



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan laitos

TALONRAKENNUSTEKNIikka

TUTKIMUSSELOSTUS NRO TRT/1706/2008

MATALAENERGIARAKENTEIDEN TOIMIVUUS

Tutkimustuloksia ja suosituksia uusiin lämmöneristys- ja energiankulutusmääräyksiin ja -ohjeisiin, loppuraportti

31.10.2008



MATALAENERGIARAKENTEIDEN TOIMIVUUS

Tutkimustuloksia ja suosituksia uusiin lämmöneristys- ja energiankulutusmääräyksiin ja -ohjeisiin, loppuraportti

Tutkimusselostus N:o 1706

88 sivua

Tilaaaja	Ympäristöministeriö Erkki Laitinen, Raimo Ahokas PL 35 00023 Valtioneuvosto
Tilauspvm	24.1.2008
Tehtävä	Selvittää mahdolliset eri rakennusosien (ulkoseinät, yläpohja, alapohja, ikkunat ja ovet) lämmöneristävyyden parantamisen ja myös ilmastomuutoksesta johtuvien rakenteiden toimintaolosuhteiden muutosten aiheuttamat reunaehdot rakenteiden energia- tehokkuuden parantamiselle.
Asiantuntijaryhmä	Juha Vinha pj. Ralf Lindberg Matti Pentti Jussi Mattila Jukka Lahdensivu Juhani Heljo Jommi Suonketo Virpi Leivo Minna Korpi Hanna Aho Kimmo Lähdesmäki Anu Aaltonen Tampereen teknillinen yliopisto Rakennustekniikan laitos PL 600 33101 Tampere Puhelin (03) 3115 2873 Faksi (03) 3115 2811
Lausunnon jakelu	Ympäristöministeriö 3 kpl TTY / Rakennustekniikan arkisto 1 kpl Juha Vinha 1 kpl

Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan



MATALAENERGIARAKENTEIDEN TOIMIVUUS

Tutkimustuloksia ja suosituksia uusiin lämmöneristys- ja energiankulutusmääräyksiin ja -ohjeisiin, loppuraportti

SISÄLLYSLUETTELO

1.	LÄHTÖKOHTA	5
2.	RAKENNETYYPPIEN JA TUOTANTOTEKNIIKOIDEN MUUTTUMINEN	6
2.1	Yleistä.....	6
2.2	Tuulettumattomat ja vähän tuulettuvat yläpohjat.....	7
2.3	Puurakenteiset vasakatot	8
2.4	Puukorotetut katot	8
2.5	Maanvastaiset alapohjat.....	8
2.6	Puurakenteiset ryömintätilaiset alapohjat.....	8
2.7	Betonisandwich-ulkoseinät.....	9
2.8	Eristerapatut ulkoseinät.....	9
2.9	Puurakenteiset ulkoseinät	9
2.10	Hirsirakenteet	9
2.11	Kevytbetonirakenteet.....	10
2.12	Harkkorakenteet	10
2.13	Perusmuurit	10
2.14	Hormit.....	10
2.15	Ikkuna- ja oviliitokset	10
2.16	Johtopäätökset.....	11
3.	VAIPAN ILMANPITÄVYYS.....	12
3.1	Yleistä.....	12
3.2	Tulokset ja johtopäätökset.....	12
4.	RAKENTEIDEN SISÄINEN KONVEKTIO	14
4.1	Yleistä.....	14
4.2	Kirjallisuusselvitys	14
4.3	Laskennalliset tarkastelut	16
4.4	Johtopäätökset.....	19
5.	IKKUNAT	20
5.1	Yleistä.....	20
5.2	Kirjallisuusselvitys	21
5.3	Ikkunakokeet	22
5.4	Johtopäätökset.....	24
6.	TUULETETTU YLÄPOHJA	24
6.1	Yleistä.....	24
6.2	Kirjallisuusselvitys	25
6.3	Johtopäätökset.....	28

Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan



7.	RYÖMINTÄTILAINEN ALAPOHJA	28
7.1	Yleistä.....	28
7.2	Tyypilliset olosuhteet nykyisissä ryömintätiloissa.....	29
7.3	Lämmöneristeen lisäämisen vaikutus olosuhteisiin.....	31
7.4	Johtopäätökset.....	33
8.	MAANVASTAINEN ALAPOHJA.....	34
8.1	Yleistä.....	34
8.2	Maan lämmönvastus	36
8.3	Lämpötilajakauma maanvastaisen alapohjan alapuolisessa maassa.....	37
8.4	Maanvastaisen alapohjan lämpöhäviöiden suuruus.....	40
8.5	Johtopäätökset.....	43
9.	RAKENNUSTEN ROUTASUOJAUS.....	44
10.	RANKARAKENTEISET ULKOSEINÄT	44
10.1	Yleistä.....	44
10.2	Puurunkoisen ulkoseinärakenteen kosteustekninen toiminta.....	45
10.3	Johtopäätökset.....	49
11.	MASSIIVIRAKENTEET	50
11.1	Yleistä.....	50
11.2	Kirjallisuusselvitys	51
11.3	Laskennalliset tarkastelut.....	54
11.4	Johtopäätökset.....	60
12.	RAKENNUSTEN JÄÄHDYTYS	61
12.1	Yleistä.....	61
12.2	Toimistorakennukset	63
12.3	Asuinkerrostalot.....	64
12.4	Pientalot	64
12.5	Johtopäätökset.....	66
13.	KYLMÄSILLAT	67
14.	ILMANVAIHTO	68
15.	YHTEENVETO JA SUOSITUKSET	69
15.1	Yleistä.....	69
15.2	Rakennetyyppien ja tuotantotekniikoiden muuttuminen	70
15.3	Vaipan ilmanpitävyys.....	71
15.4	Rakenteiden sisäinen konvektio.....	73
15.5	Ikkunat.....	74
15.6	Tuuletettu yläpohja	74
15.7	Ryömintätilainen alapohja	75
15.8	Maanvastainen alapohja	76
15.9	Rakennusten routasuojaus.....	78
15.10	Rankarakenteiset ulkoseinät	79
15.11	Massiivirakenteet.....	80
15.12	Rakennusten jäähdytys	81

Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan



15.13 Kylmäsilat	82
15.14 Ilmanvaihto	84
LÄHDELUETTELO	86



1. LÄHTÖKOHTA

Rakennusten lämmöneristys- ja energiankulutusmääräysten kiristämisen aiheuttamien vaikutusten arvioiminen rakentamisessa on varsin haasteellinen ja monimutkainen ongelma. Kyse ei ole pelkästään rakennusfysikaalisista asioista, vaan myös rakennusteknisistä ja taloudellisista tekijöistä, joita tulee arvioida yhtenä kokonaisuutena. Rakennusfysikaalisessa mielessä jokin rakenneratkaisu voi toimia kohtuullisen hyvin, mutta sen käyttö teknisessä tai taloudellisessa mielessä ei ole kannattavaa eikä tule sen vuoksi yleistymään. Toisaalta U-arvon kiristäminen voi lisätä rakenteen kosteusvaurioriskiä hyvin eri tavoin riippuen mm. käytettävistä rakenteista ja rakennusmateriaaleista, työmenetelmistä, rakennuksen sisä- ja ulkoilman olosuhteista ja rakennuspaikasta. Syvällinen tutkimus eri osatekijöiden keskinäisestä merkityksestä edellyttäisi huomattavasti laajempaa ja pitkäkestoisempaa tutkimusta, kuin mitä tässä tutkimuksessa on aikataulun ja rahoituksen suhteen mahdollista toteuttaa. Näin ollen tässä tutkimuksessa on pyritty tuomaan esiin tärkeimpiä tekijöitä, jotka tulee ottaa huomioon, jos lämmöneristys- ja energiankulutusmääräyksiä kiristetään. Edellä mainituista syistä johtuen tarkasteluissa on otettu kantaa myös rakennusteknisiin ja taloudellisiin tekijöihin, vaikka rakennusfysikaaliset tarkastelut ovatkin tarkasteluissa pääosassa.

Asiantuntijaryhmämme on käynyt läpi lämmöneristys- ja energiankulutusmääräysten kiristämisen vaikutuksia useilla eri osa-alueilla ja eri vaipparakenteissa. Tarkempaan tarkasteluun on valittu sellaisia rakenneratkaisuja, joiden rakennusfysikaaliseen toimintaan lämmöneristysmääräysten kiristämällä on merkittäviä vaikutuksia. Eri osa-alueisiin ja rakennustyyppisiin liittyvistä asioista on pyritty muodostamaan kokonaiskuva saatavilla olevien tutkimustietojen, laskentatarkastelujen ja käytännön kokemusten avulla. Joku asiantuntijaryhmän jäsenistä on tehnyt taustatutkimusta kustakin valitusta osa-alueesta/ rakenteesta ja saatuja tuloksia on tämän jälkeen arvioitu asiantuntijaryhmän yhteisissä kokouksissa. Näiden keskustelujen tuloksena on syntynyt tässä raportissa esitetyt tutkimustulokset ja suositukset.

Koska lämmöneristys- ja energiankulutusmääräysten kiristämisen todelliset vaikutukset ovat monissa tapauksissa vaikeasti arvioitavissa yksiselitteisesti, on monen osa-alueen ja rakennustyyppien tarkasteluissa tullut esiin hyvin erilaisia näkemyksiä ja mielipiteitä siitä, mikä eri osatekijöiden merkitys on kokonaisuutta tarkasteltaessa ja mitä asioita tulisi erityisesti painottaa. Eri osa-alueita käsittelevissä kappaleissa onkin esitetty niitä asioita, joista on oltu pääosin yksimielisiä.

Yleisesti ottaen voidaan todeta, että rakennusosien lämmöneristyksen lisääminen heikentää rakenteiden kosteusteknistä toimintaa ja joissakin tapauksissa myös rakenteiden lämpötekniistä toimintaa. Lämmöneristyksen parantaminen viilentää rakennuksen ulkovaipan ulkosia, jolloin homeen kasvu ja kosteuden kondensoitumisriski niissä lisääntyy. Lämmöneristyksen lisääminen heikentää myös auringosta tulevan lämmön varastoitumista rakenteisiin



(massiivirakenteiden lisäeristys) tai lämmön poistumista rakennuksesta, jolloin rakennuksen lämmitys- tai jäähdytystarve lisääntyy. Tässä mielessä lämmöneristysmääräysten kiristämiseen tulee suhtautua kriittisesti.

