FRAME: Ulkoseinien sisäinen konvektio

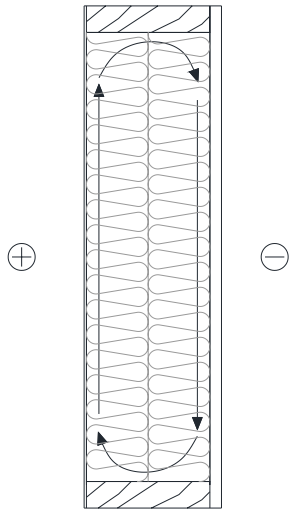
Sisäisen konvektion vaikutus lämmönläpäisykertoimeen huokoisella lämmöneristeellä eristetyissä ulkoseinissä

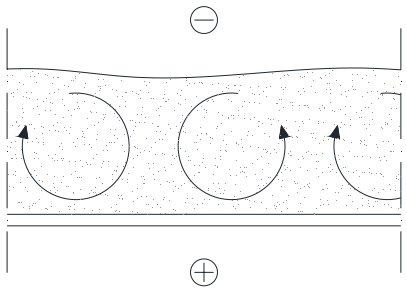
Petteri Huttunen
TTY/RTEK

Luonnollisen konvektion muodostuminen

Lämpötilaero rakenteen lämpimän ja kylmän puolen välillä aiheuttaa myös tiheyseroja huokosilmassa eri puolilla rakennetta (kaasujen yleinen tilanyhtälö).

Painovoima ja huokosilman eri tiheydet synnyttävät yhdessä kuvien mukaisia ilmavirtauksia ilmaa läpäisevässä rakennekerroksessa.





Painovoiman ja lämpötilaerojen aiheuttamaa lämmön kuljettumista kutsutaan luonnolliseksi konvektioksi. Sisäisellä konvektiolla tarkoitetaan luonnollista konvektiota huokoisen materiaalin sisällä.

Sisäiseen konvektioon vaikuttavat tekijät

Sisäisen konvektion suuruuteen vaikuttavat tekijät toiselta sivulta lämmitetyssä pystysuorassa eristekerroksessa:

- -Lämpötilaeron suuruus kerroksen yli
- -Eristemateriaalin ilmanläpäisevyys
- -Eristekerroksen paksuus
- -Eristemateriaalin lämmönjohtavuus
- -**Rakenteen korkeus! (h/d)**

Modifioitu Rayleigh'n luku

Modifioitu Rayleigh'n luku [-] kuvaa sekä pysty- että vaakarakenteen tapauksessa potentiaalia sisäisen konvektion muodostumiselle.

$$Ra_m = 3 \cdot 10^6 \frac{dk\Delta T}{\lambda}$$

d = eristekerroksen paksuus [m]
k = eristemateriaalin permeabiliteetti ilmalle [m^2]

$k = \kappa \cdot \eta$

κ = ilmanläpäisevyys [$m^3/(m \cdot s \cdot Pa)$]

η = ilman dynaaminen viskositeetti ≈ $1{,}8 \cdot 10^{-5}$ Pa·s

ΔT = lämpötilaero **eristekerroksen** yli [K]
λ = eristeen lämmönjohtavuus [W/(m·K)]

RakMk C4 mukainen kriittinen raja pystyrakenteelle kun lämpötilaero koko rakenteen yli on 50 K:

$Ra_m = 2{,}5$

Nusseltin luku

Nusseltin luku [-] on kerroin, joka kuvaa sekä pysty- että vaakarakenteen tapauksessa sisäisen konvektion aiheuttamaa lämpövirran lisäystä rakenteen läpi.

$$Nu = \frac{\phi_{\text{cond}} + \phi_{\text{conv}}}{\phi_{\text{cond}}} \geq 1$$

ϕ_{cond} = johtumalla siirtyvän lämmön osuus koko lämpövirrasta rakenteen läpi [W]

ϕ_{conv} = konvektiolla siirtyvän lämmön osuus koko lämpövirrasta rakenteen läpi [W]

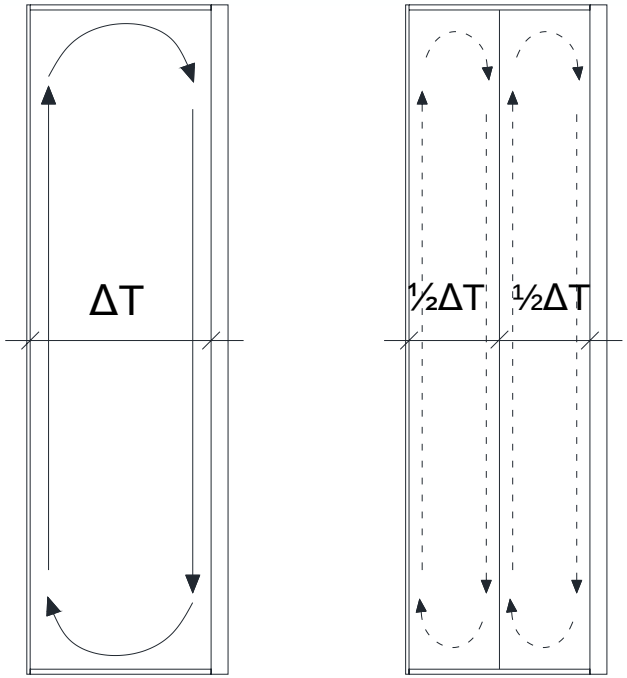
Teorian mukaan Ra_m ja Nu ovat keskenään verrannollisia mutta hyvin epälineaarisesti. Verrannollisuutta ei tunneta.
Ra_m:in suuruuden lisäksi pystyrakenteella vaikuttaa oleellisesti rakenteen korkeus (h/d).

Konvektiokatko

Yksi rakenteellinen tapa vähentää torjua sisäisen konvektion vaikutuksia on jakaa eristekerros kahteen lohkoon pystysuuntaisella ilmansulkukalvolla (konvektiokatko).

