hankala laboratoriossakin säätää tarkasti kylmissä lämpötiloissa.
- Uudet mittaukset (TUNI 2022):
 - Tasapainotetaan huoneenlämmössä useita eri kosteuspitoisuuksia koeputkiin suljettaviin näytteisiin. Koeputkiin myös T/RH-sensorit.
 - Viedään koeputket lämpösäätökaappiin, jossa pudotetaan lämpötilaa portaittain.
 - Koska koeputket on sinetöity, kosteuspitoisuus pysyy putken sisällä olevassa näytteessä samana testin aikana. Koeputkesta mitattava suhteellinen kosteus kuitenkin laskee koska materiaalin kyky sitoa kosteutta kasvaa.



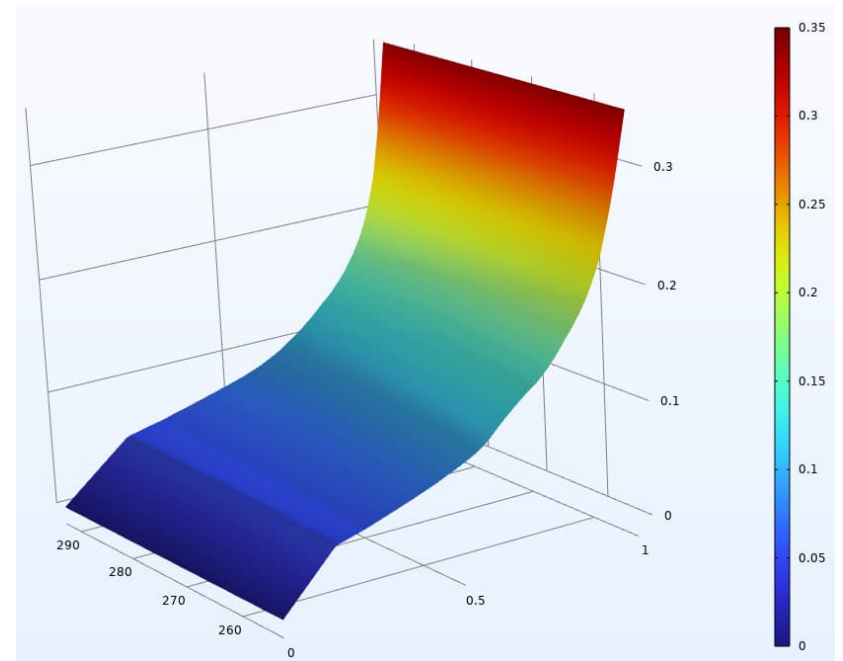
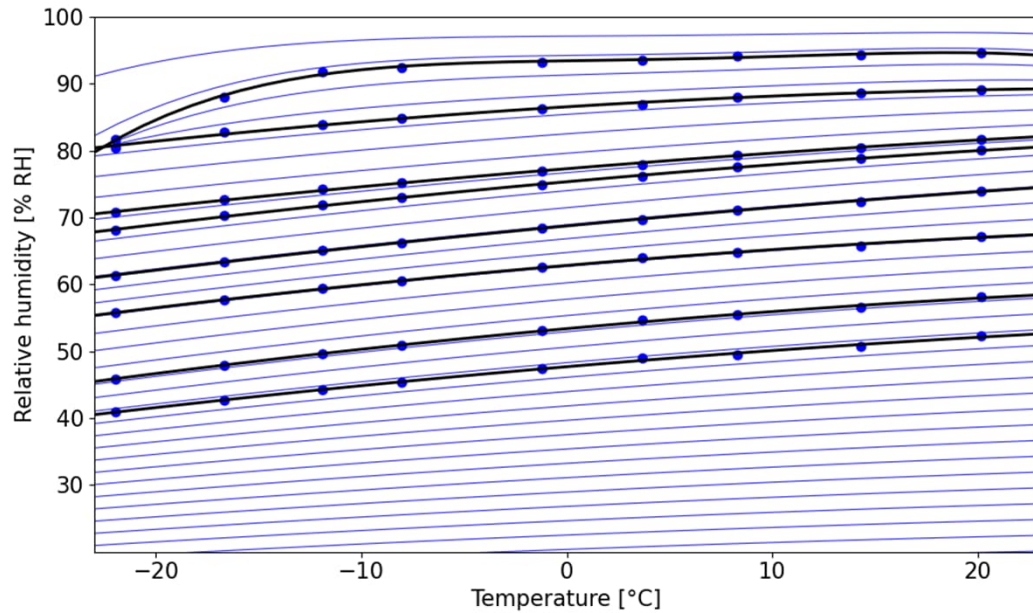
Adsorptio- ja desorptiokäyrien
mittaus LDF-levystä valmiilla
laitteistolla 20 asteessa (nopea
mittaus, pienet näytteet, n. 30
mg):



Valmistellaan useita koeputkia, joihin asetetaan eri kosteuspitoisuuksiin
tasapainotettuja näytteitä (aluksi täysin vettyneitä → annetaan näytteiden
kuivua eri pituisia aikoja, desorptio-tilanne).
→ Viedään koeputket lämpökaappiin, jossa tarkastellaan kuinka koeputkiin
näytteiden lisäksi asetettujen RH-anturien lukemat muuttuvat.
Kosteuspitoisuus näytteissä pysyy vakiona, mutta mitattava RH muuttuu.



→ Mittaustuloksista voidaan rakentaa sopivilla interpolointi ja ekstrapolointitekniikoilla laskentaohjelman hyödynnettävä lämpötilariippuva tasapainokosteusfunktio:



Tasapainokosteuden hystereesi

- Laskennallisessa tarkastelussa ei tarkkaan ottaen ole tärkeää tietää tasapainokosteuksia itsessään vaan **tasapainokosteuskäyrän kulmakerroin** suhteellisen kosteuden suhteen. Kyseistä derivaattaa kutsutaan ***ominaiskosteuskapasiteetiksi*** ja se on suhteellisen kosteuden (ja lämpötilan) funktio vastaavasti kuin tasapainokosteuskäyräkin.
- Materiaalille voidaan määrittää kaksi tasapainokosteuskäyrää:
 - Adsorptiokäyrä: aloitetaan kuivatusta (0 % RH) koekappaleesta, jonka kosteuspitoisuutta nostetaan asteittain ja seurataan kappaleen painon kehitystä
 - Desorptiokäyrä: aloitetaan märästä koekappaleesta viemällä se lähes 100 % RH olosuhteisiin ja pudotetaan suhteellista kosteutta asteittain
- Todellisissa tilanteissa rakennusmateriaalit kokevat jatkuvaa muutosta adsorptio- ja desorptiotilanteiden välillä. Materiaali seuraa adsorptio- ja desorptiokäyrien välillä kulkevia käyriä (eng. *scanning curve*).