Odotettavissa oleva ilmastonmuutos heikentää myös rakenteiden kosteusteknistä toimintaa. Ilmaston lämpeneminen ja lisääntyvät sateet lisäävät homeen kasvua rakenteiden ulko-osissa, koska ulkoilman olosuhteet ovat suuremman osan vuotta homeen kasvun kannalta suotuisalla alueella. Myös kuivumiselle otolliset ajanjaksot voivat vähentyä. Lisääntyvät tuulet ja viistosaderasitukset heikentävät puolestaan ulkoverhousten pitkäaikaiskestävyyttä. Nämä asiat lisäävät entisestään matalaenergiarakenteiden kosteusongelmia.

Valtaosa asiantuntijaryhmämme jäsenistä ei näe järkevänä nyt kaavailtua 30–40 % lämmöneristysmääräysten kiristystä sen paremmin rakennusfysikaaliselta kuin rakennustekniseltä kannaltakaan katsottuna. Järkevänä pidetty kiristystaso on ollut karkeasti ottaen n. puolet tästä. Suosituksemme onkin, että tulevat kiristykset olisivat esitetyjä arvoja pienempiä.

Mikäli lämmöneristysmääräyksiä kiristetään, tulee kiristykset painottaa niihin rakennusosiin, joissa määräysten kiristäminen on rakennusfysikaalisesti turvallisinta ja taloudellisesti kannattavinta. Tämän arvioiminen on kuitenkin monen osatekijän/ rakenteen osalta vaikeaa, koska läheskään kaikkien kohdalla ei ole nähtävissä selkeää raja-arvoa, jossa rakennusfysikaalisten tai teknisten ongelmien määrä alkaa merkittävästi lisääntyä. Monessa tapauksessa olosuhteet rakenteessa muuttuvat vain pikku hiljaa huonommiksi ja riski rakenteen home- ja kosteusongelmiin kasvaa. Toisaalta niissäkin osatekijöissä/ rakenteissa, joissa tällainen kriittinen alue löytyy, se voi olla hyvin laaja riippuen valituista tarkastelukriteereistä, vallitsevista sisä- ja ulkoilman olosuhteista, käytettävistä rakenteista ja materiaaleista ja rakennustyön huolellisuudesta.

Seuraavissa luvuissa on käyty yksityiskohtaisemmin läpi eri osa-alueisiin ja vaipparakenteisiin liittyviä tutkimustuloksia. Tutkimuksen lopussa on erillinen yhteenvetoluku eri osa-alueiden ja vaipparakenteiden tutkimustuloksista ja annetuista suosituksista rakennusmääräyksiin ja -ohjeisiin.

2. RAKENNETYYPPIEN JA TUOTANTOTEKNIKOIDEN MUUTTUMINEN

2.1 Yleistä

Pystyrakenteissa lämmöneristekerroksen läpi tehtävien ripustusten ja kannatusten (sokkeli-kuoret ja kuorielementit, ulokeparvekkeet ja -katokset, kuorimuurit yms.) momenttirasitus kasvaa selvästi, jolloin



- kylmäsilta-vaikutus lisääntyy (dimensiot kasvavat, kannatinrakenteita tehdään enemmän teräksestä, jolla on suurempi lämmönjohtavuus)
- kantavan rungon rasitus kasvaa. Tämä voi muodostua uudeksi kriittiseksi kohdaksi mitoituksessa, jota ei välttämättä tule huomatuksi.

Vaakarakenteissa eristekerroksen kokoonpuristuvuus lisääntyy, mistä saattaa aiheutua painumien ja konvektiovirtausten lisääntymistä sekä erilaisia ongelmia liittymien toteutuksessa.

Rakenteiden paksunemisen välttäminen saattaa aiheuttaa paremman lämmöneristyskyvyn omaavien materiaalien käyttöönoton ”uusissa” paikoissa, mikä saattaa johtaa rakenteiden ääneneristysten merkittävään heikkenemiseen sekä siihen, että rakenteiden kosteusteknisiä toimintoja ei hallita.

Rakennussuunnittelu (arkkitehtuuri) muuttuu kankeammaksi, koska vaipan ”käännepisteisiin” tulee runsaasti ns. sokeaa aluetta, johon ei voida sijoittaa esim. ovia tai ikkunoita. Tämä hankaloittaa myös mm. sisäänvedettyjen parvekkeiden ja terassien, kattoikkunoiden ja erkkerien sekä käännetyllä lattiarakenteella toteutettujen terassien rakennussuunnittelua.

Lämmöneristeiden lämpöliikkeitä ei ole totuttu ottamaan huomioon rakennesuunnittelussa. Mahdollinen solumuovieristeiden käytön lisääntyminen voi johtaa siihen, että lämpöliikkeet aiheuttavat eristeeseen juuri kylmissä olosuhteissa ”kutistumiskanavia”. Sama vaikutus on eristeen jälkikutistumisella. Nämä molemmat voivat heikentää merkittävästi rakenteiden todellista lämmöneristävyttä ja erityisesti rakennuksen ilmanpitävyyttä.

Eristämisessä siirryttäen käyttämään levyvillojen sijasta puhallettavia tuotteita, josta seuraa suurempaa konvektiota ja eristekerroksen painumisen aiheuttamia ongelmia, erityisesti pystyrakenteissa, joissa eristekerroksen paksuus on suuri.