Eristekerrokseen muodostuu nyt kaksi erillisistä konvektiokenttää, joiden lämmöneristävyyttä heikentävä vaikutus on hyvin pieni.

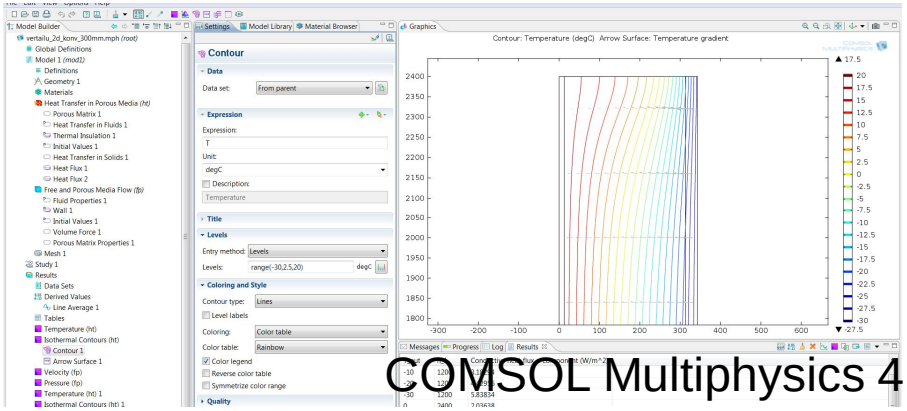
Vaakasuora kalvo rakenteen keskellä pahentaa tilannetta!



Tutkimustoimenpiteet

Tehtiin sarja laboratoriokokeita, joissa määritettiin erilaisille huokoisella materiaalilla lämmöneristetyille ulkoseinärakenteille kokeellisesti U-arvo. Tuloksia vertaamalla toisiinsa sekä laskennallisesti määritettyihin vastaaviin arvoihin saatiin tietoa kuinka sisäinen konvektio vaikuttaa lämmönläpäisykertoimiin.

Rakennusfysikaalinen tutkimuslaitteisto, TTY



COMSOL Multiphysics 4.2a

Koerakenteet

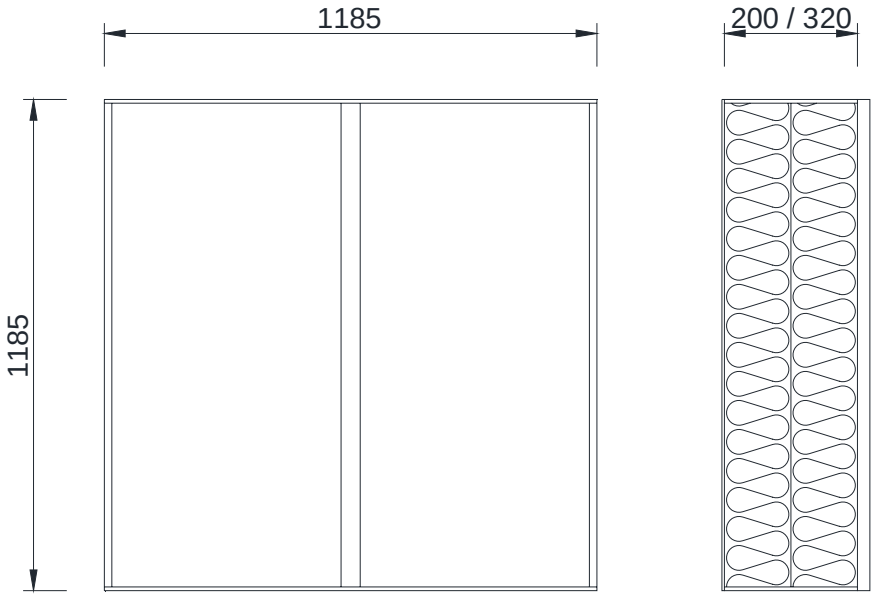
Koerakenteissa tutkitut lämmöneristävyyteen ja sisäiseen konvektioon vaikuttavat tekijät:

Eristemateriaali:
- levymäinen mineraalivilla
- puhallettu puukuitueriste

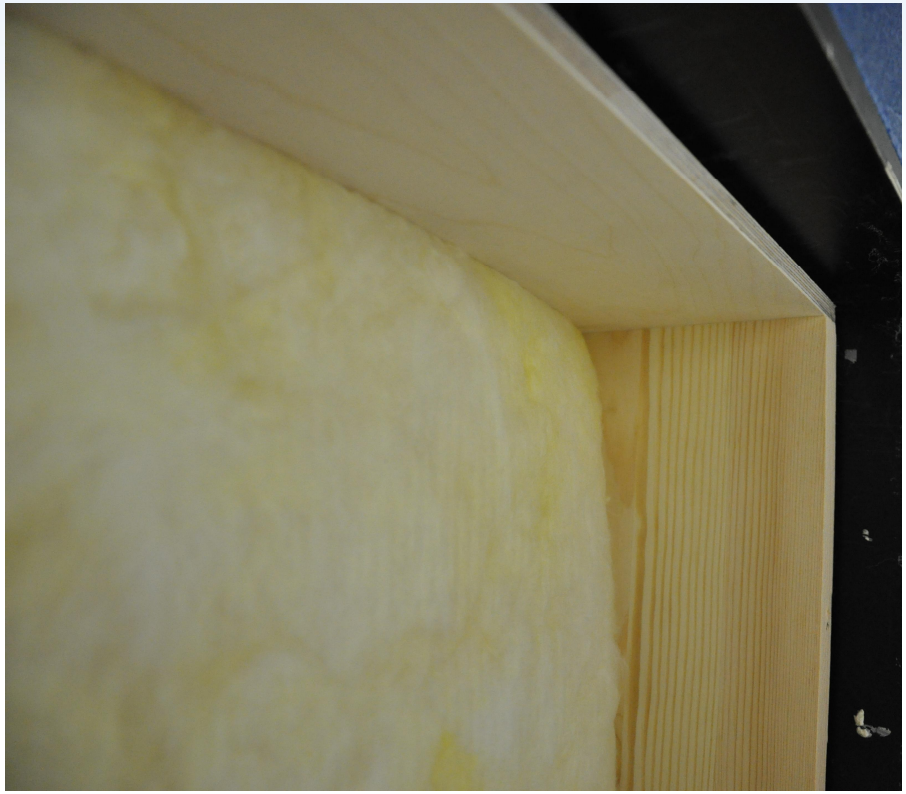
Eristepaksuudet:
- 200 mm
- 320 mm

Asennustapa:
- ideaali
- normaali

Lisäksi tutkittuja tekijöitä:
- konvektiokatko
- eristekerroksen läpäisevä vaakasuuntainen ilmarako