Uusi hystereesimalli

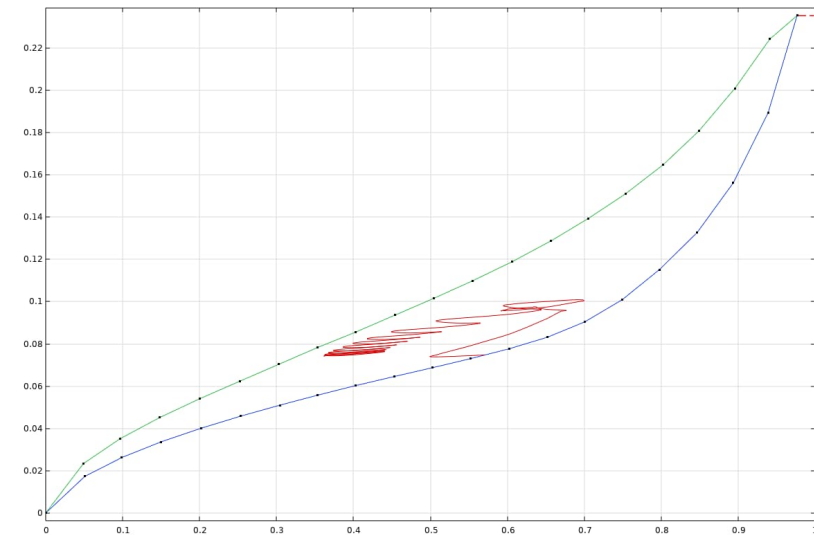
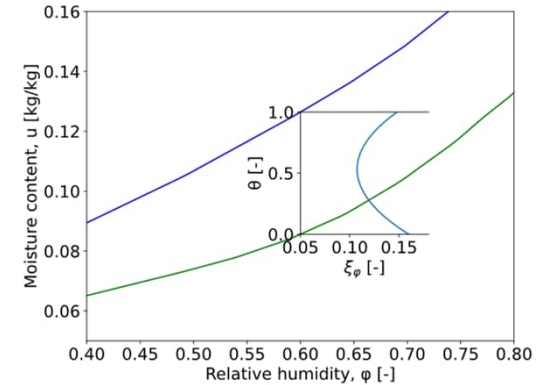
- Kirjallisuudesta löytyy aiemmin käytettyjä hystereesimalleja (mm. Rode, Frandsen)
- Uusi malli, joka mahdollisesti paremmin säädettävissä:

$$\theta = \frac{u - u_{ads}(\varphi)}{u_{des}(\varphi) - u_{ads}(\varphi)}$$

$$\frac{\partial w(\varphi, T)}{\partial t} = \frac{\partial w}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \xi_{\varphi, hys}(\varphi, T) \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \xi_T(\varphi, T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$\xi_{\varphi, hys} = \begin{cases} \omega_{a1} \xi_a \cdot (1 - 3\theta + 2\theta^2) + \omega_{a,2} \cdot \left(\frac{\omega_{a,1} \xi_a + \xi_d}{2} \right) \cdot (4\theta - 4\theta^2) + \xi_d \cdot (2\theta^2 - \theta) & \text{when } \frac{\partial \varphi}{\partial t} < 0 \\ \omega_{d1} \xi_d \cdot (1 - 3\theta + 2\theta^2) + \omega_{d,2} \cdot \left(\frac{\xi_a + \omega_{d,1} \xi_d}{2} \right) \cdot (4\theta - 4\theta^2) + \xi_a \cdot (2\theta^2 - \theta) & \text{when } \frac{\partial \varphi}{\partial t} \geq 0 \end{cases}$$

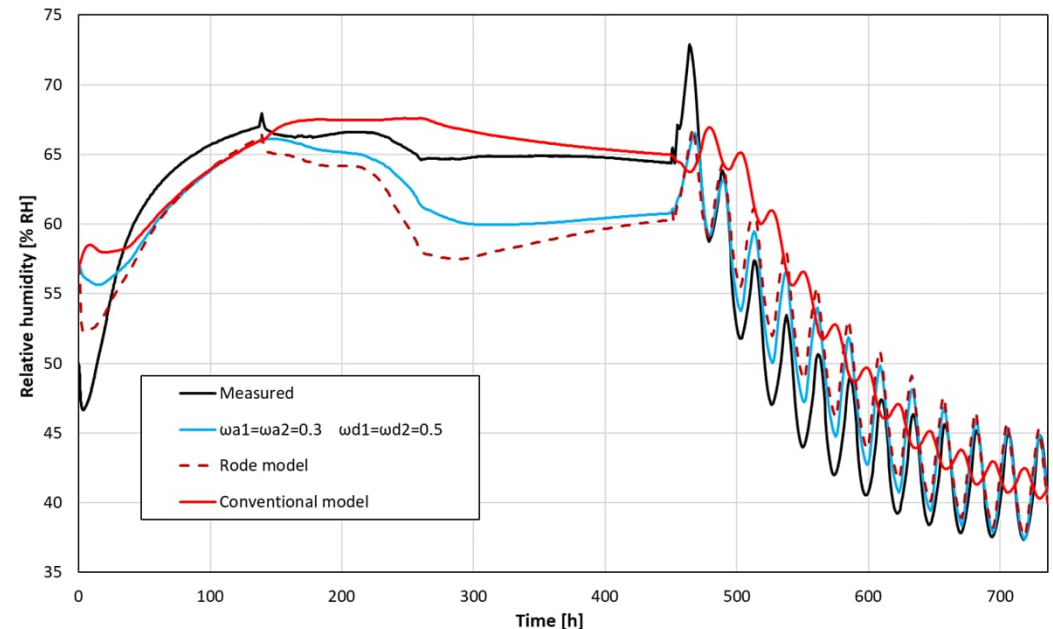
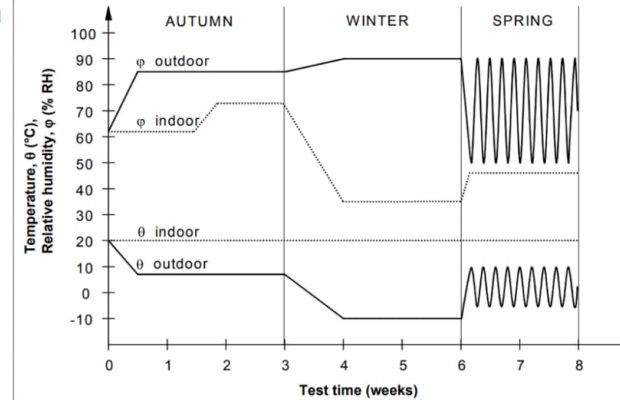
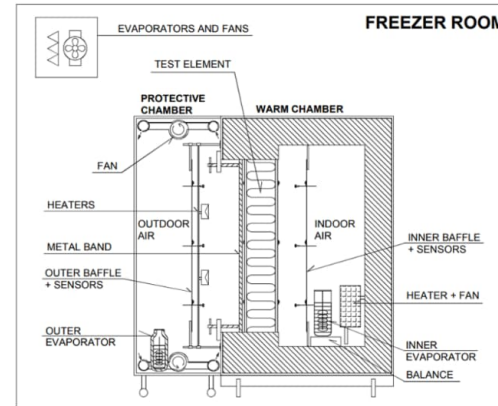
$$\xi_T(\varphi, T) = \rho_{dry} \cdot \left[\frac{\partial u_a(\varphi, T)}{\partial T} \cdot (1 - \theta) + \frac{\partial u_d(\varphi, T)}{\partial T} \theta \right]$$