2.2 Tuulettumattomat ja vähän tuulettuvat yläpohjat

Tuulettomissa ja vähän tuulettuissa yläpohjissa vedeneristeen alusta tulee joustavammaksi erityisesti mineraalivillaratkaisussa, mikä saattaa haitata erilaisten liittymien toteutusta ja kestävyttä.

Kantavilla teräsprofiileilla toteutetussa yläpohjassa lämmöneristeen läpi tehtävät työmaakiinnitykset (esim. yksikerroskatteen kiinnitys) vaikeutuvat ja ohiporausten määrä lisääntyy. Syntyvät konvektiovirtaukset voivat olla nykyistä haitallisempia rakenteiden kuivumiskyvyn vähetessä.



2.3 Puurakenteiset vasakatot

Puurakenteisissa vasakatoissa siirryttänee palkkirakenteen sijasta myös mataliin NR-ristikoihin tai levyuumapalkkeihin (mahdollisesti kuitulevyuuma), mistä aiheutuu

- nykyistä suurempia rakenteen kosteusmuodonmuutoksia, koska ala- ja yläpaarteet ovat eri vuodenaikoina hyvin erilaisissa kosteusoloissa
- suurempi riski ilmatiiviyden heikkenemiselle lisääntyvien kosteusmuodonmuutosten seurauksena
- ylimääräisen varmuuden häviämistä rakenteesta, koska ristikot ja levyuumapalkit mitoitetaan yleensä tarkemmin kuin puuvasat

2.4 Puukorotetut katot

Lämmöneristyksen lisääminen muuttaa puurakenteisten yläpohjien tuuletustilan olosuhteita homeen kasvulle suotuisammaksi. Heikoin tilanne on betonilaatan päälle tehdyissä puukorotetuissa katoissa, joissa tuuletustila on jo nyt matala ja tuuletus usein puutteellista. Ulkonäkösysteistä puukorotettujen kattojen korkeutta ei haluta kasvattaa, jolloin tuuletustilaa saataan jopa entisestään madaltaa.

2.5 Maanvastaiset alapohjat

Maanvastaisissa alapohjissa tavanomaisen betonilaatan paino ei enää riitä ”tiivistämään” paksuja levykerroksia heti laatan valun yhteydessä, vaan tämä tapahtuu vasta ajan myötä. Tämä voi johtaa lattialaatan painumiseen. Lujempien eristelaatujen käyttöönotto (kimmoisen puristumisen vähentämiseksi) saattaa lisätä tätä ongelmaa, koska levyt ovat silloin taiputusjäykempiä. Seurauksena ovat vedeneristysten ja radontiivistysten pettäminen sekä mahdolliset mekaaniset vauriot eristekerroksessa kulkevilla putkistoilla.

2.6 Puurakenteiset ryömintätillaiset alapohjat

Rakenteiden paksuneminen aiheuttaa lattian korkeusaseman nousemisen, millä voi olla ei-toivottu vaikutus rakennusten ulkonäköön. Toisaalta tämä vaikeuttaa esteettömyystavoitteiden saavuttamista.

Eristekerroksen paksuneminen aiheuttaa myös niiden painumisriskin kasvamisen. Tämä saattaa aiheuttaa sen, että eristekerros painuu irti lämpimästä pinnasta ja saa aikaan lämpö- ja kosteusteknisesti hyvin haitallisen ulkoilman konvektioreitin rakenteen sisälle.

Puurakenteisissa ryömintätillaisissa alapohjissa siirryttänee palkkirakenteen sijasta mataliin NR-ristikoihin tai levyuumapalkkeihin (mahdollisesti kuitulevyuuma), josta saattaa seurata:

Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan



- nykyistä suurempia rakenteen kosteusmuodonmuutoksia, koska ala- ja yläpaarteet ovat eri vuodenaikoina hyvin erilaisissa kosteusoloissa
- suurempi riski ilmatiiviyden heikkenemiselle lisääntyvien kosteusmuodonmuutosten seurauksena
- hoikan alapaarteen lahoriskin aiheuttamia kantavuusriskejä
- lisääntyviä värähtelyongelmia
- ylimääräisen varmuuden häviämistä rakenteesta, koska ristikot ja levyuumapalkit mitoitetaan yleensä tarkemmin kuin puuvasat

2.7 Betonisandwich-ulkoseinät

Betonisandwich-elementtien ulkonurkkadetalji voi muuttua hankalasti toteutettavaksi ja joutaa käyristymiseen ja asennusvaurioiden yleistymiseen.

Nykymuotoisen ansaan hyödyntäminen ei ole enää mahdollista matalissa nauhamaisissa elementeissä. Tämän seurauksena siirryttänee suuremman kylmäsillan aikaan saavien teräskonsolien käyttöön. Vaihtoehtoisesti joudutaan valmistamaan räätälöityjä ansaita.

Ansaan rasitus kasvaa ja kiinnityspisteitä tulee vähemmän, jolloin kiinnitysvarmuus alenee.

2.8 Eristerapatut ulkoseinät

Kolmikerroseristerappauksissa rappauksen laskeutuminen lisääntyy eristepaksuuden mukana, mikä vaikeuttaa mm. erilaisten liitosten tiivistämistä.