Tyypillisiä ilmarakoja (normaali asennus)

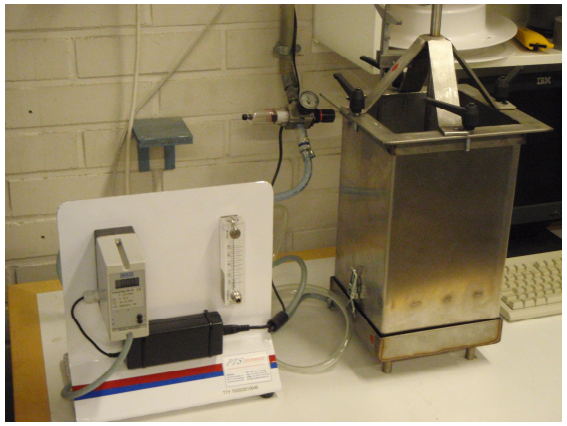


Konvektiokatko ja ilmarako

Mitatut materiaaliominaisuudet

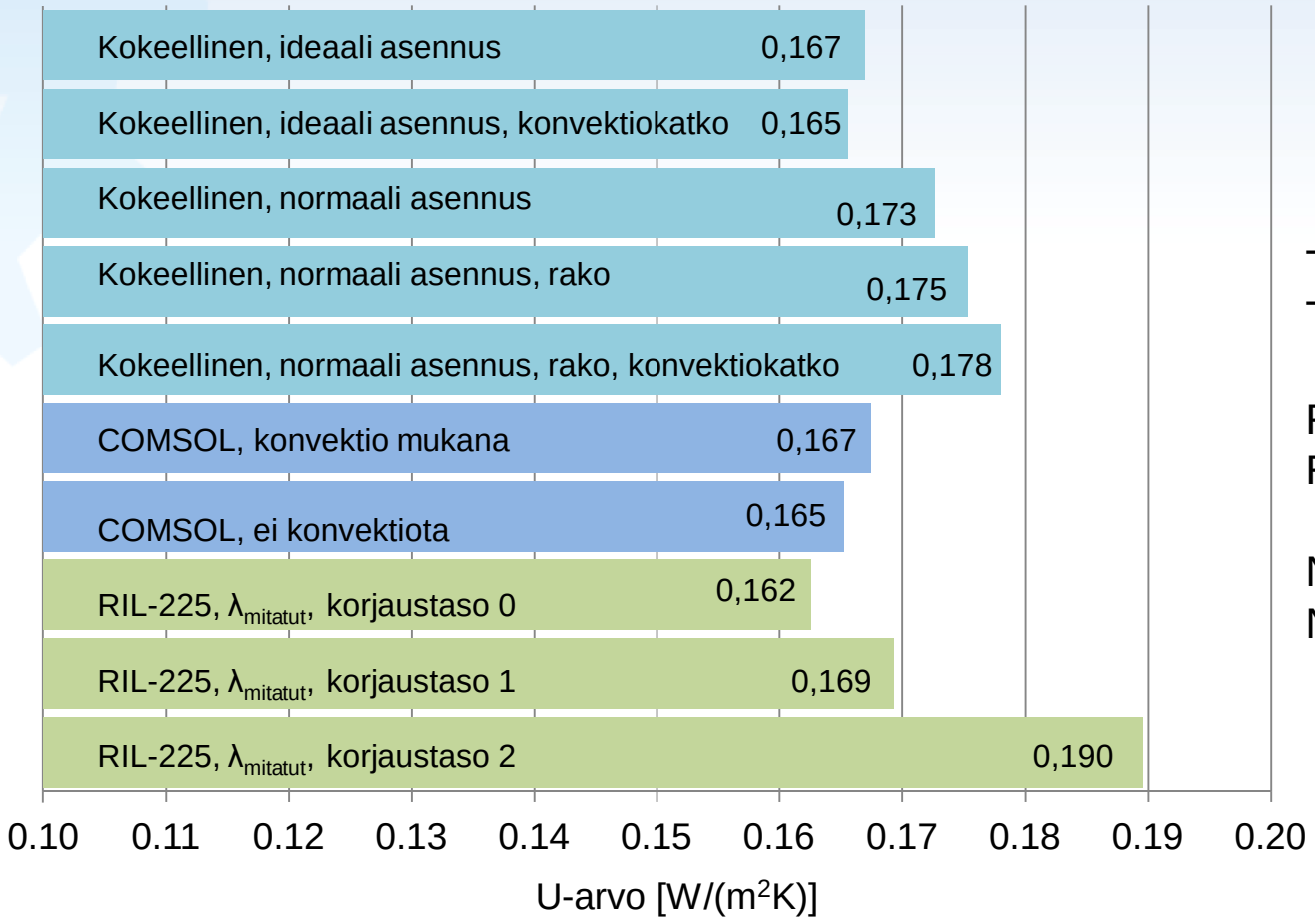
Laskennallisia tarkasteluja varten mitatut materiaaliominaisuudet:

Materiaali	λ [W/(m·K)]	κ [m³/m·s·Pa]
Mineraalivilla	0,035	202×10^{-6}
Puukuitueriste	0,042	236×10^{-6}
Tuulensuojalevy:		
- Mineraalikuitu	0,029	-
- Puukuitu	0,050	-
Liimapuu	0,10	-
Vaneri	0,25	-



Lämpövirtalevylaite: SFS-EN 12667, ISO 8301
Ilmanläpäisylaite: SFS-EN 29053, ISO 9053