Uusi hystereesimalli

- Uudet laskennassa tarvittavat parametrit etsitty toistaiseksi ”trial-and-error” tyylistä vertaamalla laskentatuloksia seinärakennelaboratoriokokeen tuloksiin
- Rakenne:
 - 25 mm puukuitutuulensuoja
 - 173 mm lasivilla
 - Höyrynsulku + kipsilevy

$$\omega_{a1} = \omega_{a2} = 0.3 \quad \omega_{d1} = \omega_{d2} = 0.5$$

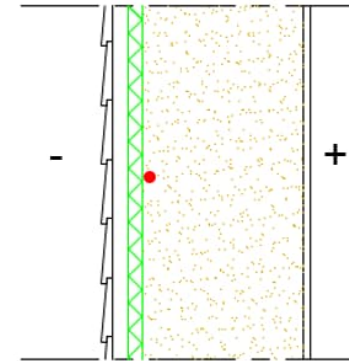


Kutterinlastulla eristetty koeseinä

- Mittausaika: 30.9.2020...18.11.2020
- Rakenne:
 - 300 mm Pölkky kutterinpurueristys + 25 mm Hunton tuulensuojalevy
 - Pohjoinen



- Tarkastelukohta



Rakennetyyppi E4

Puuverhous	22 mm
Tuuletusväli	30 mm
Hunton puukuitutuulensuojalevy	25 mm
Pölkky kutterinpurueristys	300 mm
Vaneri	15 mm

Laskentatuloksia 1

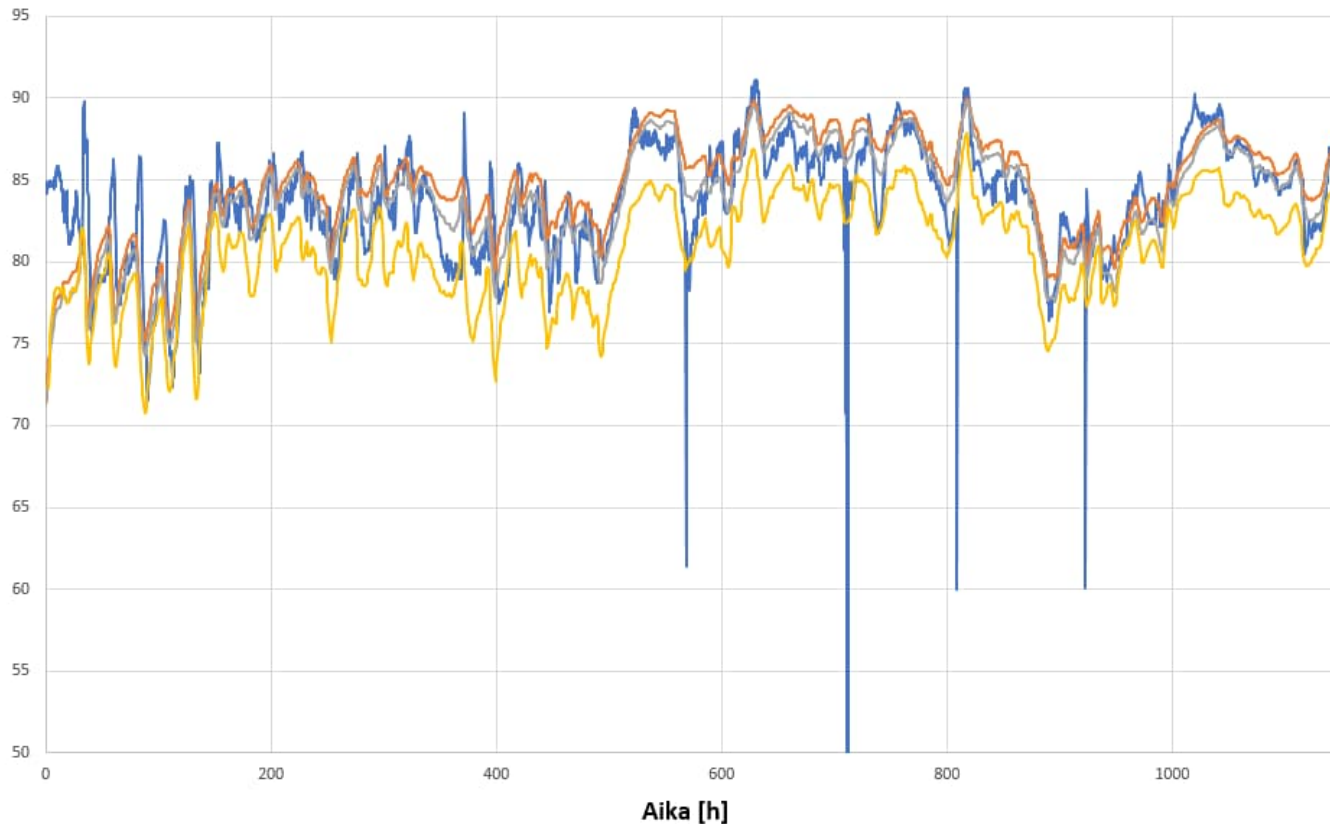
Tuulensuojalevyn taustan RH



- Sininen = mittaus
- Oranssi = konventionaalinen malli
- Harmaa = Hystereesi + lämp.riip.
- Keltainen = Hystereesi + lämp.riip. + "ei-Fick."