2.9 Puurakenteiset ulkoseinät

Puurakenteisissa ulkoseinissä pystyrungon toteutustapa muuttunee joko levyuuma- tai ristikkoratkaisuksi, jolloin sisäpuolinen lisäkoolaus ja sen mukanaan tuomat lämpö- ja kosteustekniset edut menetetään.

Yksitolpparungon tilalle voi tulla eriytetty kaksitolpparunko. Tämän seurauksena saattaa tulla ongelmia rakennusten jäykistyksen järjestämisessä.

Paksujen puuelementtien liitosten toiminnan hallitseminen vaikeutuu. Nyt esim. suuri osa kiinnityksistä tehdään vain toispuoleisina.

2.10 Hirsirakenteet

Hirsirakenteissa lisääntyvä ja paksuneva lisäeristäminen voi aiheuttaa kosteusongelmia

- sisäpuolinen eristäminen lisääntyy



- eristämistä tehdään epämielikkäisiin kohtiin kuten märkätiloihin
- kompensatiotavoitteet voivat johtaa ”järjettömiin” rakenteisiin

2.11 Kevytbetonirakenteet

Kevytbetonirakenteisissa ryömintätalaisissa alapohjissa rakenteen mahdollinen yläpuolinen lisäeristäminen kasvattaa raudoitteiden korroosioriskiä rakenteen alapinnassa.

Kevytbetoniseinissä ”ennenaikainen” (ennen kuin rakennuskosteus on valtaosin poistunut) ulkopuolinen lisälämmöneristäminen saattaa aiheuttaa lisäeristyskerroksen vaurioitumisen (eristerappaus, puuverhous).

2.12 Harkkorakenteet

Harkkorakentaminen nykymuotoisena muuttuu epämielikkääksi (halkaistut kevytsora- ja valuharkot), koska harkkojen koko kasvaa yli mielekkään käsiteltävyyksirajan.

Halkaistujen harkkorakenteiden ulkokuoren halkeiluriski saattaa kasvaa, koska ulkokuoren ankkuroituminen leikkaussuunnassa muuttuu vähemmän jäykäksi.

2.13 Perusmuurit

Vaikka perusmuureille ei asetetakaan nykyisin U-arvovaatimusta, niiden paksuus kasvaa seinien mukana. Toteutus harkkorakenteisena (pientalot) muuttunee nykymuodossaan epämielikkääksi. Halkaistujen harkkojen sijasta siirryttänee erillisiin harkkomuureihin ja työmaalla tehtävään eristehalkaisuun, jossa lämmöneristyksen laatu saattaa jäädä heikoksi. Lattian lämmöneristävyden parantuessa perusmuurin lämmöneristävyden merkitys kasvaa, jolloin on perusteltua antaa myös niille U-arvomääräys (ks. luku 8).

2.14 Hormit

Terässavupiippujen ulkokuori kuumenee nykyistä enemmän, kun ulkovaippa lämpöeristetään pidemmältä matkalta aiheuttaen ylikuumenemisriskin kasvamisen. Tämä on aiheuttanut jo nyt joukon tulipaloja.

2.15 Ikkuna- ja oviliitokset

Rakenteiden paksuntuessa ikkunaa ei saada kaikissa tapauksissa (kiviseinissä) kovin helposti optimaaliseen paikkaan. Huurtumisen takia ikkunan tulisi olla lähellä rakenteen sisäpintaa, mutta energiatehokkuuden kannalta se tulisi sijoittaa eristyskerroksen kohdalle. Karmisyvyys tulisi kasvattaa, jotta ikkunan ympärille ei jäisi energiavuotokohtaa.



2.16 Johtopäätökset

U-arvovaatimusten kiristäminen perinteiseen tapaan rakennusosatasolla on ongelmallista, koska järkevät toteutusmahdollisuudet ja toisaalta ongelmat ovat selkeästi rakennetyyppi- ja materiaalikohtaisia. Osassa rakennetyypeistä lämmöneristyspaksuuden lisääminen aiheuttaa merkittäviä teknisiä ongelmia ja muutostarpeita. Osassa rakennetyypeistä muutos voi taas sujua lähes ongelmitta. Keskeiset rakennetyypit on koottu tätä silmälläpitäen seuraavaan taulukkoon.

Taulukko 2.1 Eristyskyvyn lisäämisen ongelmallisuus eri rakennusosissa.

Eristyskyvyn lisäämisen ongelmallisuus		
Onnistuu helpohkosti	Joitakin vaikeuksia	Enemmän vaikeuksia
<ul style="list-style-type: none"> • Kuorimuuriseinät • Eristerapatut seinät, etenkin ohuteristerappaukset • Peltisandwichit ja peltirankaelementit • Kevytsorakatot (myös EPS + kevytsora) • Puuristikkokatot • Ontelolaatta-alapohjat 	<ul style="list-style-type: none"> • Betonisandwich-seinät • Puurankaseinät • Mineraalivilla- ja EPS-eristetyt umpikatot • Puukorotetut katot • Kevytbetonikatot • Maanvastaiset alapohjat 	<ul style="list-style-type: none"> • Kevytbetoniseinät ja -alapohjat • Hirsiseinät • Harkkoseinät • Puurakenteiset vasakatot • Puurakenteiset ryömintätilaiset alapohjat

Tähän asti kehitystyötä on tehty edeten pienin askelin, jolloin kehityksen tuomat epäkohdat ovat olleet suhteellisen vähäisiä. Nyt kaavailtujen suurten muutosten seurauksena lukuisat toimijat eri tahoilla joutuvat tekemään kerralla suuria muutoksia, minkä johdosta monet rakentamisen onnistumisen kannalta välttämättömät ”rutiinit” katoavat. Tämän seurauksena syntyy todennäköisesti suuri joukko joko kokonaan uusia rakenneratkaisuja tai eriasteisia modifikaatioita, joista melko suuri osa on otaksuttavasti eri tavoin epäkelpoja.

