

Rakennusalan täyden palvelun tietotalo

Rakennustieto Oy edistää hyvää rakennustapaa ja tuottaa rakentamisesta luotettavaa tietoa. Puolueettoman ja asiakaslähtöisen Rakennustieto Oy:n tuotteet kattavat rakentamisen koko elinkaaren suunnittelusta ylläpitoon. Yhtiön omistaa Rakennustietosäätiö RTS.

Tutustu palveluihimme

> rakennustieto.fi/rk/palvelut

Rakentajain kalenterin artikkelit

Tämä artikkeli on julkaistu alun perin Rakentajain kalenterissa, jota ovat julkaisseet Rakennustietosäätiö RTS sr ja Rakennusmestarit ja -insinöörit AMK RKL ry.

Julkaisu oli rakennusalan ammattilaisten ja opiskelijoiden käsikirja, joka yhdisteli teoriaa ja käytäntöä sekä kannusti hyvään rakentamiseen. Artikkelin vasemmassa reunassa olevasta vesileimasta näkee ko. Rakentajain kalenterin vuosikerran.

> [Artikkeliarkisto, kokoelma vuosien 1997–2018 Rakentajain kalenterissa julkaistuista artikkeleista](#)

Ulkoseinän lämpöhäviöiden määrittäminen

Minna Teikari, diplomi-insinööri
Tutkija, Tampereen teknillinen korkeakoulu
teikari@ce.tut.fi

Hannu Keränen, diplomi-insinööri
Tutkija, Tampereen teknillinen korkeakoulu
hannuk@ce.tut.fi

2

1 Johdanto

Rakennuksen lämpöhäviöt muodostuvat johtumishäviöistä vaipan läpi ja ilmanvaihdon lämpöhäviöistä. Lisäksi energiaa tarvitaan lämpimän käyttöveden lämmitykseen. Tässä artikkelissa tarkastellaan rakennuksen vaipan lämpöhäviöiden laskennassa käytettävän apusuureen, ns. lämmönläpäisykertoimen kokeellista ja (likimääräistä) laskennallista määrittäystä. Artikkelissa käsitellään myös (kaksiulotteista) lämmönjohtumista rakennuksen nurkassa ja sen huomioonottamista rakennusosien ”lämmönjohtumispinta-alojen” laskennassa. Lopuksi on arvioitu koerakennuksissa tehtyjen mittaustulosten perusteella johtumislämpöhäviöiden laskennassa esiintyviä virhelähteitä.

2 Lämmönläpäisykerroin (U-arvo)

Sisä- ja ulkoilman välinen lämpötilaero saa aikaan lämpövirran rakennuksen vaipan läpi. Lämpövirtojen laskennassa käytetään lämmönläpäisykerrointa, joka ilmoittaa jatkuvuustilassa lämpövirran rakenteen läpi pinta-alayksikköä kohti (= lämpövirran tiheys), kun lämpötilaero rakennusosan erottamien tilatilojen välillä on yksikön suuruinen. U-arvo (engl. overall heat transfer coefficient) on rakenteen kokonaislämmönvastuksen käänteisluku. Kokonaislämmönvastus saadaan laskemalla yhteen rakennekerrosten lämmönjohtumisvastukset ja ns. pinta-vastukset, jotka määritetään konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen ja pinnan säteilylämmönsiirtokertoimen avulla.

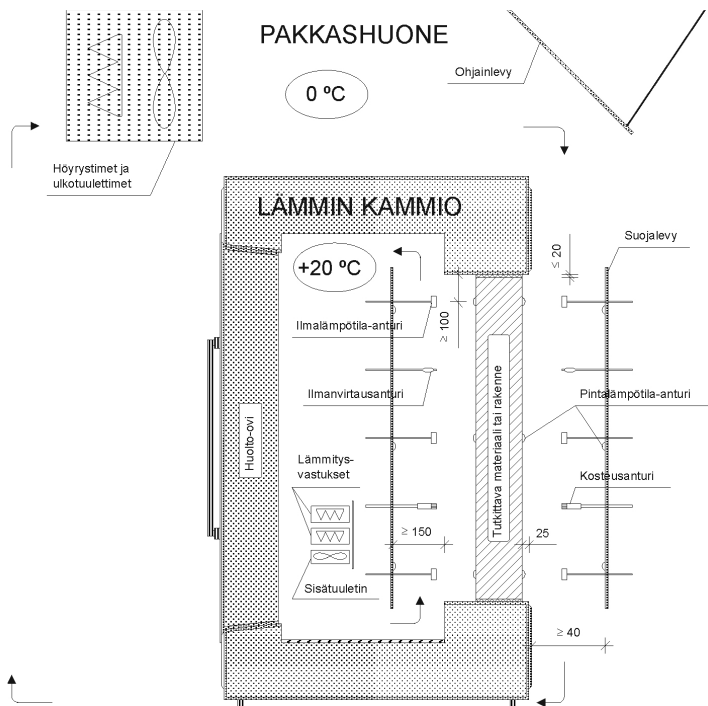
Konvektiolämmönsiirtoon pinnan ja ilman välillä vaikuttavat mm. lämpötilaero, ilman virtausnopeus pinnan läheisyydessä, virtauksen tyyppi (laminaarinen tai turbulентinen), ilman ominaisuudet sekä pinnan geometria. Tuulen aiheuttaman ns. pakotetun konvektion vuoksi ulkopinnan konvektiivinen lämmönsiirtokerroin on suurempi kuin sisäpinnan, jossa vaikuttaa ns. luonnollinen konvektio (hieman yksinkertaistena). Pintojen säteilylämmönsiirtokertoimet ovat

suurin piirtein samat. Ainekerrosten lämmönvastukset määräytyvät kerroksen paksuuden ja materiaalin lämmönjohtavuuden perusteella.

Todellisuudessa useimmat rakennusmateriaaleissa esiintyy kuitenkin myös muita lämmönsiirtymismuotoja. Esimerkiksi mineraalivillassa, jonka koostumus on noin 95 % ilmaa ja 5 % kuituja, tapahtuu lämmön siirtymistä johtamalla kuiduissa ja ilmassa sekä kuitujen välisenä säteilynä. Huokoisten materiaalien aineominaisuudet eivät näin ollen ole ”puhtaasti” fyysisiä ominaisuuksia. U-arvo ei todellisissa rakenteissa myöskään pysy vakiona, koska yleensä materiaalien kastuminen ja esimerkiksi lämmöneristeen kokoonpuristuminen alentavat rakenteen lämmöneristävyyttä.