Kokeellisesti ja laskennallisesti määritetyt U-arvot: Levymäinen mineraalivilla, 200 mm

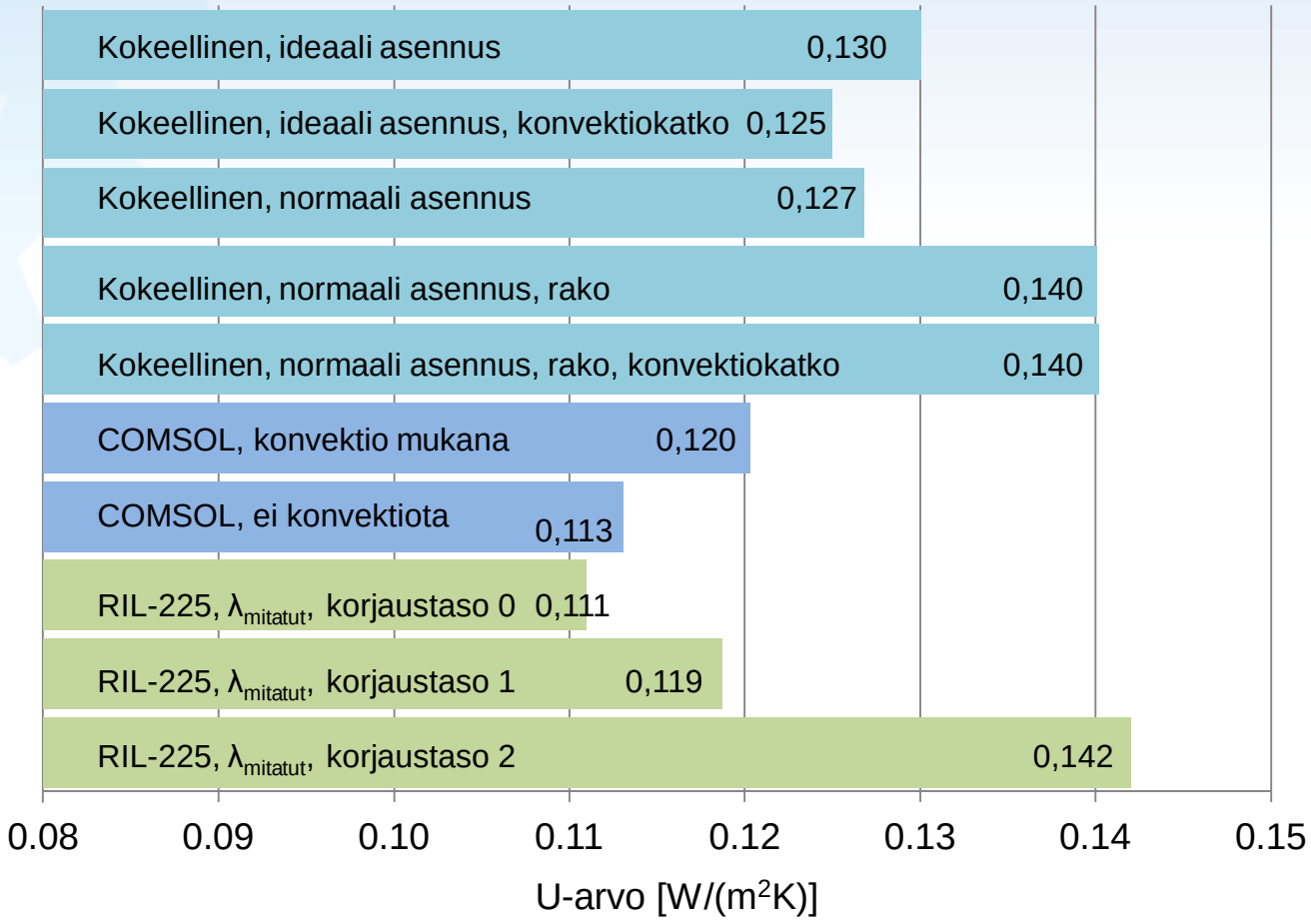


$T_{sisä}$ = 20 °C
T_{ulko} = -15 °C

Ra_m(x-suunt) = 1,2
Ra_m(y-suunt) = 2,4

Nu_{koe} = 1,01
Nu_{COMSOL} = 1,01

Eri tavoilla määritetyt U-arvot: Levymäinen mineraalivilla, 320 mm

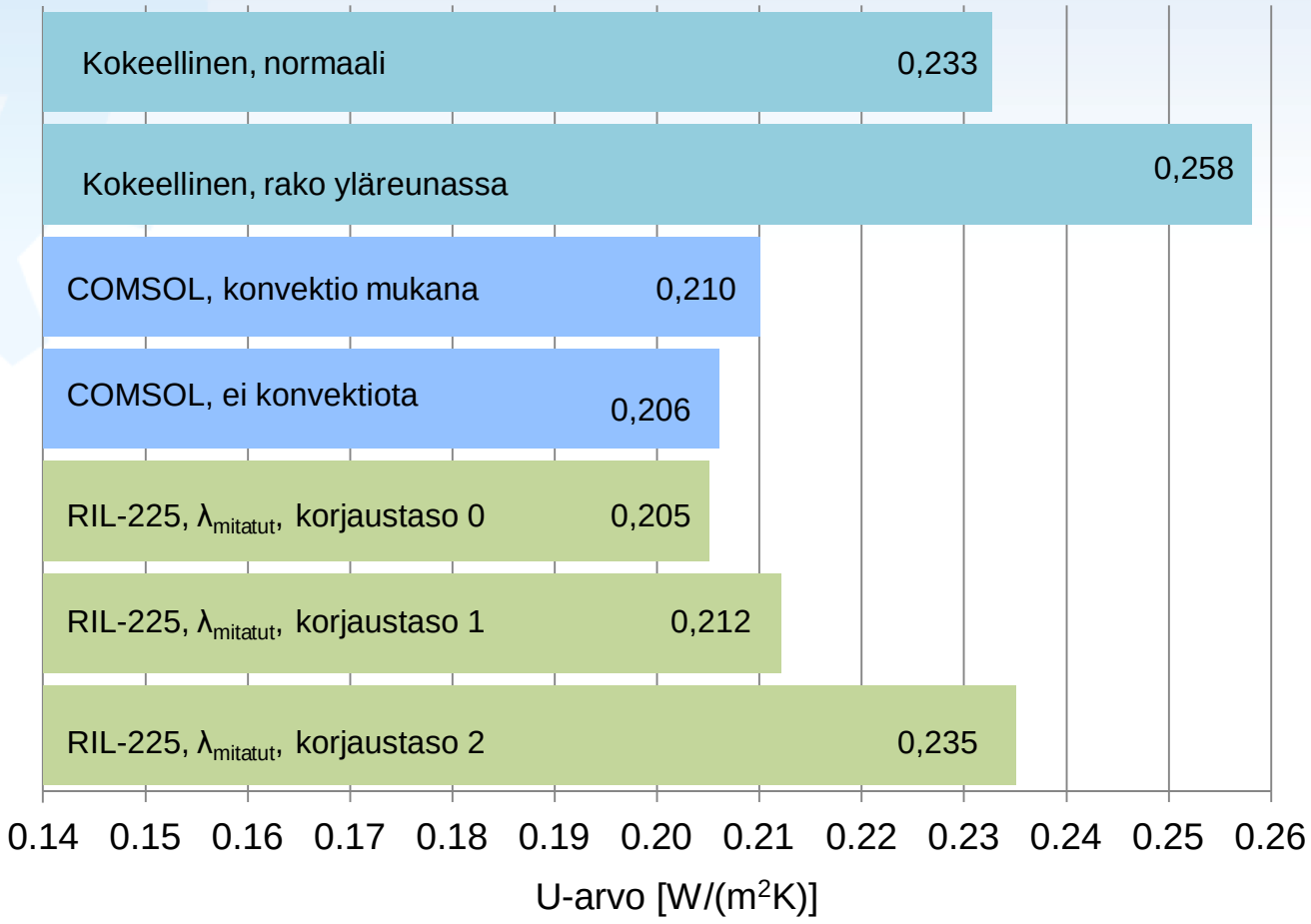


$T_{sisä}$ = 20 °C
T_{ulko} = -15 °C

Ra_m(x-suunt) = 2,1
Ra_m(y-suunt) = 4,2

Nu_{koe} = 1,04
Nu_{COMSOL} = 1,06

Eri tavoilla määritetyt U-arvot: Puhallettu puukuitueriste, 200 mm

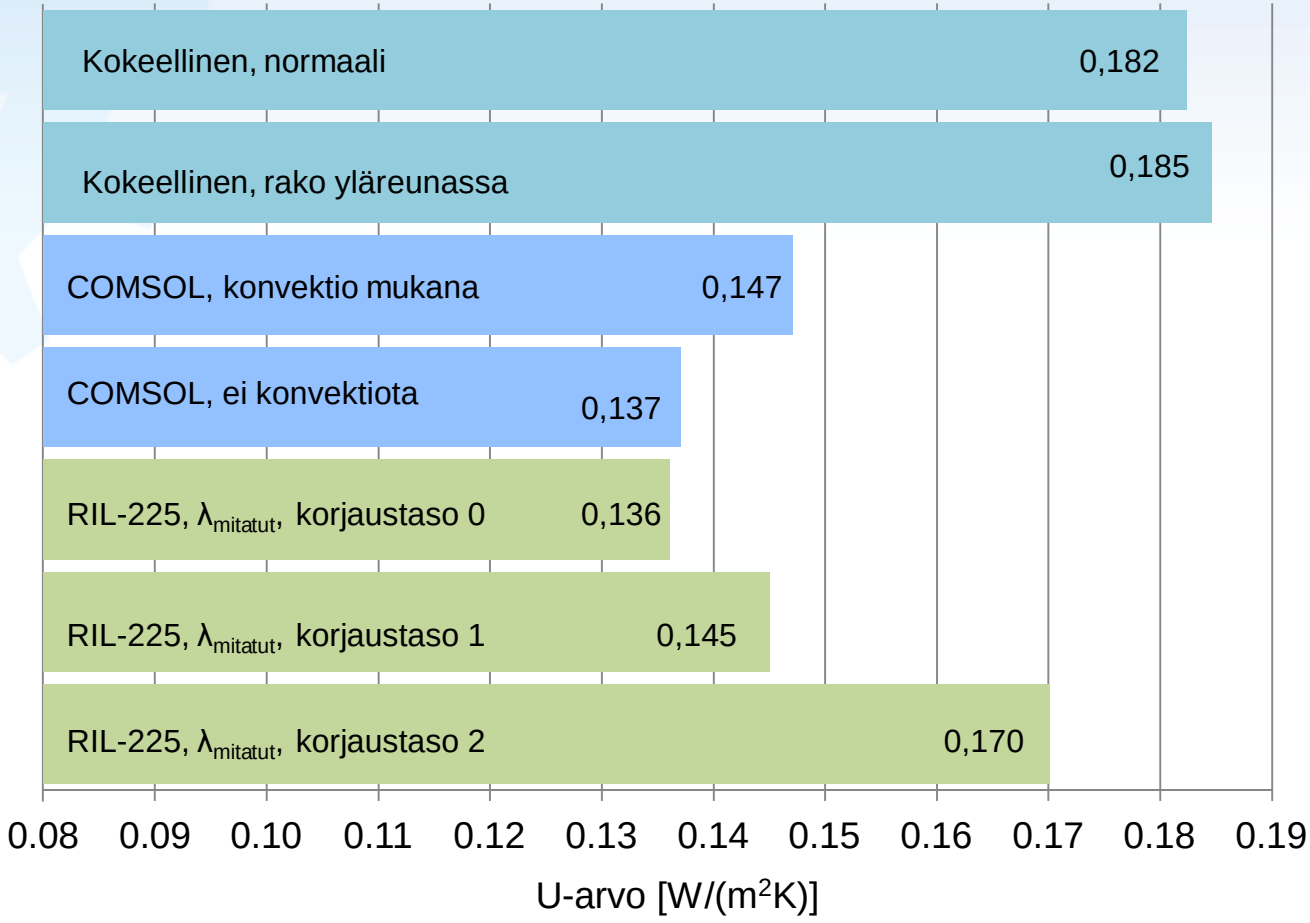


$T_{sisä}$ = 20 °C
T_{ulko} = -15 °C

Ra_m = 2,7

Nu_{COMSOL} = 1,02

Eri tavoilla määritetyt U-arvot: Puhallettu puukuitueriste, 320 mm



$T_{sisä}$ = 20 °C
T_{ulko} = -15 °C

Ra_m = 4,6

Nu_{COMSOL} = 1,07

Koetuloksiin vaikuttaneita tekijöitä

- Puukuitueristeellä eristetyissä koerakenteissa kolhuja kuljetuksesta.
- Puukuitueristeellä painuma oli voimakasta etenkin 320 mm koerakenteilla säilytyksen aikana. Vaikutti myös raottomiin kokeeseen.
- Sekä mineraalivillalla että puukuitueristeellä tutkimuslaitteiston tuloksia vääristävä ns. reunahäiriö alkaa kasvaa paksuilla koerakenteilla.
- Puhalletun puukuitueristeen tasoitetun pinnan ja sisäpinnan levyn väliin jäi rako. Voimisti oletettavasti konvektiota. (200 mm)