Nykyiset rakenne- ja liitosratkaisut toteutustapoineen ovat kehittyneet vuosien saatossa toimiviksi. Nyt tehtäväksi tulevien suurten muutosten osalta on tärkeää miettiä myös sitä, mitkä tahot tulevat tätä kehitystyötä tekemään. Tuoteteollisuus kehittänee ratkaisuja totuttuun tapaan omien tuotteidensa kilpailukyvyyn näkökulmasta. Rakenneratkaisujen ja -kokonaisuuksien osalta kehitystyön tekemiselle ei ole mitään valmista organisaatiota, vaan työ maastoutuu hajalleen kenttään, jossa osaaminen on tässä suhteessa monenkirjavaa. Erityinen ongelma tulee esiintymään modifioitujen rakenteiden liitoskohtien kehittämisessä. Näitä liitosyksityiskohtia on lukemattomia ja niiden kehittämien tapahtuu osittain vasta epäonnistumisten myötä.



3. VAIPAN ILMANPITÄVYYS

3.1 Yleistä

Vaipan ilmanpitävyyden parantaminen on tekijä, jolla on lähes pelkästään positiivisia vaikutuksia rakennuksen ja rakenteiden toimintaan:

- 1) rakennuksen energiankulutus vähenee ilmanvaihdon tapahtuessa lämmöntalteenotto-laitteiston kautta
- 2) kosteuden virtaus vaipparakenteisiin vähenee
- 3) erilaisten epäpuhtauksien, homeiden ja radonin virtaus sisäilmaan vähenee
- 4) vaipparakenteiden sisäpinnat eivät jäähdy ulkoa tulevien ilmavirtausten seurauksena
- 5) asukkaiden kokema vedon tunne vähenee
- 6) ilmanvaihdon säätäminen ja tavoiteltujen painesuhteiden ylläpitäminen helpottuu

Vaikka rakennuksen ilmanpitävyys olisi hyvä, voivat yksittäiset pienetkin vuotokohdat silti aiheuttaa ongelmia. Vaipan hyvä ilmanpitävyys voi johtaa esim. suuriin rakennuksen paine-eroihin, jos rakennuksen ilmanvaihto on säädetty väärin. Sisäpuolella olevan ylipaineen kasvaessa rakenteisiin voi kulkeutua vaipassa olevan reiän kautta paikallisesti suurempia määriä kosteutta ilmavirtauksen mukana, jolloin kosteusvaurioriski lisääntyy. Alipaine voi puolestaan edesauttaa radonin ja mikrobien pääsyä sisäilmaan.

Tässä tutkimusosiossa asiantuntijaryhmä pohti ilmanpitävyyden parantumiseen liittyviä mahdollisia haittavaikutuksia, niiden ehkäisemistä ja kannustavia keinoja rakennusten ilmanpitävyyden parantamiseksi määräys- ja ohjetasolla.

3.2 Tulokset ja johtopäätökset

Ilmanpitävässä talossa on erityisen tärkeää kiinnittää huomiota ilmanvaihdon toimintaan ja tasapainotukseen. Kalamees et al. (2007) raportoi laskentatuloksista, jotka osoittivat, että ilmavirtojen epätasapaino tiiviissä pientalossa ($n_{50} = 0,15$ 1/h) voi johtaa ajoittain todella suuriin paine-eroihin (taulukko 3.1). Taulukossa 3.1 annettu luku 10 % kuvaa tilannetta, jossa lämpötilaerosta johtuva paine-ero vaipan yli on vuoden aikana esiintyvissä olosuhteissa ainoastaan 10 %:ssa tapauksista suurempi kuin valittu taso. Vastaavasti 90 % kuvaa tilannetta, jossa lämpötilaerosta johtuva paine-ero on 90 %:ssa tapauksista suurempi kuin valittu taso.



Taulukko 3.1 Laskentatulokset rakennusten paine-eroista (yksikkö Pa). (Kalamees et al. 2007)

		Ilmanpitävyys					
		$n_{50} = 0.15$ l/h		$n_{50} = 3.93$ l/h		$n_{50} = 10$ l/h	
		10%	90%	10%	90%	10%	90%
Ympäristö	Taajama	-7	+4	-6	+4	-6	+4
	Tasankoalue	-11	+8	-10	+8	-8	+7
	Tuuleton	-6	+4	-5	+4	-5	
Ilmavuotojen sijainti	Enemmän vuotoja katon rajalla (75/12.5/12.5%)	-10	+2	-9	+2	-8	+2
	Mitattu jakauma	-7	+4	-6	+4	-6	+4
	Enemmän vuotoja lattian (12.5/12.5/75%)	-4	+8	-3	+8	-3	+8
Ilmanvaihto-järjestelmän tasapainoisuus	15 % vähemmän tuloilma	-33	-22	-7	+4	-6	+4
	Tasapainoinen järjestelmä	-7	+4	-6	+4	-6	+4
	15 % enemmän tuloilma	+15	+26	-6	+5	-5	+4