2.1 U-arvon mittauslaboratoriossa^[4]

Rakenteen lämmönläpäisykerroin määritetään laboratoriossa yleensä ns. lämpökammion menetelmällä. Lämmönläpäisylaitteistossa on lämmin ja kylmä kammiot, joiden välissä on aukko mitattavaa rakennosaa varten. Lämmin kammiot voi sijaita myös kylmän kammion sisällä (kuva 2.1), jos laitteisto on kalibroitava (”calibrated hot box”). Lämmönläpäisykokeessa mitattavan rakenteen yli säädetään haluttu lämpötilaero lämmittämällä lämmintä kammiota ja jäähdyttämällä kylmää kammiota. Kokeessa mitataan lämmitysteho, joka tarvitaan pitämään lämpimän kammion sisäilman lämpötila ja lämpötilaero sen ja kylmän kammion välillä vakiona. Standardien (ISO/DIS 8990) mukaisessa U-arvokokeessa lämpimän kammion lämpötilaksi säädetään tavallisesti +20 °C ja kylmän kammion ±0 °C. Kun lämpötilojen ja lämpimän kammion lämmitystehon arvot eivät enää muutu, kammion seinämän ja mitattavan rakenteen lämpötilakentät ovat saavuttaneet jatkuvuustilan, ts. lämpövirran tiheys on vakio jokaisessa poikkileikkauksessa, ja lämpöä siirtyy vakiomäärä aikayksikössä lämpimän kammion sisältä ulos. Jatkuvuustilassa mitattujen lämpötilojen ja lämmitystehon avulla voidaan määrittää mitattavan rakenteen lämpötekniset arvot.



Kuva 2.1. Lämmönläpäisykertoimen mittauslaitteisto [4].

Lämpimän kammion sisälämpötilaa säädetään sisäilman lämpötila-antureilta mitattujen lämpötilojen perusteella muuttamalla kammioon syötettävää lämmitystehoa. Lämpötilan säätöanturit sijoitetaan tasaisesti eri puolille lämmintä kammiota. Lämpötiloja mitataan myös tutkittavan rakenteen molemmista pinnoista, ilmasta pintojen läheisyydestä ja ympäröivistä pinnoista. Mitattavan rakenteen molempien pintojen lähelle sijoitetuilla suojalevyillä tasataan lämpötilan vaihteluja rakenteen pinnalla ja samalla pinnan säteilylämmönsiirtoa sekä ohjataan ilmavirtauksia siten, että konvektiovirtaus rakenteen pinnalla on mahdollisimman laminaarista. Ilmavirtauksen nopeutta mitataan tutkittavan rakenteen ja suojalevyn välistä. Näitä mittauksia käytetään rakenteen pintojen lämmönsiirtokertoimien laskennassa. Muita mitattavia suureita, joita tapauskohtaisesti voidaan tarvita, ovat ilman suhteellinen kosteus, kammioiden välinen paine-ero ja rakenteen läpi siirtyvä lämpövirta (lämpövirtalevymittaus).

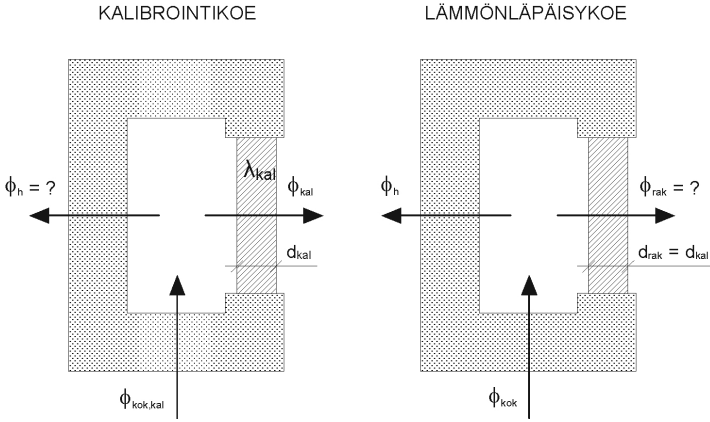
Tietokoneohjatulla mittaus- ja säätöprosessilla lämpötilaolosuhteita voidaan säätää nopeasti ja tarkasti, mikä osaltaan lyhentää jatku-

vuustilan saavuttamiseen kuluvaa aikaa. Muita jatkuvuustilan säätönopeuteen vaikuttavia tekijöitä ovat:

- lämpimän kammion seinämien ja mitattavan rakenteen materiaaliominaisuudet
- mitattavan rakenteen paksuus
- mitattavan rakenteen kosteuspitoisuus
- lämpimän kammion ja mitattavan rakenteen pinnoilla vallitsevat olosuhteet
- kokeen lähtötilanne.

Lämpöteknisten arvojen laskenta

Mitattavan rakenteen läpi menevä lämpövirta (Φ_{rak}) saadaan vähentämällä lämpimästä kammioista poistuvasta kokonaislämpövirrasta (Φ_{kok}) kammion vaipan läpi siirtyvä lämpövirta (Φ_{h}). Kokonaislämpövirta saadaan yksittäisten laitteiden lämmitystehojen summasta. Mittauskammion vaipan lämpöhäviö määritetään kalibroimalla laitteisto mittausaukkoon asennettavilla yhdestä materiaalista valmistetuilla, homogeenisilla kalibrointielementeillä, joiden lämmönjohtavuus (λ_{kal}) on tiedossa (kuva 2.2). Kalibrointi on suoritettava eri paksuisilla kalibrointielementeillä ($d_{\text{rak}} = d_{\text{kal}}$), koska mittausaukon



Kuva 2.2. Lämpövirtojen laskentaperiaatteet laitteiston kalibrointikokeessa ja varsinaisessa kohteessa [4].

ympäröivällä reuna-alueella mitattavan rakenteen paksuus vaikuttaa lämpimän kammion väliin läpi siirtyvään lämpövirtaan.

Mitattavan rakenteen lämmönläpäisykertoimet ja pintavastukset määritetään rakenteen läpi siirtyvän lämpövirran ja lämpötilaerojen avulla. Mitatuista lämpötiloista lasketaan ns. ympäristölämpötilat t_y ja t_{yu} seuraavasti:

Rakenteen pintojen lämpötaseelle voidaan kirjoittaa yhtälö

$$q_{rak} = \frac{\phi_{rak}}{A_{rak}} = h_r(t_{ka} - t_p) + h_c(t_i - t_p) \quad (2.1)$$

q_{rak} on lämpövirran tiheys rakenteen läpi, $[W/m^2]$

ϕ_{rak} on lämpövirta rakenteen läpi, $[W]$

A_{rak} on rakenteen pinta-ala, $[m^2]$

h_r on säteilyn lämmönsiirtokerroin, $[W/(m^2K)]$

h_c on konvektion lämmönsiirtokerroin, $[W/(m^2K)]$

t_{ka} on ympäröivien pintojen keskimääräinen lämpötila, $[^\circ C]$

t_p on rakenteen pintalämpötila, $[^\circ C]$

t_i on ilman lämpötila rakenteen pinnan lähellä, $[^\circ C]$

Rakenteen pinnan konvektion ja säteilyn lämmönsiirtokertoimet voidaan laskea yhteen ottamalla käyttöön yhteinen vertailulämpötila, ns. ympäristölämpötila t_y , jolloin yhtälö 2.1 voidaan kirjoittaa muodossa

$$q_{rak} = \frac{\phi_{rak}}{A_{rak}} = (h_r + h_c)(t_y - t_p) = h(t_y - t_p) \quad (2.2)$$

Kaavoista 2.1 ja 2.2 ratkaistaan ympäristölämpötila t_y

$$t_y = \frac{h_r}{h_r + h_c}(t_{ka} - t_p) + \frac{h_c}{h_r + h_c}(t_i - t_p) + t_p \quad (2.3)$$

Lämmönläpäisykokeessa rakenteen pintojen lähelle sijoitettavat suojalevyt ovat pinta-alaltaan suurempia kuin mittausaukko, joten niistä mitattuja lämpötiloja voidaan käyttää ympäröivien pintojen keskimääräisenä lämpötilana (t_{ka}).