Laskentatuloksia 2

Tuuletusvälin RH



Sininen = mittaus

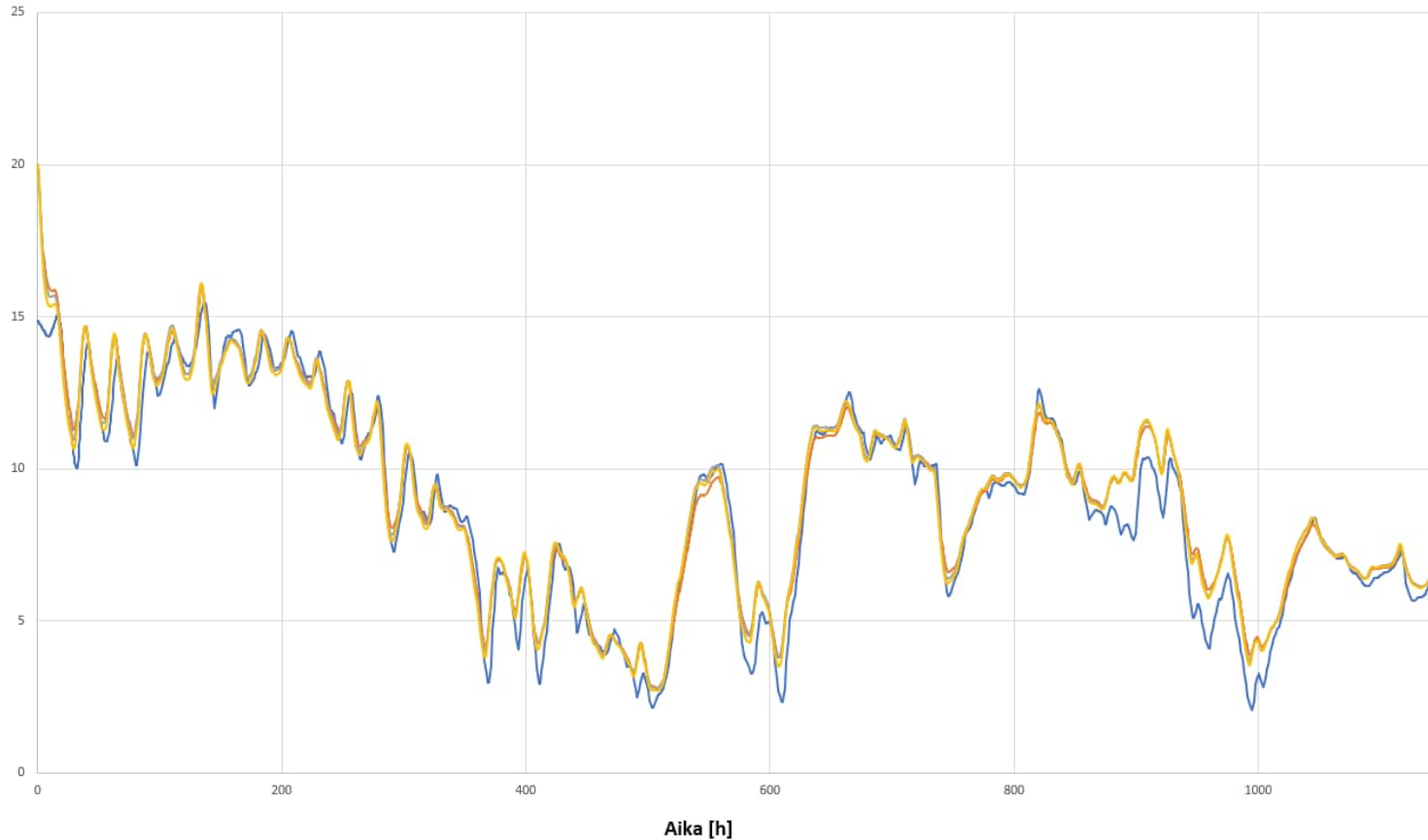
Oranssi = konventionaalinen
malli

Harmaa = Hystereesi +
lämp.riip.

Keltainen = Hystereesi +
lämp.riip. + "ei-Fick."