Ylipainetta on tyypillisesti ulkoseinien yläosassa ja yläpohjassa ja alipainetta vastaavasti ulkoseinien alaosassa ja alapohjassa. Jos rakennuksessa on suuri ylipaine, voi sisäilmasta siirtyä pienenkin reiän läpi vaipparakenteeseen merkittäviä määriä kosteutta aiheuttaen paikallisen kosteusvaurioriskin. Alipaine voi puolestaan aiheuttaa esim. vetoa ja radonin ja mikrobin kulkeutumisen sisäilmaan. Kosteusongelmat ovat mahdollisia myös alipaineen vaikutuksesta, koska ulkoa tuleva viileä ilma jäädyttää vaipparakenteen sisäosaa ja sisäpintaa. Tällöin sisäilman kosteus voi aiheuttaa rakenteen sisäosissa homeen kasvulle suotuisia olosuhteita.

Ilmanpitävässä talossa tulee pyrkiä varmistamaan, että ilmanvaihto toimii ja on riittävä kaikissa tilanteissa, koska vaipan läpi ei ole enää merkittäviä korvausilmareittejä, jotka kompensoisivat ilmanvaihdon puutteita. Asukkailla tulisi olla riittävä tieto ja kiinnostus ilmanvaihtojärjestelmän toimintaan ja sen huoltoon. Nykyään monet asukkaat eivät esimerkiksi muista vaihtaa tai puhdistaa ilmanvaihdon suodattimia riittävän usein. Ilmanvaihdon toiminta olisi tärkeää varmistaa myös esim. pitkien sähkökatkojen aikana. Jos ilmanvaihto on jostain syystä kytkeytynyt pois päältä, tulisi asukkaille välittyä siitä viesti esim. näyttötaulun, merkkiäänä tai –valon avulla. Edellä mainitut asiat tulisi lisätä nykyiseen RakMK D2 (2003):ssa annettuihin ohjeisiin.

Koska ilmanvaihtolaitteiston toiminta ja sen seuranta ovat riippuvaisia sähköstä, on ilmanvaihdon toiminta varmistettava myös sähkökatkojen aikana. Tämä edellyttää, että asuintaloissa on avattavat ikkunat/ tuuletusluukut, joista saadaan rakennukseen tarvittaessa korvausilmaa.

Vaipan ilmanpitävyydestä annettavien ohjeiden tulee olla sellaisia, että ne kannustavat talotoimittajia vaipan toteutusratkaisujen kehittämiseen ja parantamiseen. Tämä on joustavampi ja parempi tapa kuin ehdottomien määräyksien antaminen. Määräysten kontrolloiminen on hankalaa ja ne lisäävät rakennusten mittaustarvetta voimakkaasti. Monissa tapauksissa jo se, että ilmanpitävyyden varmistamiseksi olisi tehty suunnitelma, parantaisi rakennuksen ilmanpitävyyttä.

Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan



Nykyisessä RakMK D3 (2007):ssa olevan ilmapuotoluvun vertailuarvon 4,0 1/h käyttö, jos tarkempia mittauksia ei tehdä, on hyvä toimintaperiaate. Nykyinen ilmapuotoluvun vertailuarvo ei kuitenkaan kannusta kaikissa tapauksissa riittävästi vaipan ilmanpitävyyden parantamiseen, koska se on jo suhteellisen alhainen arvo. Todellisuudessa esim. n. puolessa puurunkoisista pientaloista on tätä heikompi ilmapuotoluvun arvo (Vinha et al. 2005). Tätä voidaan korjata menettelyllä, jossa ilmapuotoluvulle annetaan kaksi vertailuarvoa esim. 6,0 1/h ja 4,0 1/h. Vertailuarvoa 6,0 1/h käytetään, jos rakennesuunnittelun yhteydessä ei ole tehty erillisiä suunnitelmia ja toteutusohjeita vaipan ilmanpitävyyden varmistamiseksi. Vertailuarvoa 4,0 1/h voidaan käyttää, jos suunnitelmat on tehty. Tätä paremman ilmapuotoluvun käyttö edellyttää joko erillistä mittausta tai laadunvalvontamenettelyyn siirtymistä nykyisen käytännön mukaisesti. Rakennusvalvonta arvioi onko riittävät suunnitelmat tehty, jotta ilmapuotolukuna voidaan käyttää alemmaa vertailuarvoa.

Monessa tapauksessa jo pelkkien rakennesuunnitelmien ja toteutusohjeiden tekeminen parantaa rakennuksen ilmanpitävyyttä merkittävästi, jolloin hatarien talojen määrä vähenee jakauman heikommasta päästä. Tämä menettelytapa ei lisää myöskään rakennusten ilmanpitävyyksmittauksia nykyisestä tasosta.