Kahden toisiaan lähellä olevan tasolevyn (mitattavan rakenteen ja suojalevyn) välinen lämpösäteily saadaan kaavasta

$$q_r = \bar{\epsilon} \sigma (T_1^4 - T_p^4) \quad (2.4)$$

Tehollinen emissiviteetti lasketaan kaavalla

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{1/\epsilon_i + 1/\epsilon_p - 1} \quad (2.5)$$

ϵ_i on suojalevyn pinnan emissiviteetti

ϵ_p on mitattavan rakenteen pinnan emissiviteetti

σ on Stefan Boltzmannin säteilyvakio ($= 5,67 \cdot 10^{-8} W/(m^2K^4)$)

T_1 on suojalevyn pinnan lämpötila, $[K]$

T_p on mitattavan rakenteen pinnan lämpötila, $[K]$

Koska tavoitteena on yhdistää konvektion ja säteilyn lämmönsiirtokertoimet, lämpövirran lauseke 2.4 on linearisoitava muotoon

$$\begin{aligned} q_r &= \bar{\epsilon} \sigma (T_i^2 + T_p^2) (T_i^2 - T_p^2) \\ &= \bar{\epsilon} \sigma (T_i^2 + T_p^2) (T_i + T_p) (T_i - T_p) \\ &\approx 4 \bar{\epsilon} \sigma \bar{T}^3 (T_i - T_p) \end{aligned} \quad (2.6)$$

Keskimääräinen säteilylämpötila saadaan kaavasta

$$\bar{T}^3 = \frac{1}{4} (T_i + T_p) (T_i^2 + T_p^2) \approx \left[\frac{T_i + T_p}{2} \right]^3 \quad \text{eli} \quad (2.7)$$

$$\bar{T} = \frac{T_i + T_p}{2} = \left(\frac{t_i + t_p}{2} + 273,15 \right) \text{K} \quad (2.8)$$

Säteilyn lämmönsiirtokertoimet mitattavan rakenteen pinnolla ovat siten

$$h_r = 4 \bar{\epsilon} \sigma \bar{T}^3 \quad (2.9)$$

Konvektiivisen lämmönsiirron analyttinen tarkastelu on yleensä hankalaa, koska tähän fysikaaliseen ilmiöön liittyviä muuttujia on lukuisia. Ratkaisut ovat erilaisia riippuen siitä, onko kysymyksessä luonnollinen vai pakotettu konvektio, ja onko virtaus laminaaria vai turbulenttia. Käytännössä konvektiolämmönsiirtotehtävät ratkaistaan korrelaatioiden avulla. Kirjallisuudessa on esitetty erilaisia lämmönsiirtokorrelaatioita, joiden avulla konvektiivinen lämmönsiirtokerroin voidaan määrittää virtauspauksesta riippuen. Korrelaatiot perustuvat kokeelliseen tutkimukseen.

Dimensioton lämmönsiirtokerroin Nusseltin luku, määritellään konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen (h_c) avulla seuraavasti

$$Nu = \frac{h_c L}{\lambda} \quad (2.10)$$

L on etäisyys ilmavirtauksen tuloreunasta tasopinnalle (ns. karakteristinen mitta), [m]
 λ on virtaavan aineen (ilman) lämmönjohtavuus, [W/(mK)]

Usein tarvitaan keskimääräistä lämmönsiirtokerrointa, joka saadaan yhtälöstä

$$\bar{h}_c = \frac{1}{x} \int_0^x h_c dx \quad ; \quad \bar{Nu} = \frac{\bar{h}_c x}{\lambda} \quad (2.11)$$

Luonnollisen konvektion laskennassa käytetään Nusseltin luvun lisäksi kahta muuta dimensiotonta lukua, nimittäin Grashofin lukua

$$Gr = \frac{g \beta \Delta T L^3}{\gamma^2} \quad (2.12)$$

ja Rayleighin lukua

$$Ra = Gr Pr \quad (2.13)$$

g on maan vetovoiman aiheuttama kiihtyvyys (= 9,81 m/s²)

β on tilavuuden lämpölaajenemiskerroin, [1/K]

ΔT on pinnan ja ilman välinen lämpötilaero, [K]

Pr on Prandtin luku, joka määrittellään seuraavasti

$$Pr = \frac{v}{a} = \frac{\mu c_p}{\lambda} \quad ; \quad a = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (2.14)$$

v on kinemaattinen viskositeetti, [m²/s]

a on termien diffusiviteetti, [m²/s]

μ on dynaaminen viskositeetti, [kg/(ms)]

c_p on Prandtin luku, joka määrittellään seuraavasti

λ on virtaavan aineen (ilman) lämmönjohtavuus, [W/(mK)]

ρ on virtaavan aineen (ilman) tiheys, [kg/m³]

Prandtin luku ilmoittaa virtaavan aineen nopeusrajakerrosta ja lämpötilarajakerrosta sätelevien ominaisuuksien suhteen. Luonnollisen konvektion tasolevyvirtaus muuttuu laminaarisesta turbulentiksi, kun Rayleighin luku (Ra) on suurempi kuin $10^7 \dots 10^9$.

Luonnollisen konvektion Nusseltin luku lasketaan Grashofin luvun (Gr) ja Prandtin luvun (Pr) korrelaatioina.

$$Nu = f(Gr, Pr) \quad (2.15)$$

Luonnollisen konvektion korrelaatiot ovat yleisesti ottaen epätarkempia kuin pakotetun konvektion.

Pakotetun konvektion korrelaatioissa käytetään Reynoldsin lukua, jonka perusteella virtaus määritellään laminaariksi tai turbulentiksi.

$$Re = \frac{vL}{\nu} \quad (2.16)$$

v on ilmavirtauksen nopeus, [m/s]

Pakotetun konvektion tasolevyvirtaus muuttuu turbulentiksi, kun Reynoldsin luku on suurempi kuin $2 \cdot 10^5 \dots 3 \cdot 10^6$.

Pakotetun konvektion Nusseltin luku lasketaan Reynoldsin luvun (Re) ja Prandtin luvun (Pr) korrelaatioina.