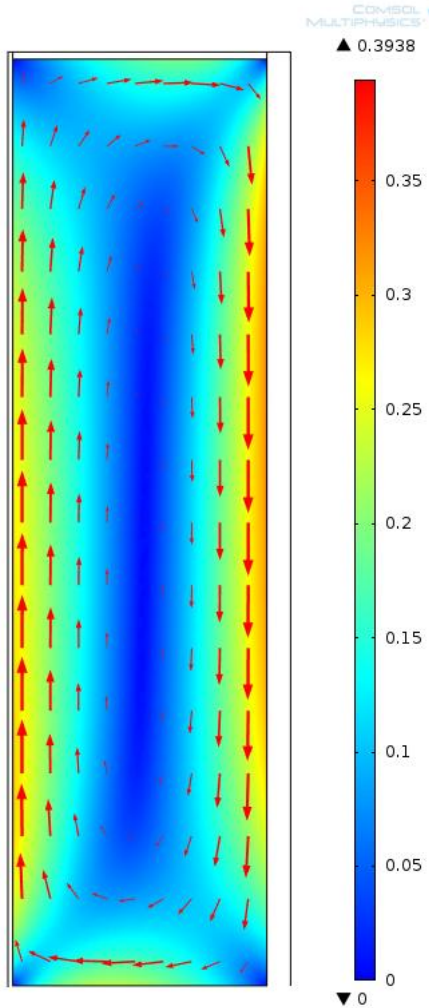
Puhalletun puukuitueristeen tasoitus

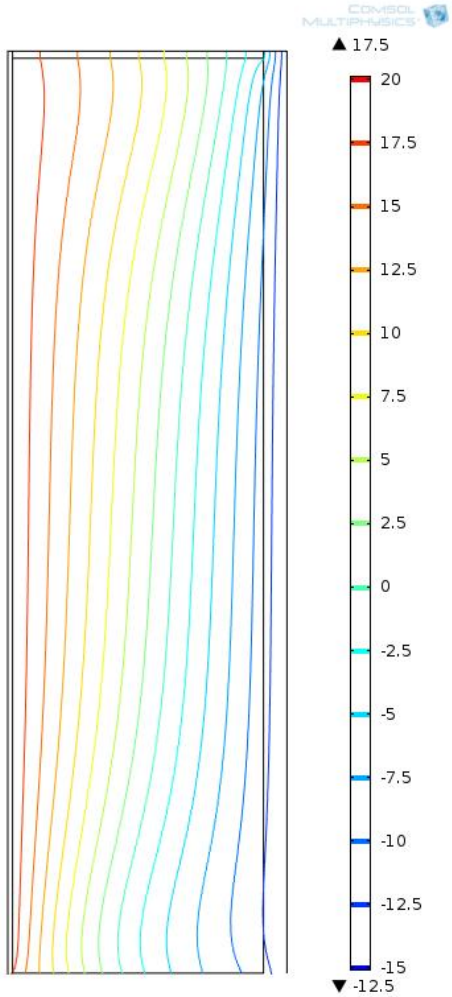
Puukuitueristeen painuma

Laskentaohjelman tulosteita 1

Rakenne:
Mineraalivilla 320 mm
Ideaali, ei konvektiokatkoa

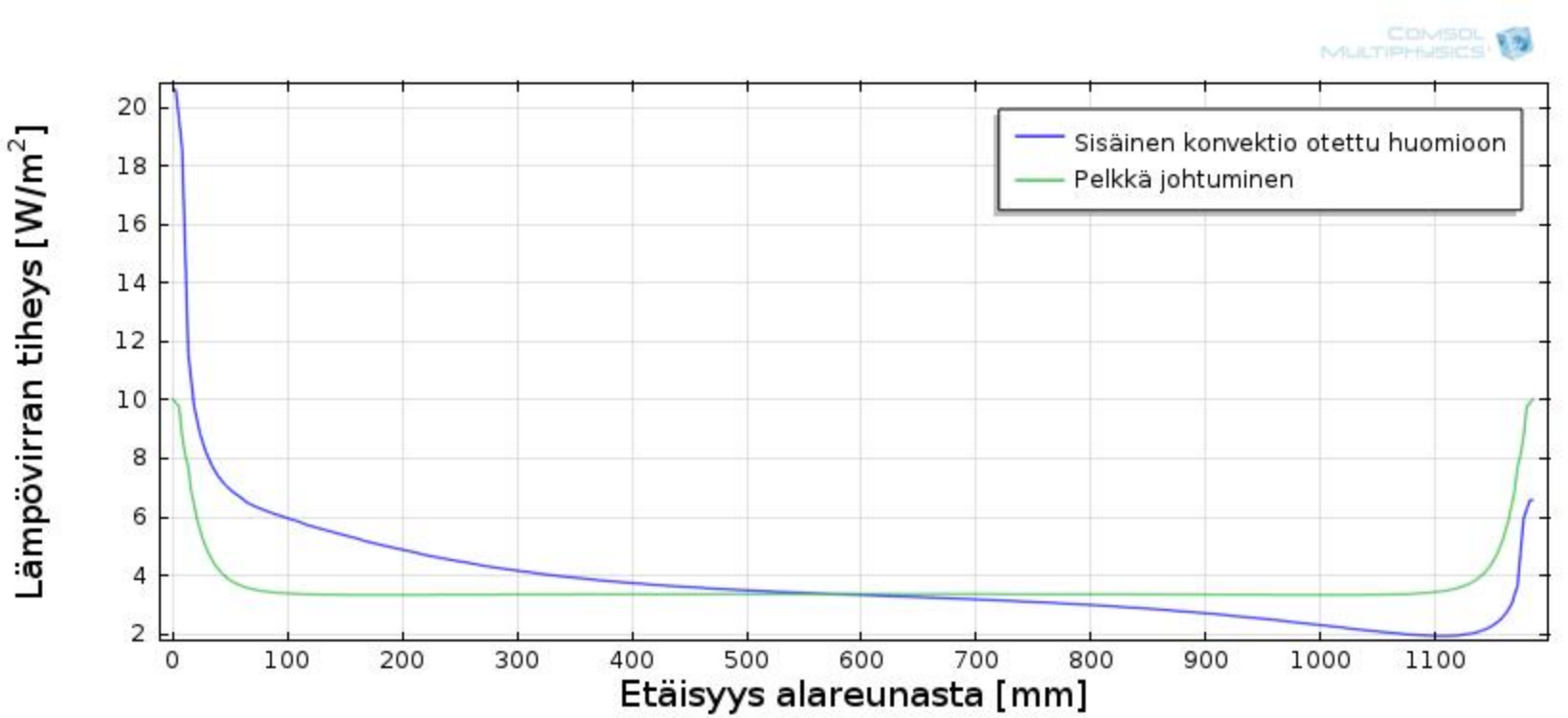
Ilmavirta [mm/s]





Lämpötila [°C]

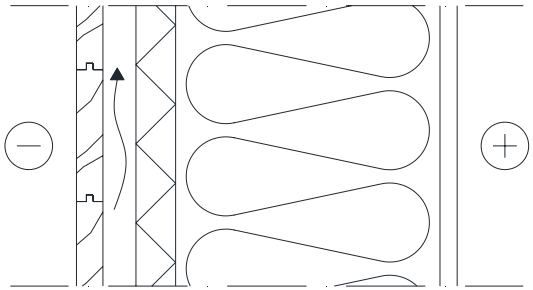
Laskentaohjelman tulosteita 2



Rakenne:
Mineraalivilla 320 mm
Ideaali, ei konvektiokatkoa

Laskennallinen tarkastelu vertailurakenteelle