Laskentatuloksia 3

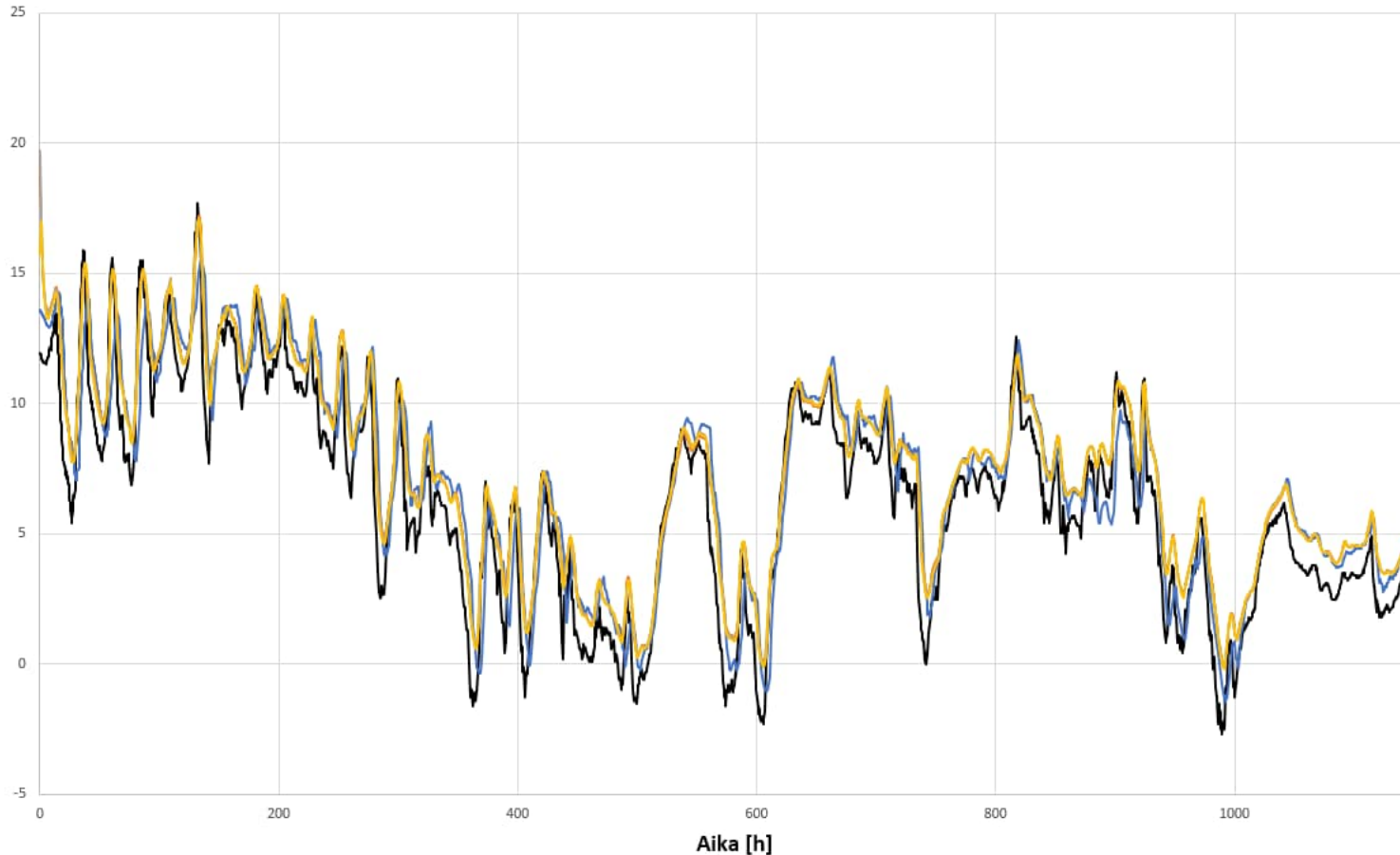
Tuulensuojalevyn taustan lämpötila



- Sininen = mittaus
- Oranssi = konventionaalinen malli
- Harmaa = Hystereesi + lämp.riip.
- Keltainen = Hystereesi + lämp.riip. + "ei-Fick."

Laskentatuloksia 4

Tuuletusvälin ja ulkoilman lämpötila



- Sininen = mittaus (TS-tausta)
- Oranssi = konventionaalinen malli
- Harmaa = Hystereesi + lämp.riip.
- Keltainen = Hystereesi + lämp.riip. + "ei-Fick."
- Musta = ulkoilma

Tarkastelut käyttäen mitoitusvuosia

Tarkastellaan kuinka vastaavat kutterinlastulla eristetyt seinät käyttäytyvät konventionaalisella vs. lämpötilariippuvalla + hystereettisellä laskentamallilla.

Käytetään ”yleiskriittistä” mitoitusvuotta Jokioinen 2011 nykyilmastossa ja tulevaisuuden ilmastossa (Jokioinen 2011 RCP45 2050). Julkisivun suunta pohjoinen.

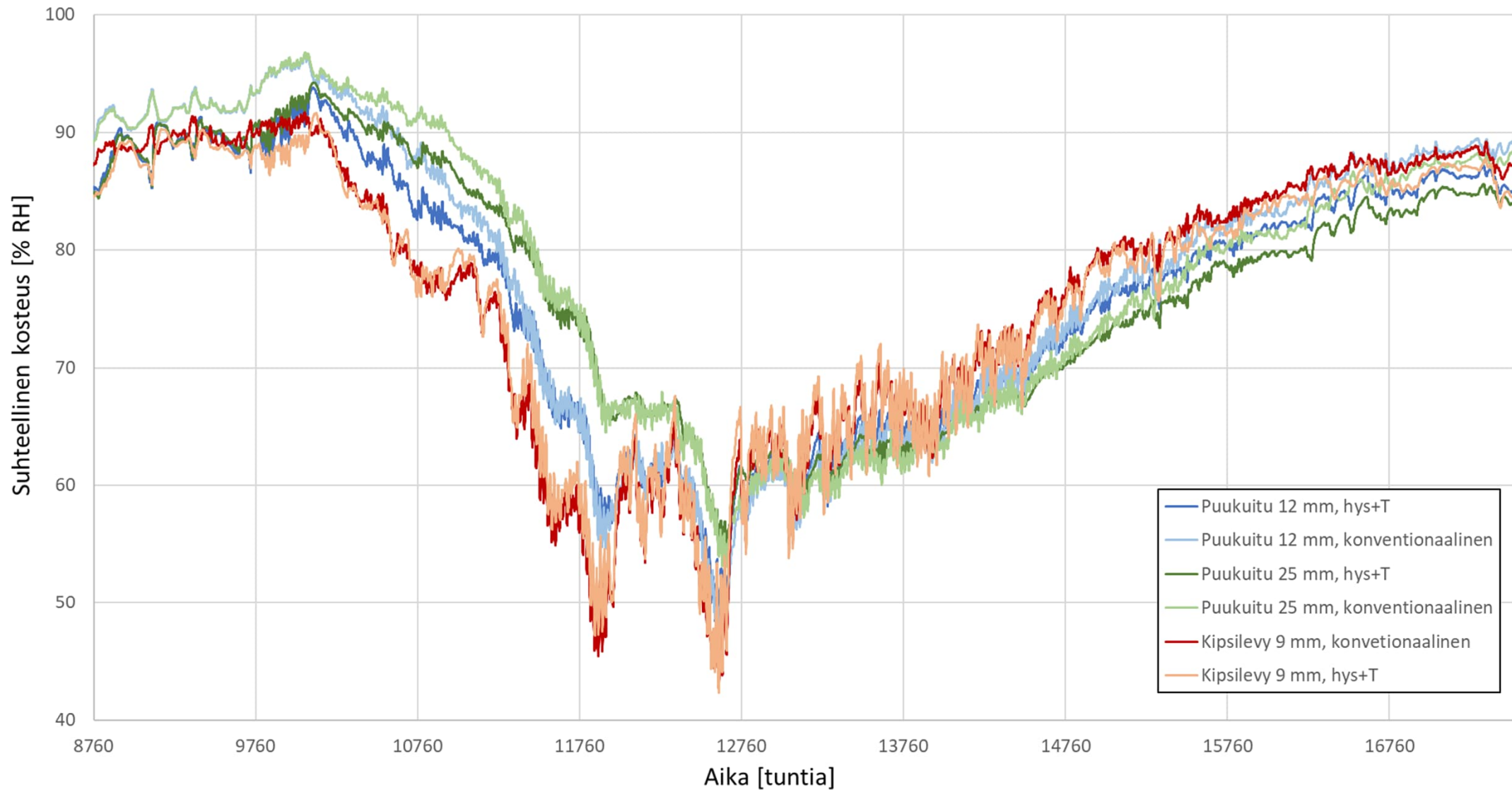
Sisäilma vakiolämpötilassa 22 °C, kosteusluokka 2. Ilmanvaihtuvuus tuuletusraossa 50 1/h.