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (2.17)$$

Korrelaatiot ovat erilaisia laminaarille ja turbulentille virtaukselle. Laminaarille luonnolliselle konvektiolämmönsiirrolle pystysuoran levyn

pinnasta on mahdollista saada myös analyytinen ratkaisu. Luonnollisessa konvektiossa suoralla pinnalla h_c :n arvo on noin 3,0 W/(m²K), mutta pakotetussa konvektiossa se voi olla selvästi suurempi. Lämmönläpäisykokeessa esiintyy aina sekä luonnollista että pakotettua konvektiota, ja lisäksi virtaus voi olla laminaaria ja turbulenttia. Koeolosuhteissa vallitsevia konvektion lämmönsiirtokertoimia on em. perusteella mahdotonta määritellä tarkasti. Standardissa ISO/DIS 8990 on annettu laskentakaavat ilman ympäristölämpötiloille, joita voidaan käyttää silloin, kun konvektion lämmönsiirtokertoimien arvot eivät ole tiedossa.

$$t_{ys} = \frac{\frac{\phi_{rak}}{A_{rak}} + h_{rs}(t_{is} - t_{ls})t_{ps}}{\frac{\phi_{rak}}{A_{rak}} + h_{rs}(t_{is} - t_{ls})} ; \quad (2.18)$$

$$t_{yu} = \frac{\frac{-\phi_{rak}}{A_{rak}} + h_{ru}(t_{iu} - t_{lu})t_{pu}}{\frac{-\phi_{rak}}{A_{rak}} + h_{ru}(t_{iu} - t_{lu})}$$

Kaavan 2.18 ensimmäisessä yhtälössä on rakenteen lämpimän kammion (s) puoleinen ja toisessa kylmän kammion (u) puoleinen ympäristölämpötila. (Muut alaindeksit: i = ilma, l = suoja-levyn pinta, p = rakenteen pinta, r = säteily, rak = rakenne.)

Jos konvektion lämmönsiirtokerroin on selvästi suurempi kuin säteilyn lämmönsiirtokerroin, ympäristölämpötilana voidaan käyttää ilman lämpötilaa. Ilmavirran nopeus rakenteen pinnalla on ko. tilanteessa suurempi kuin 2,0 m/s. Kalibrintokokeiden perusteella ilman lämpötila on yleensä hyvin lähellä laskennallista ympäristölämpötilaa.

Lämpövirta pintaa-alaikkoköä kohti eli lämpövirran tiheys rakenteen läpi q_{rak} [W/m²]

$$q_{rak} = \frac{\phi_{rak}}{A_{rak}} \quad (2.19)$$

A_{rak} on rakenteen pinta-ala, [m²]

Mitattavan rakenteen pintavastukset

$$m_s = \frac{A_{rak}(t_{ys} - t_{ps})}{\phi_{rak}} ; m_u = \frac{A_{rak}(t_{yu} - t_{pu})}{\phi_{rak}} \quad (2.20)$$

Ohjeissa ja standardeissa annetaan pintavastuksille todellisia tilanteita vastaavia keskimääräisiä arvoja. Ulkopinnan pintavastuksena käytetään yleensä arvoja 0,04...0,06 m²K/W ja sisäpinnalla arvoja 0,13...0,15 m²K/W. Pintojen lämmönsiirtokertoimet ($h_r + h_c$) saadaan pintavastuksien käännteislukuina.

$$h_s = \frac{1}{m_s} ; h_u = \frac{1}{m_u} \quad (2.21)$$

Laskennalliset konvektion lämmönsiirtokertoimet saadaan vähentämällä summasta $h_r + h_c$ säteilyn lämmönsiirtokerroin.

$$h_{cs} = h_s - h_{rs} ; h_{cu} = h_u - h_{ru} \quad (2.22)$$

Rakenteen lämmönläpäisykerroin lasketaan sisäilmasta ulkoilmaan kaavalla

$$U = \frac{1}{m_s + m_u + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{d_n}{\lambda_n}} \quad (2.23)$$

$d_1, \dots, d_n$ ovat rakennekerrosten paksuudet, [m]
 $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ ovat rakennekerrosten lämmönjohtavuudet, [W/(mK)]

Rakenteen läpi siirtyvä lämpövirran tiheys lasketaan lämmönläpäisykerroimen avulla seuraavasti

$$q_{rak} = \frac{\phi_{rak}}{A_{rak}} = U(t_{is} - t_{iu}) \quad (2.24)$$

ja mitattavan rakenteen lämmönläpäisykerroin U_{kok} [W/(m²K)] koeolosuhteiden pintavastuksilla ja sitä vastaava rakenteen kokonaislämmönvastus M_{kok} [m²K/W]

$$U_{kok} = \frac{\phi_{rak}}{A_{rak}(t_{ys} - t_{yu})} ; M_{kok} = \frac{1}{U_{kok}} \quad (2.25)$$

Rakenteen lämmönläpäisykerroin ilman pinta-vastuksia U_{rak} [W/(m²K)] ja sitä vastaava rakenteen lämmönvastus M_{rak} [m²K/W]

$$U_{rak} = \frac{\phi_{rak}}{A_{rak}(t_{ps} - t_{pu})} ; M_{rak} = \frac{1}{U_{rak}} \quad (2.26)$$

2.2 U-arvon laskennallinen arviointi^[1, 2]

Lämmönläpäisykerroimien laskennassa on mahdollista käyttää hyväksi sähköanalogiaa. Kaava 2.24 voidaan kirjoittaa muotoon

$$\phi = UA(t_{is} - t_{iu}) = \frac{1}{R}(t_{is} - t_{iu}) \quad (2.27)$$

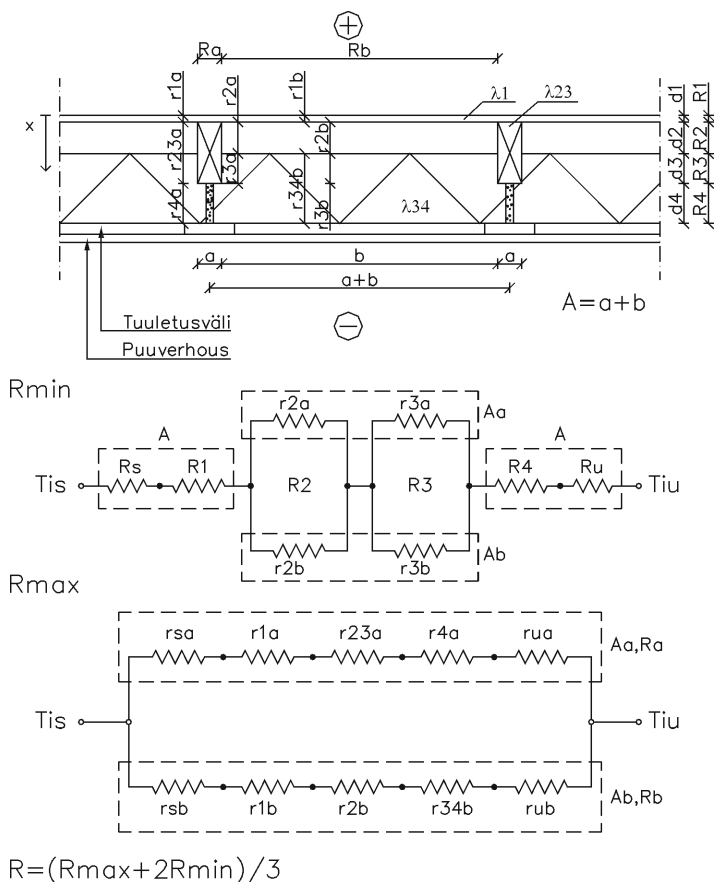
Vertaamalla kaavaa 2.27 sähkövirran Ohmin lakiin