Tehtiin tyypilliselle puurankaiselle ulkoseinälle laskennallisia U-arvojen määrityksiä eri ulkoilman lämpötiloilla ottaen sisäinen konvektio huomioon.



Rakenne sisältä ulospäin:

Kipsilevy 13 mm

Höyrynsulku

Runko/lämmöneriste 200/300/400 mm

Tuulensuojalevy 30 mm

Tuuletusrako

Julkisivulaudotus

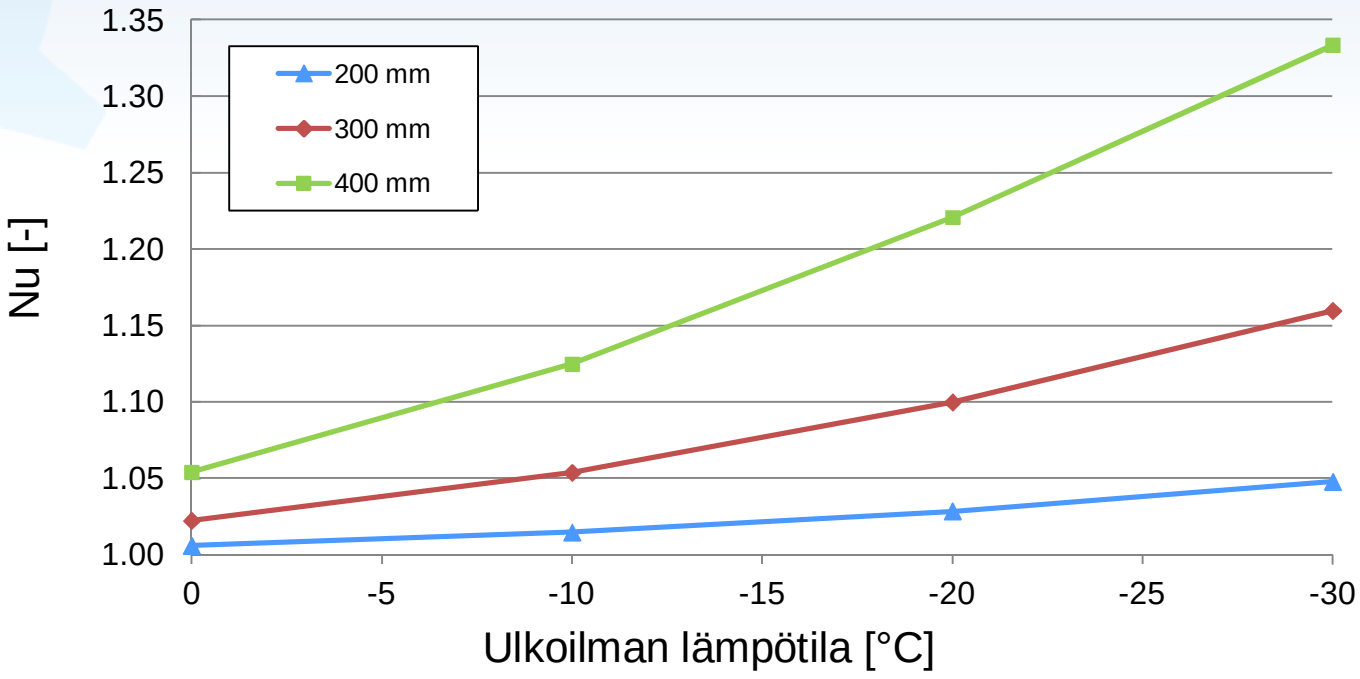
Laskennalliset tarkastelut tehtiin 1,2 ja 2,4 m korkeille vertailurakenteille ulkoilman lämpötiloilla 0, -10, -20 ja -30 °C