Laskentaohjelma Comsol Multiphysics.

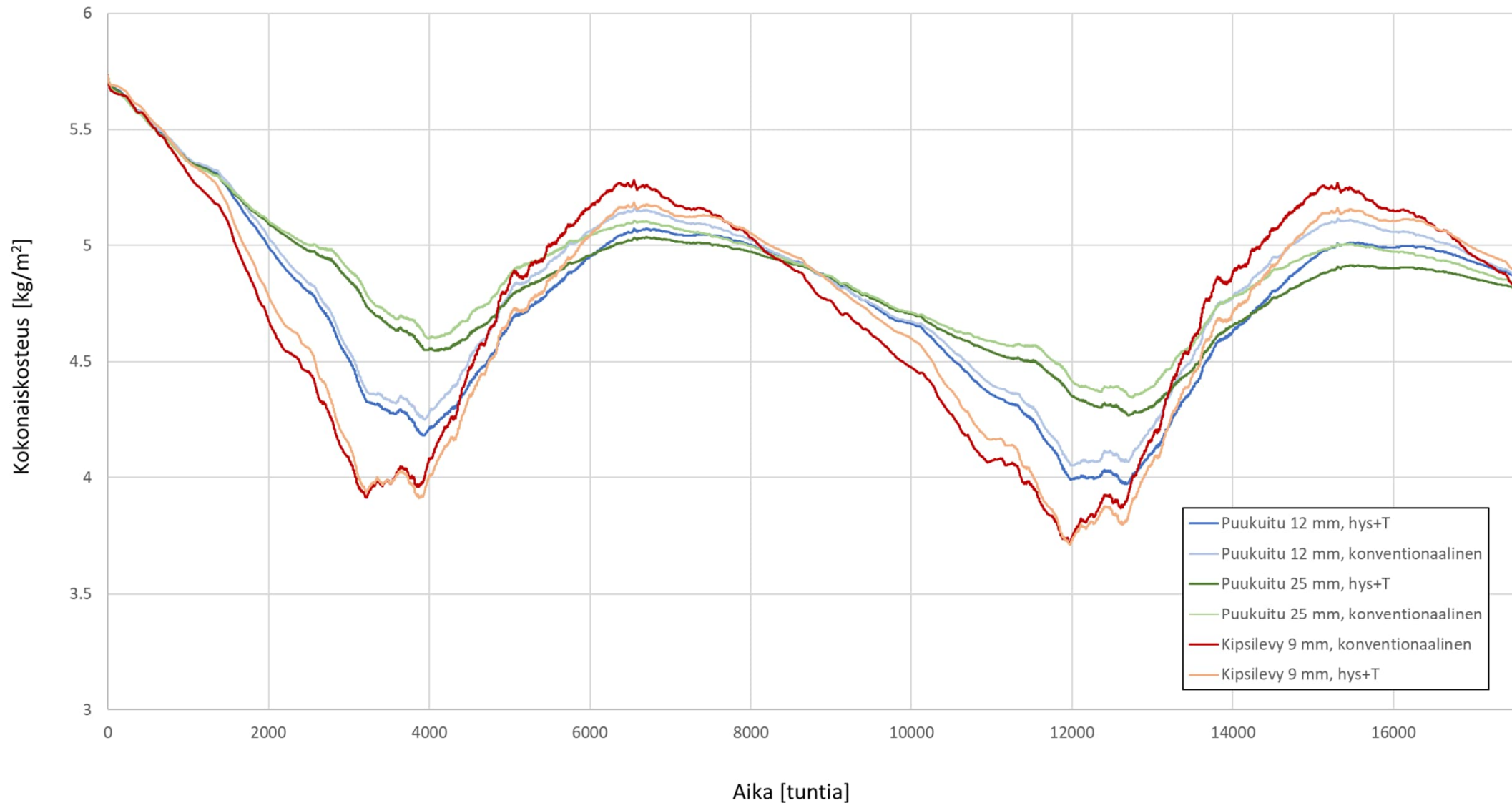
Vertaillaan:

- Tuulensuojalevy: Hunton puukuitulevy 12 mm/25 mm ja tuulensuojakipsilevy 9 mm
- Konventionaalinen (adsorption ja desorption keskiarvo, 20 °C) vs. lämpötilariippuva + hystereettinen laskentamalli puukuitulevylle ja kutterikerrokselle

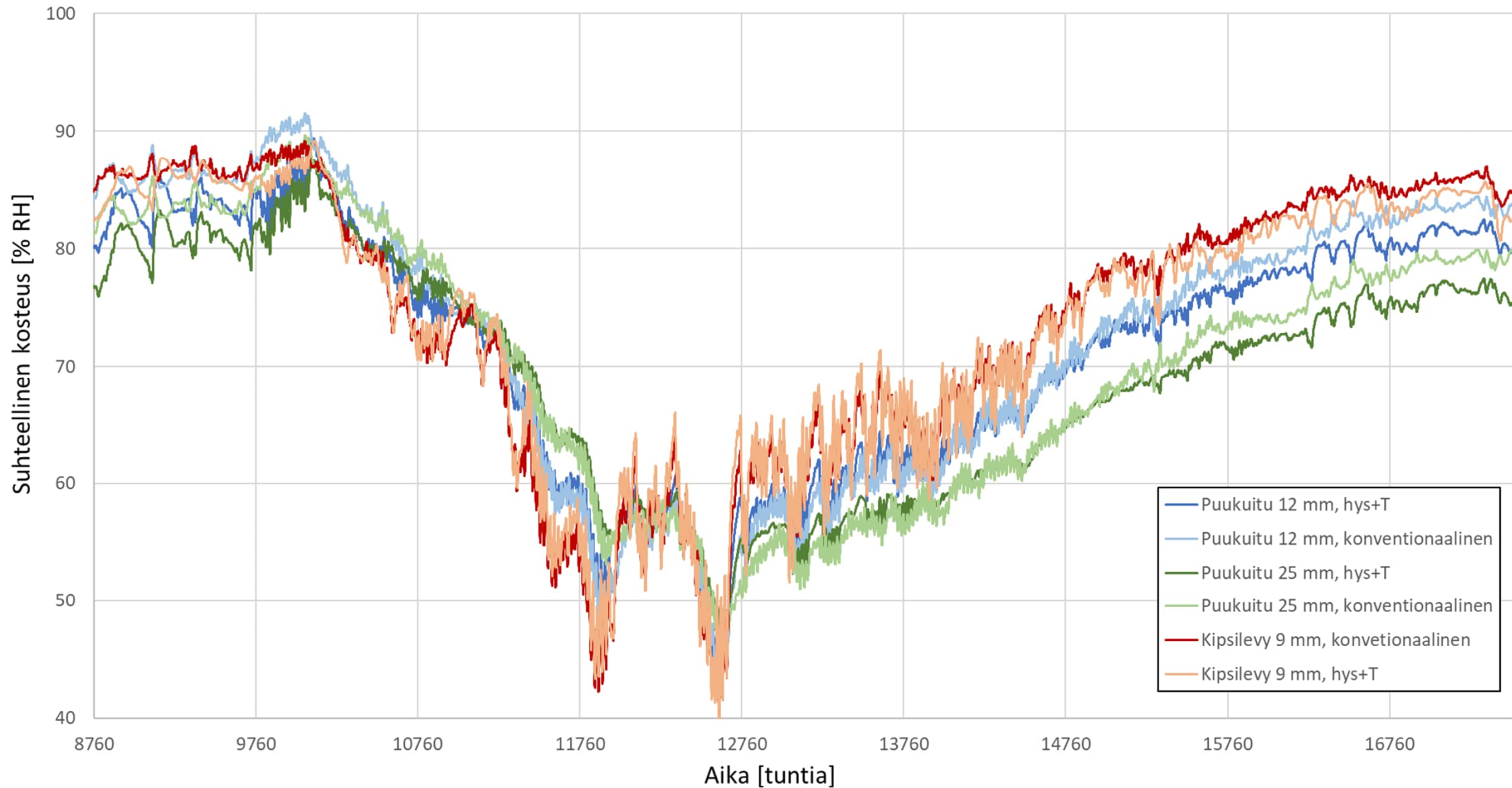
Suhteellinen kosteus tuulensuojalevyn takana, Jokioinen 2011