$$I = \frac{U}{R_e} = \frac{1}{R_e}(U_1 - U_2) \quad (2.28)$$

havaitaan selkeä analogia, jossa lämpövirtaa ϕ vastaa sähkövirta I , lämpötilaeroa ($t_{is} - t_{iu}$) potentiaaliero ($U_1 - U_2$) ja johtumisvastusta R sähkövastus R_e . Erityisen havainnollista sähkövastusanalogian käyttö on silloin, kun kyseessä on rakenne, jossa on useita, eri materiaaleista koostuvia rakennekerroksia, jolloin lämmönvastuksia voi olla sekä rinnan että sarjassa, kuten sähkövastuksia sähköpiireissä.

Esimerkkinä sähköanalogian hyödyntämisestä lämmönläpäisykertoimen laskennassa on seuraavassa tarkasteltu polyuretaanilla eristettyä puurankaseinää. Vaikka laskennassa oletetaan, että lämmön virtausta tapahtuu vain yksiulotteisesti eli kohtisuoraan rakenteen läpi (= x-akseli), saadaan menetelmällä melko hyvä likimääräinen ratkaisu lämmönläpäisykertoimelle.

Tämän yksinkertaistuksen vuoksi laskennassa käytetään kahta erilaista ”lämmönvastuspiiriä”, joiden tuloksena saadaan rakenteen lämmönvastukselle ala- ja ylärajaratkaisut. Alarajamenetelmässä kaikki x-akselia kohtisuoraan olevat tasot oletetaan isotermisiksi eli lämpötila muuttuu vain x-akselin suunnassa, ja ylärajamenetelmässä kaikki x-akselin suuntaiset tasot oletetaan adiabaattisiksi eli lämmön virtausta tapahtuu vain x-akselin suunnassa. Rakenteen ”todellinen” lämmönvastus sijoittuu näiden kahden arvon väliin. Jos lämmön virtaus on valtaosin yksiulotteista, molemmat menetelmät antavat tyydyttävän tuloksen. Tämä edellyttää, etteivät samassa rakennekerroksessa olevien rinnakkaisten materiaalien lämmönjohtavuudet poikkea huomattavasti toisistaan. Muita laskennassa tehtäviä oletuksia ovat:



Kuva 2.3. Lämmönvastuksen ala- ja ylärajan laskentaperiaate.

- lämmönjohtumista tarkastellaan jatkuvuustilassa
- materiaalien lämmönjohtavuudet pysyvät vakaina
- säteilylämmönsiirto on merkityksettömän vähäistä.

Seinä rakenne:

- 13 mm kipsilevy (d_1, λ_1)
- 63 mm ilmapöly (d_2, r_{2b}) sähköasennuksia varten
- $48 \times 123 \text{ mm}^2$ puuranka ($d_2 + d_3, \lambda_{23a}$)
- 140 mm (polyuretaani) lämmöneriste ($d_3 + d_4, \lambda_{34b}$)
- 22 mm tuulettuva ilmapöly + puuverho (Näitä ei oteta huomioon U-arvossa.)

Puurankojen keskiöväli on 600 mm, joten laskennassa voidaan tarkastella seinän osaa, jonka pinta-ala on $600 \times 1000 \text{ mm}^2$ ($A = A_a + A_b$). Kuvassa 2.3 on esitetty vastuspiirit lämmönvastuksen ala- ja ylärajan laskentaa varten.

Alarajaratkaisussa

määritetään ensin yksittäisten rakennekerrosten vastukset, jotka sitten sarjastuskytkennän mukaisesti lasketaan normaalisti yhteen.

Sisä- ja ulkopinnan konvektiovastukset

$$R_s = \frac{1}{h_{cs} A} ; R_u = \frac{1}{h_{cu} A} \quad (2.29)$$

Homogeenisten kerrosten (kipsilevy ja runkotolpan ulkopuolella oleva osa lämmöneristeestä) lämmönvastukset:

$$R_1 = \frac{d_1}{\lambda_1 A} ; R_4 = \frac{d_4}{\lambda_{34} A} \quad (2.30)$$

Vastukset r_{2a} ja r_{2b} (puuranka ja ilmarako) sekä r_{3a} ja r_{3b} (puuranka ja lämmöneriste) rakenteen sisällä ovat rinnakkaisia vastuksia, joten ne lasketaan yhteen, kuten rinnan kytketyt sähkövastukset.

$$R_2 = \frac{1}{\frac{1}{r_{2a}} + \frac{1}{r_{2b}}} = \frac{r_{2a} r_{2b}}{r_{2a} + r_{2b}},$$

jossa $r_{2a} = \frac{d_2}{\lambda_{23} A_a} ; r_{2b} = r_{\text{ilmapöly}}$

$$(2.31)$$

$$R_3 = \frac{1}{\frac{1}{r_{3a}} + \frac{1}{r_{3b}}} = \frac{r_{3a} r_{3b}}{r_{3a} + r_{3b}},$$

jossa $r_{3a} = \frac{d_3}{\lambda_{23} A_a} ; r_{3b} = \frac{d_3}{\lambda_{34} A_b}$

Kokonaislämmönvastus saadaan laskemalla yhteen sarjassa olevat vastukset:

$$R_{\min} = R_s + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_u \quad (2.32)$$

Yläajaratkaisussa

määritetään ensin rakenteen erilaisten osien lämmönvastukset läpi rakenteen eli ko. tapauksessa runkotolpan kohdalla olevat sarjavastukset lasketaan yhteen. Samoin tehdään runkotolppien välisellä osalla. Lopuksi nämä rinnakkain olevat eri osien vastukset lasketaan yhteen kuten rinnan kytketyt sähkövastukset.