Vertailurakenteen materiaaliominaisuudet

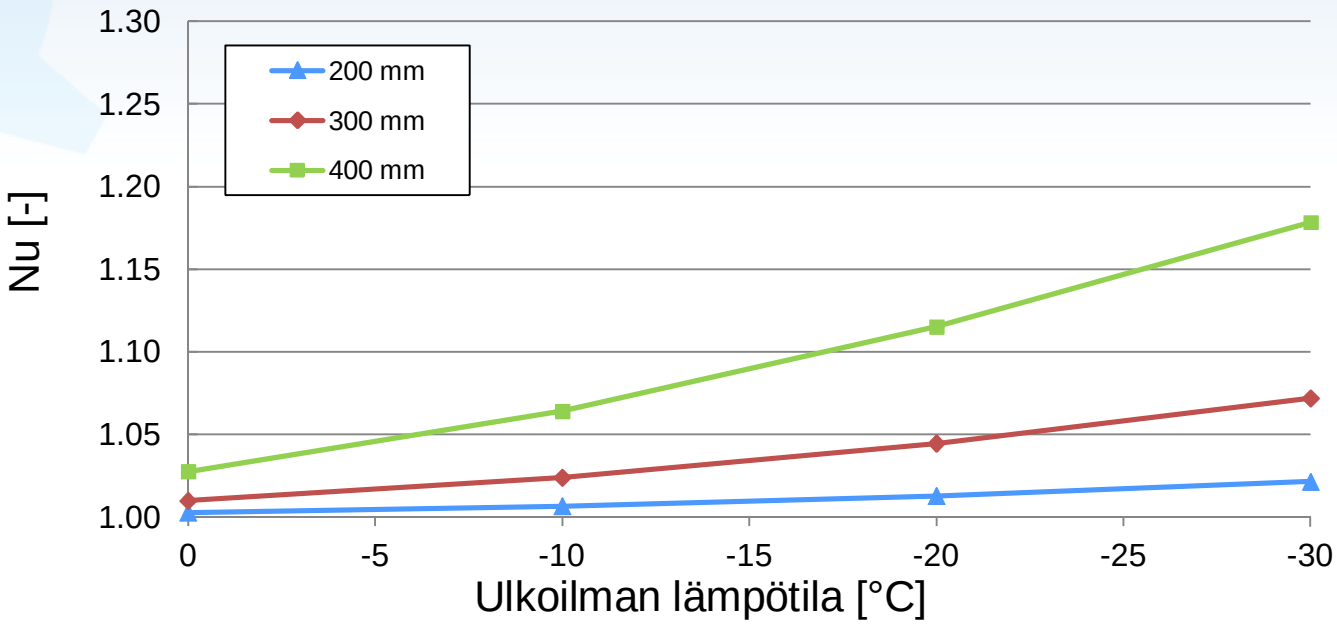
Materiaali	λ [W/(m·K)]	κ [m³/(m·s·Pa)]
Lämmöneriste	0,035	200×10^{-6}
Kipsilevy	0,20	-
Tuulensuojalevy	0,029	-
Puu	0,10	-

Eristepaksuus	U-arvo [W/m²K]
200 mm	0,14
300 mm	0,10
400 mm	0,078

Sisäisen konvektion vaikutus vertailurakenteessa (h = 1,2 m)



Sisäisen konvektion vaikutus vertailurakenteessa (h = 2,4 m)



Johtopäätökset 1

- Sisäistä konvektiota tapahtuu ulkoseinissä mutta merkittävästi vasta hyvin paksuissa eristekerroksissa ja kovalla pakkasella.
- Konvektiokatko on toimiva rakenteellinen tapa estää sisäinen konvektio.
- Rakenteen korkeus vaikuttaa oleellisesti sisäiseen konvektioon.
- RakMk C4:n vaatimus ($Ra_m \leq 2,5$) on riittävän tiukka rajoitus eikä sen takia sisäistä konvektiota ole tarpeellista ottaa huomioon rakennuksen vuosittaista energiankulutusta laskettaessa.

Johtopäätökset 2

- Ra_m:ia laskettaessa tulisi periaatteessa käyttää levymäisillä lämmöneristeillä pystysuuntaista ilmanläpäisevyyttä, sillä se kuvaa todellisuutta.
- Ilmaraoilla ei ole suurta merkitystä jos ne eivät läpäise eristekerrosta siten, että ilmaa pääsee kuljettumaan lämpimältä puolelta kylmälle puolelle.
- Konvektiokatko ei auta eristekerroksen läpäisevissä ilmaraoissa.
- RIL-225:n mukainen laskenta (korjaustaso 2) ottaa riittävän hyvin huomioon eristekerroksen läpäisevän ilmaraon.
- Puhallettavien eristeiden painuminen tarvitsee lisätutkimusta.
- Tutkimustulokset varsin yhdenmukaisia mm. Norjalaisen tutkimuksen kanssa (Uvsløkk et al. 2010): Sisäistä konvektiota tapahtuu ulkoseinissä kylmissä ilmastoissa mutta hyvällä työnjäljellä on suurempi merkitys.

Kysyttävää?

Kiitos mielenkiinnosta!

Kysymyksiä?

petteri.huttunen@tut.fi