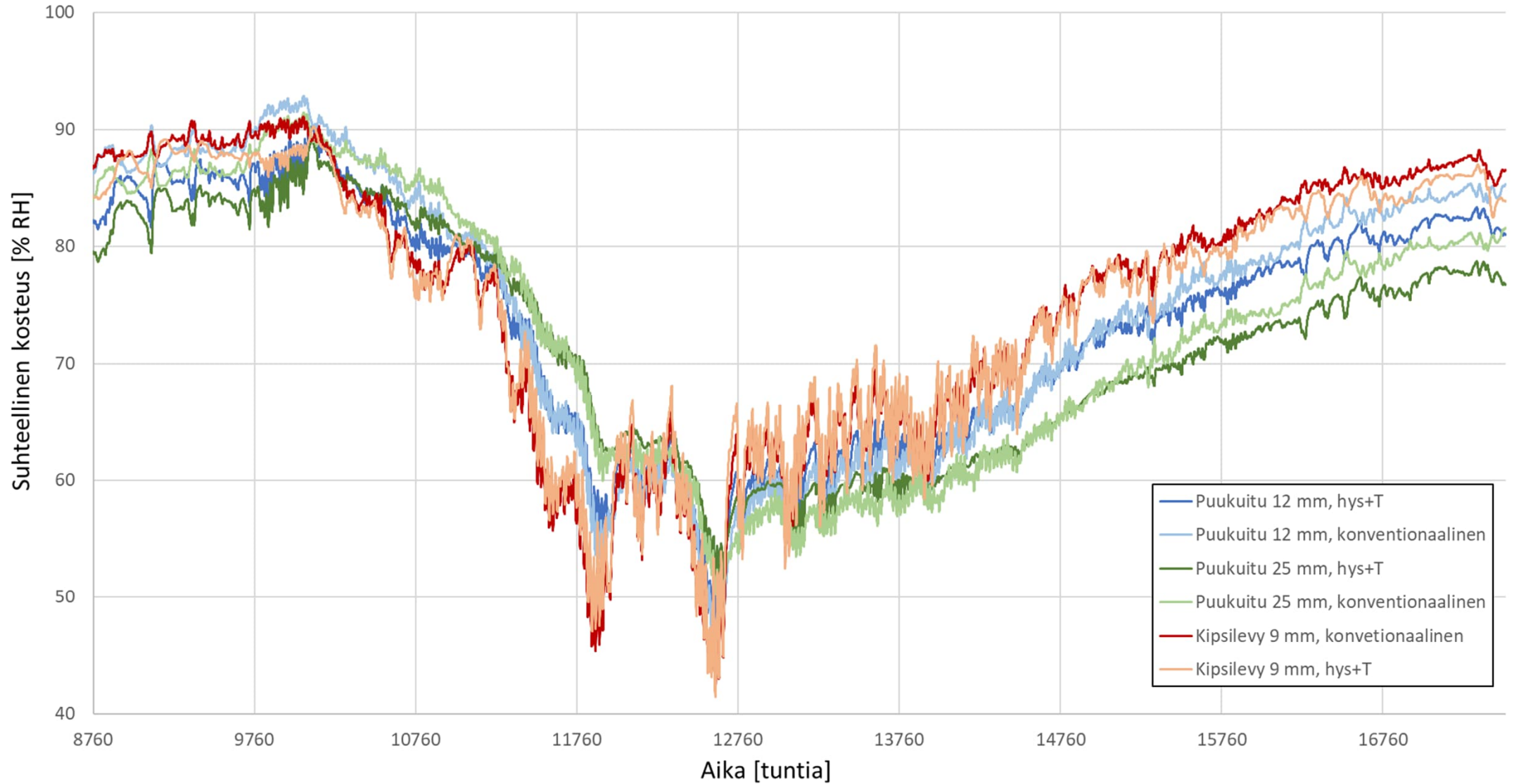
Kosteuden määrä kutterikerroksessa (300 mm), [kg/m²] (Jokioinen 2011)