Sarjassa olevat vastukset *runkotolpan* kohdalla: Sisä- ja ulkopinnan konvektiovastukset

$$r_{sa} = \frac{1}{h_{cs} A_a} ; r_{ua} = \frac{1}{h_{cu} A_a} \quad (2.33)$$

Rakenteiden lämmönvastukset

$$r_{1a} = \frac{d_1}{\lambda_1 A_a} ; r_{23a} = \frac{d_2 + d_3}{\lambda_{23} A_a} ; r_{4a} = \frac{d_4}{\lambda_{34} A_a} \quad (2.34)$$

Lämmönvastus runkotolpan kohdalla

$$R_a = r_{sa} + r_{1a} + r_{23a} + r_{4a} + r_{ua} \quad (2.35)$$

Sarjassa olevat vastukset *runkotolppien välisellä alueella*:

Sisä- ja ulkopinnan konvektiovastukset

$$r_{sb} = \frac{1}{h_{cs} A_b} ; r_{ub} = \frac{1}{h_{cu} A_b} \quad (2.36)$$

Rakennekerrosten lämmönvastukset

$$r_{1b} = \frac{d_1}{\lambda_1 A_b} ; r_{2b} = r_{\text{ilmapöly}} ; r_{34b} = \frac{d_3 + d_4}{\lambda_{34} A_b} \quad (2.37)$$

Lämmönvastus runkotolppien välisellä alueella

$$R_b = r_{sb} + r_{1b} + r_{2b} + r_{34b} + r_{ub}$$

Kokonaislämmönvastus saadaan laskemalla yhteen edellä määritetyt rinnakkain olevat vastukset R_a ja R_b :

$$R_{\max} = \frac{1}{\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b}} = \frac{R_a R_b}{R_a + R_b} \quad (2.38)$$

Sijoitetaan seuraavat arvot edellä esitettyihin kaavoihin:

Materiaalien normaaliset lämmönjohtavuudet

$\lambda_1 = 0,23 \text{ W/(mK)}$ (kipsilevy)

$\lambda_{23} = 0,12 \text{ W/(mK)}$ (puu)

$\lambda_{34} = 0,027 \text{ W/(mK)}$ (polyuretaani)

Ilmaraon lämmönvastus $r_{2b} = 0,83 \text{ K/W}$

Sisä- ja ulkopinnan konvektiiviset lämmönsiirtokertoimet valitaan tässä siten, että pintavastusten summa on $R_s + R_v = 0,33 \text{ K/W}$.

Laskennan tulokset:

$R_{\min} = 9,044 \text{ K/W}$ ja $R_{\max} = 9,457 \text{ K/W}$ ja vastaavat lämmönläpäisykertoimet

$$U_{\max} = \frac{1}{R_{\min} A} = \frac{1}{9,044 \frac{\text{K}}{\text{W}} \cdot 0,600 \text{ m}^2} = 0,184 \frac{\text{W}}{\text{Km}^2} \quad (2.39)$$

$$U_{\min} = \frac{1}{R_{\max} A} = \frac{1}{9,457 \frac{\text{K}}{\text{W}} \cdot 0,600 \text{ m}^2} = 0,176 \frac{\text{W}}{\text{Km}^2}$$

Rakenteen ”todellinen” lämmönvastus saadaan ala- ja ylärajan keskiarvona tai tarkemmin kaavalla

$$R = \frac{R_{\max} + 2R_{\min}}{3} = 9,181 \text{ K/W} \quad \text{ja sitä vastaava lämmönläpäisykerroin} \quad (2.40)$$

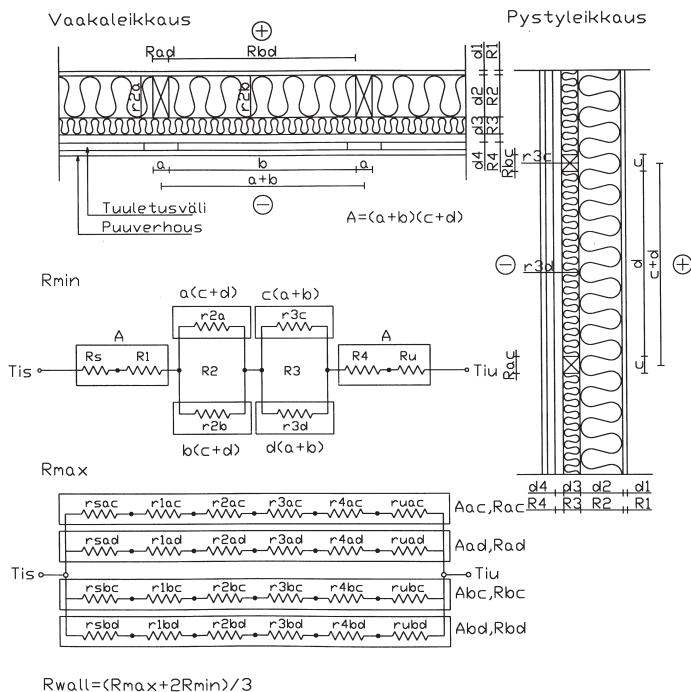
$$U = \frac{1}{RA} = \frac{1}{9,181 \frac{\text{K}}{\text{W}} \cdot 0,600 \text{ m}^2} = 0,182 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

Maksimivirhe lasketaan kaavalla

$$E_{\max} = 100 \frac{(R_{\max} / R_{\min} - 1)}{2} \% = 2,28 \% \quad (2.41)$$

Laskennan perusteella seinärakenteen U -arvo $\approx 0,18 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

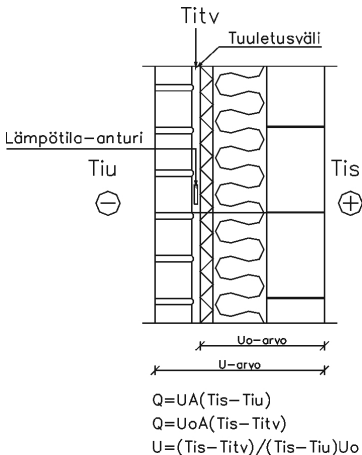
Kuvassa 2.4 on esitetty vastaavat ”lämmönvastuspiirit” ristirunkoiselle puurankaseinälle.



Kuva 2.4. Ristirunkoisin puurankaseinän lämmönvastuksen laskentaperiaate.

2.3 Ulkoverhouksen vaikutus U-arvoon^[3]

Edellisessä laskelmassa puuverhousta ja sen takana olevaa ilmväliä ei otettu huomioon U-arvolaskelmassa, koska ilmväli on ns. tuulettuva. Todellisuudessa puuverhous, mutta vielä selvemmin tiiliverhous, parantavat ulkoseinä- rakenteen U-arvoa. Verhous suojaa muuta seinä- rakennetta tuulelta ja sateelta. Aurinkoisina ke- vättalven päivinä tiiliverhous lämpenee ja pitää varaamallaan lämmöllä tuuletusvälin lämpöti- lan ulkoilman lämpötilaa korkeampana vielä pitkään säteilyvaikutuksen päätyttyä. Verhouk- sen osuutta ulkoseinän U-arvossa arvioidaan



Kuva 2.5. Ulkoverhouksen merkitys ulkoseinän U-arvossa.

kuvassa 2.5 esitetyllä tavalla käyttäen tuuletus- välistä mitattuja lämpötiloja.

Puu- ja tiiliverhotuissa koerakennuksissa (TTKK) lämmityskaudella 1.9.1998–31.5.1999 tehtyjen mittausten perusteella julkisivuver- houksen vaikutus on taulukon 2.1 mukainen.

3 Lämpöhäviöiden laskennan virhelähteitä

3.1 Rakennusaineiden lämmönjohtavuudet: λ_{10} ja λ_n ^[1,3]

Rakennusaineille mitataan laboratoriossa, yleensä keskilämpötilassa +10 °C, lämmönjoh- tavuuden perusarvo (λ_{10}). Lämmönkulutuslas- kelmissa käytetään ns. normaalisen lämmönjoh- tavuuden arvoja (λ_n), jotka määritetään läm- mönjohtavuuden perusarvoista erilaisten mate- riaalin käyttökohteesta ja -tavasta aiheutuvien lisien avulla. Näitä ovat mm. $\Delta\lambda_{kosti}$ ja $\Delta\lambda_{konv}$, joil- la otetaan huomioon materiaalin kosteustila ja lämmöneristävyys alentavien ilmavirtausten vaikutus. Joillakin materiaaleilla myös ns. ikääntyminen muuttaa materiaalin lämmöneris- tysominaisuuksia. Lisäksi λ_n -arvoon voidaan sisällyttää mm. (tyyppihyväksytyn) eristeen läm- mönjohtavuuden hajonnan huomioonottava varmuuslisäys.

Samalla rakennusmateriaalilla voi olla useita λ_n -arvoja. Lämmöneristeillä mm. suojaus- ja asennustapa sekä saumojen tiivistysaste vaikut- tavat oleellisesti tuulen aiheuttamien konvek- tiivivirtausten haitallisuuteen ja siten λ_n -arvoon. Monia rakennusmateriaaleja valmistetaan eri ti- lavuuspainoisina, jolloin myös λ_{10} -arvot ovat erilaisia.

Taulukko 2.1. Julkisivuverhouksen vaikutus ulkoseinän U-arvoon.

Puuverhous (väri: vaalean harmaa)		
Ilmansuunta	U-arvo [W/(m²K)]	U ₀ -arvo ilman puuverhousta
koillinen	0,166	0,174 W/(m²K)
etelä	0,155	U-arvo (ilmansuuntien keskiarvo)
länsi	0,155	
luode	0,160	(U ₀ – U) / U × 100 %
		4,6 %
Tiiliverhous (väri: tiilenpunainen)		
Ilmansuunta	U-arvo [W/(m²K)]	U ₀ -arvo ilman puuverhousta
pohjoinen	0,246	0,264 W/(m²K)
koillinen	0,259	U-arvo (ilmansuuntien keskiarvo)
etelä	0,218	
lounas	0,232	(U ₀ – U) / U × 100 %
länsi	0,239	
		10,6 %

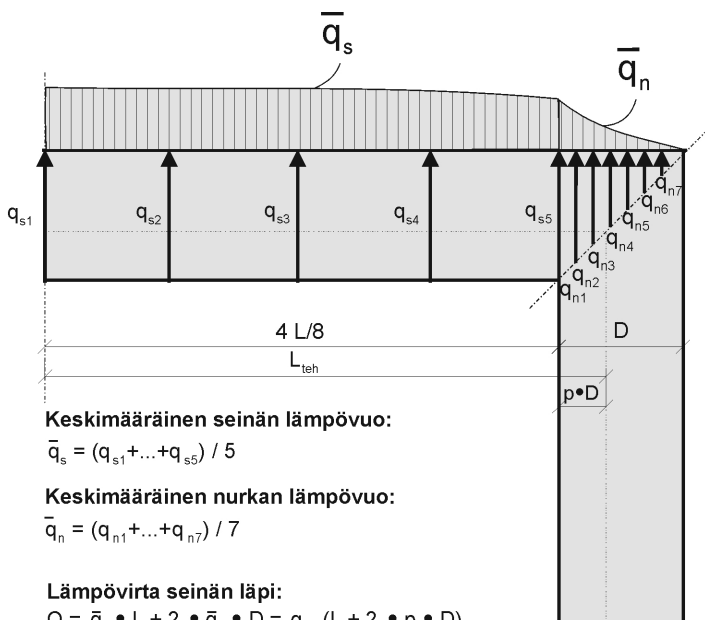
Koerakennuksissa (TTKK) suoritettujen energiankulutus- ja lämpövirtalevymittaukset osoittavat, että johtumislämpöhäviöiden laskennassa yleisesti käytetyissä lämmönjohtavuusarvoissa on joillakin materiaaleilla em. lisäykset arvioitua suurempia.

3.2 Lämpöhäviöiden laskennassa käytettävät pinta-alat^[3]

Rakennuksen lämpöhäviöitä jatkuvuustilan laskennalla määritettäessä lämpötilajakauman oletetaan olevan lineaarinen rakennekerroksen pintojen välillä. Lisäksi lämpöhäviöt määritetään yleensä rakennuksen ulkomittoja käyttäen. Jos rakenne on lämpöä varaava ja/tai rakennuksessa on paljon nurkkia, saatetaan ko. oletuksen vuoksi tehdä huomattava virhe lämpöhäviöiden laskennassa.

Epäjatkuvuustilan laskennassa ei lämpötilan jakauman tarvitse välttämättä olla lineaarinen ja se voi vaihdella myös ajan funktiona. Rakenteen oletetaan jakautuvan äärellisen ohuisiin kerroksiin (1 D), tasoelementteihin (2 D) tai kuutioelementteihin (3 D). Kerrosten välille muodostetaan tasapainoyhtälöt, joiden avulla rakenteen lämpötilajakauma eri ajanhetkillä voidaan määrittää. Lähtöarvoina tarvitaan rakenteen kerrospaksuudet ja lämmönjohtavuudet sekä rakenteen pintalämpötilat.

Ns. differenssilaskentaa sovellettiin rakennuksen lämpöhäviöiden määrittämiseen. Laskennassa käytettiin koerakennuksista (TTKK) eri kohdista mitattuja pintalämpötiloja. Nurkan ja suoran seinän lämpöhäviöt laskettiin differenssilaskennasta saatuja laskentapisteen lämpötiloja ja tutkittavan rakenteen lämmönjohtavuusarvoja käyttäen (kuva 3.1).



Pinta-alakerroin:

$$p = \left(\frac{\bar{q}_s}{q_{s1}} - 1 \right) \frac{L}{2D} + \frac{\bar{q}_n}{q_{s1}}$$

Laskentapituus:

$$L_{\text{teh}} = L + 2 \cdot p \cdot D$$

Kuva 3.1. Nurkan lämpöhäviöiden laskenta.