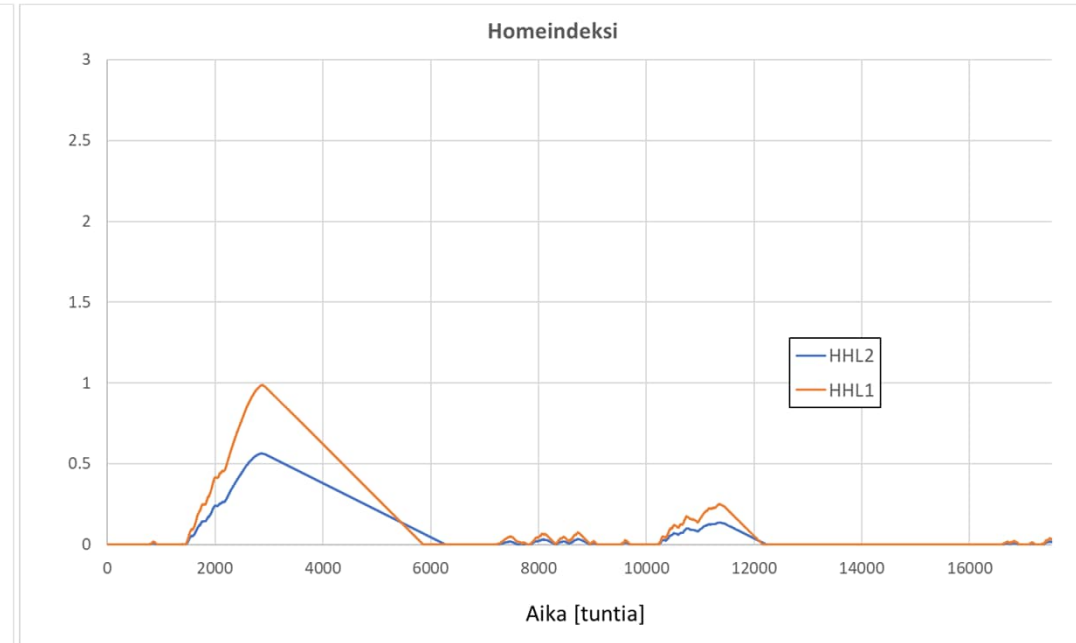
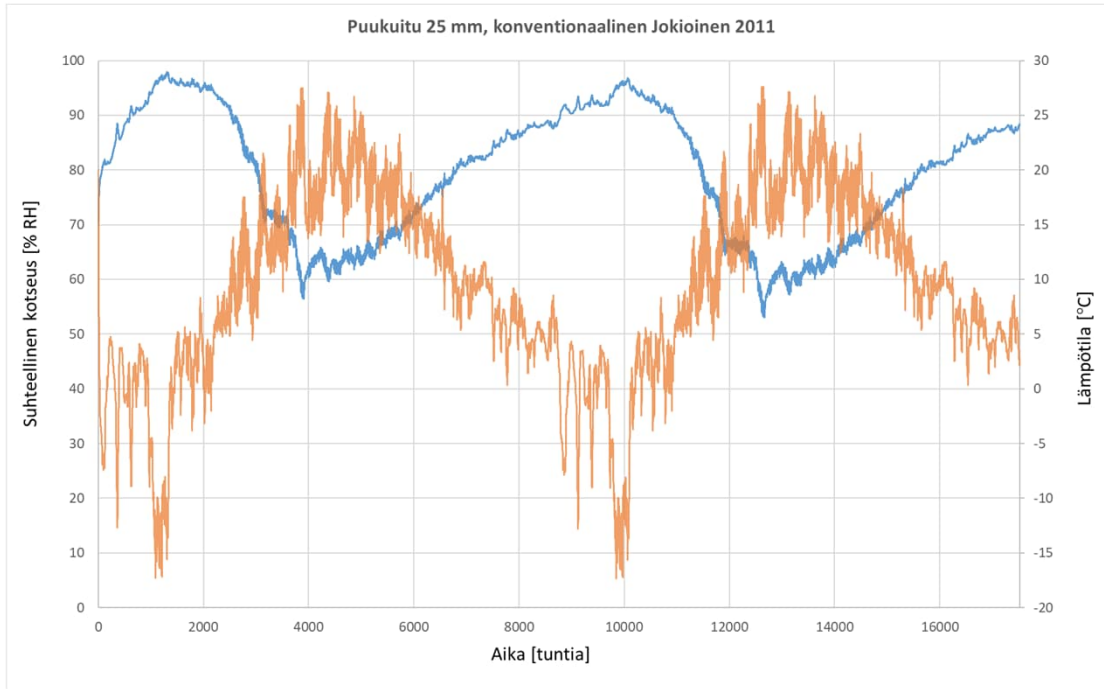


Suhteellinen kosteus tuulensuojalevyn takana, 2050



Suhteellinen kosteus tuulensuojalevyn takana, 2050, 400 mm kutteri





Johtopäätökset

- Mikäli rakenteeseen ei tunkeudu julkisivuverhouksen läpi viistosadetta, kaikki tarkastellut rakenteet vaikuttivat suhteellisen toimivilta kosteusteknisesti nykyilmastossa. Jokioinen 2050 tilanteessa suhteelliset kosteudet tuulensuojalevyn takana ovat matalammalla kuin nykyilmastossa (Jokioinen 2011). Tuloksia täytyy vielä tarkastella, mm. ilmansuunnan osalta.
- Kutterikerroksen paksuus 300 mm vs. 400 mm ei merkittävää eroa toiminnassa (tulevaisuuden ilmasto). Paksummalla kerroksella suhteelliset kosteudet hieman korkeammalla, mutta vain vähän.
- Huntonin puukuitutuulensuojalevyille ilmoitetaan S_d -arvoksi 0,2 metriä (12 mm levy). Tämä tarkoittaa, että materiaalin μ -arvo on 16,7. Tämä on yli kaksinkertainen arvo tuulensuojakipsilevyyn verrattuna ($\mu = 7,9$) joka on myös ohuempi (9 mm).
- Kasvattamalla kyseisen puukuitulevyn paksuutta kasvaa lämmönvastus, mutta myös vesihöyrynvastus, joka hidastaa kosteuden poistumista kutterikerroksesta keväällä ja kesällä. Toisaalta ohuemalla levyllä kosteuden määrä kutterissa talvella korkeimmillaan on hiukan korkeampi ohuella levyllä, ei kuitenkaan merkittävästi.
- Laskentamallilla (konventionaalinen vs. lämpötilariippuva + hystereesi) oli jonkin verran vaikutusta tuloksiin, mutta ei johtopäätösten kannalta kriittistä.

Johtopäätöksiä

- Tarkka simulointitulos vaatii molemmat, hystereesimallin ja tasap.kosteuden lämpötilariippuvuuden. Ehkä myös ei-Fickiaanisen mallin.
- Alkuarvoilla eli kosteuspitoisuudella (tai sen jakaumalla) ajan hetkellä $t = 0$ on simuloinnin kannalta myös merkitystä. (laskennoissa oli alkukosteus tuulensuojalevyssä ja kutterinlastussa 0,7 % RH)
- Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuus edelleen hiukan epäselvää... laskennoissa käytettiin vakioarvoa 50 1/h