Seinän tai ylä-/alapohjarakenteen keskimääräinen lämpöhäviö lasketaan kaavalla 3.1.

$$\bar{q}_s = - \sum_{n=1}^n (T_{\text{spi}} - T_{\text{upi}}) \lambda_i / d_i \quad (3.1)$$

Nurkan keskimääräinen lämpöhäviö lasketaan kaavalla 3.2.

$$\bar{q}_n = - \sum_{m=1}^m (T_i - T_{\text{upi}}) \lambda_i / d_i \quad (3.2)$$

- n on laskentapisteparien lukumäärä seinässä tai ylä-/alapohjassa
 m on laskentapisteparien lukumäärä nurkassa
 T_{spi} on rakennekerroksen sisäpinnan lämpötila, [°C]
 T_{upi} on rakennekerroksen ulkopinnan lämpötila, [°C]
 T_i on laskentapisteen lämpötila nurkassa, [°C]
 λ_i on rakennekerroksen lämmönjohtavuus, [W/(K·m)]
 d_i on tarkasteltavien laskentapisteen välimatka, [m]

Differenssilaskennalla saatujen nurkan ja muun seinän lämpöhäviöiden avulla voidaan määrittää kuinka suuri osuus risteävän seinän paksuudesta tulee lämpöhäviöiden laskennassa ottaa huomioon. Tämä voidaan ratkaista kirjoittamalla taseyhtälö (kaava 3.3), jossa seinän ja nurkan keskimääräisillä lämpövirrantiheyksillä saatava lämpöhäviö asetetaan yhtä suureksi seinän keskiosan lämpövirrantiheydellä ja laskennallisilla mitoilla määrittettävän lämpöhäviön kanssa.

$$Q' = \bar{q}_s \frac{L}{2} + \bar{q}_n d = q_{s1} \left(\frac{L}{2} + pd \right) \quad (3.3)$$

Q' on seinän tai yläpohjan lämpövirta pituusyksikköä kohden, [W/m]

L on seinän sisämitta, [m]

d on seinän paksuus, [m]

q_{s1} on seinän keskiosan lämpövirrantiheys, [W/m²]

p on nurkasta huomioitava osuus

$\bar{q}_s$ ja $\bar{q}_n$ voidaan laskea kaavoista 3.1 ja 3.2.

Laskennallisia pinta-aloja määritettäessä nurkasta otetaan siten huomioon kerointa p vastava osuus, joka voidaan laskea kaavalla 3.4.

$$p = \left(\frac{\bar{q}_s}{q_{s1}} - 1 \right) \frac{L}{2d} + \frac{\bar{q}_n}{q_{s1}} \quad (3.4)$$

Suhdeluvun p (kaava 3.4) avulla voidaan määrittää, kuinka suuri osuus risteävän rakenteen (ulkoseinä, ylä- tai alapohja) paksuudesta rakennuksen nurkissa tulee ottaa huomioon määritettäessä lämpöhäviöiden laskentapinta-alaa.

Taulukossa 3.1 esitetään differenssimenetelmällä ja edellä mainituilla periaatteilla lasketut p -arvot kuudelle koerakennukselle. Kertoimia p_1 ja p_2 käytetään arvioitaessa seinien laskennallista pinta-alaa. Tällöin seinän sisäpituuteen lisätään seinän paksuus kerrottuna $2 \times p_1$:llä ja sisäkorkeuteen ylä- ja alapohjan paksuus kerrottuna p_2 :llä (tässä tapauksessa yp ja ap samanlaiset). Yläpohjan tehollinen pinta-ala lasketaan lisäämällä sisämittoihin seinän paksuus kerrottuna $2 \times p_2$:llä. Menetelmällä saavutettavaan laskentatarkkuuteen vaikuttaa oleellisesti se, miten tarkasti p -kertoimet pystytään määrittämään.

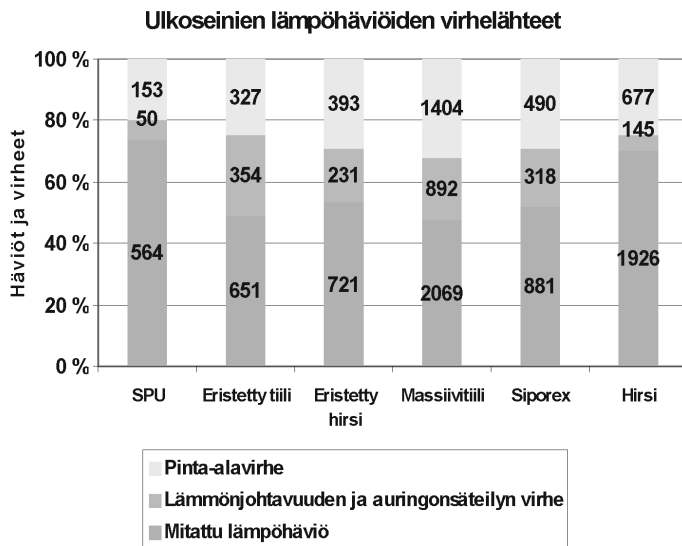
3.3 Ulkoseinien lämpöhäviöt koerakennuksissa ja laskennan virhelähteet^[3]

Kuvassa 3.2 esitetään koerakennusten lämmityskaudella 1998–1999 mitatut ja lasketut (RakMK osa D5) seinien suhteelliset (%) ja absoluuttiset (kWh) lämpöhäviöt sekä niiden eron pääasialliset aiheuttajat. Alin osa kuvaajassa osoittaa mitatun ja laskennallisen seinän lämpöhäviön suhteen ja mitatun lämpöhäviön koerakennuksittain. Kaksi ylintä osaa kuvaavat lasketun ja mitatun lämpöhäviön eroa. Keskimäinen osa aiheutuu laskennallisen ja todellisen lämmönjohtavuuden erosta sekä auringon säteilytehon lämpöhäviötä alentavasta vaikutuksesta ja ylin osa laskentapinta-alan määrittämisessä tehdystä virheestä.

Koska koerakennukset ovat suhteellisen pieniä, suurin osa virheestä aiheutuu liian suurista laskentapinta-aloista. Pienempi osa virheestä aiheutuu liian suuren lämmönjohtavuuden ja auringon säteilyenergian vaikutuksesta. Normaalikokoisissa rakennuksissa pinta-alojen vaikutus olisi kuitenkin huomattavasti pienempi.

Taulukko 3.1. Nurkille lasketut p -kertoimet laskennallisten pinta-alojen määrittämiseksi.

	SPU	Eristetty tiili	Eristetty hirs	Tiili	Siporex	Hirsi
p_1 , seinän leveys	0,14	0,36	0,10	0,20	0,30	0,04
p_2 , seinän korkeus	0,40	0,18	0,20	0,01	0,07	0,07
p_3 , ylä- ja alapohja	0,25	0,52	0,34	0,48	0,49	0,41



Kuva 3.2. Koerakennusten mitatut ja lasketut seinien lämpöhäviöt sekä niiden eron aiheuttajat.

LÄHTEET

- [1] Björkholtz D., Lämpö ja kosteus - Rakennusfysiikka, Rakennustieto Oy, Helsinki, 1997
- [2] Incropera F., DeWitt P., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 4. Ed., John Wiley and Sons, New York, 1996.
- [3] Lindberg R., Keränen H., Teikari M., Ulkoseinärakenteen vaikutus rakennuksen energiankulutukseen, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Rakennustekniikan osasto, Tampere, 1998.
- [4] Vinha J., Rakenteiden lämmöneristysominaisuuksien mittausteisto, lisensiaattitutkimus, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Rakennustekniikan osasto, Tampere, 1998.