4. RAKENTEIDEN SISÄINEN KONVEKTIO

4.1 Yleistä

Rakenteiden sisäisellä konvektiolla tarkoitetaan ilman liikkumista avohuokoisen lämmöneristeen sisällä. Ilman mukana liikkuu samalla myös lämpöenergiaa ja kosteutta. Rakenteen sisäinen konvektio aiheutuu rakenteen pintojen (lämmöneristekerroksen sisä- ja ulkopinnan) välisistä lämpötilaeroista. Rakenteen sisäinen konvektio ja sitä kautta siitä aiheutuvat rakenteen lämpöhäviöt ovat voimakkaasti riippuvaisia pintojen välisestä lämpötilaerosta sekä lämmöneristeen paksuudesta ja ilmanläpäisevyydestä. Sisäisen konvektion merkitys rakenteen lämmöneristävyyttä heikentävänä tekijänä on sitä suurempi mitä paksumpi ja ilmaa läpäisevämpi lämmöneristekerros on.

Tässä tutkimuksessa selvitettiin rakenteiden sisäisen konvektion merkitystä lämpöhäviöihin erilaisilla lämmöneristepaksuuksilla ja lämmöneristeen ilmanläpäisevyyksillä. Tarkastelut tehtiin ulkoseinän ja yläpohjan osalle. Tutkimusmenetelminä olivat kirjallisuudesta saatavat tiedot sekä teoreettiset laskentatarkastelut.

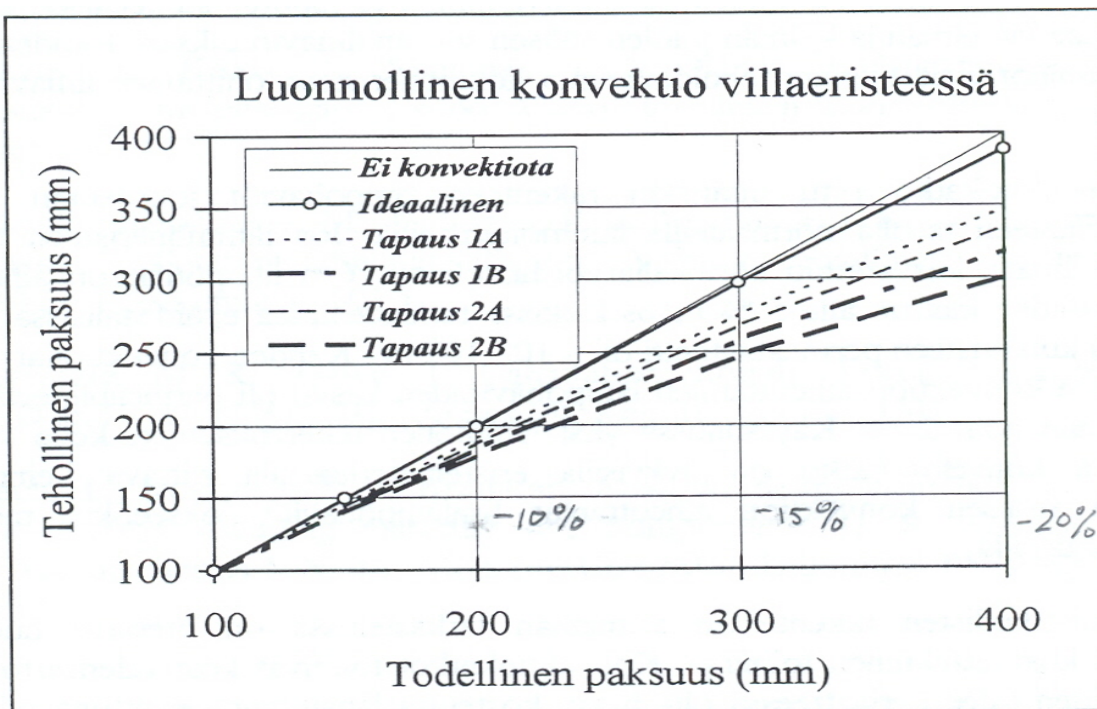
4.2 Kirjallisuusselvitys

Sisäisen konvektion vaikutusta voidaan arvioida erilaisten yksinkertaistettujen likiarvokaavojen avulla ideaalisessa tilanteessa ts. sellaisessa tapauksessa, jossa lämmöneriste on asennettu rakenteeseen täysin optimaalisesti (Hagentoft 2001). Käytännössä kaikki avohuokoisilla lämmöneristeillä eristetyt rakenteet ovat kuitenkin epäideaalisia, joten sisäisen



konvektion tarkempi laskennallinen arviointi edellyttää virtauslaskentaohjelmien käyttöä. Epäideaalisuudella ei tarkoiteta tässä yhteydessä rakennusvirheitä, vaan huokoisella lämmöneristeellä eristetyn rakenteen ominaisuutta. Epäideaalisuuksia aiheuttavat mm. rajapintojen epäideaaliset kontaktit (esimerkiksi mineraalivillan ja runkopuun välinen rajakohta tai mineraalivillalevyjen keskinäiset kontaktipinnat). Epäideaalisuudet ovat kuitenkin paikallisesi satunnaisia, eikä niiden vaikutusta voida ennustaa yksittäisissä tapauksissa. Epäideaalisuudet edistävät rakenteen sisällä olevan ilman virtausta ja kasvattavat siten rakenteen lämpöhäviöitä ideaaliseen tilanteeseen verrattuna. (Kokko et al. 1997)

Kuvassa 4.1 on esitetty lasivillaeristyksen tehollista paksuutta todellisen eristepaksuuden funktiona sisäisen konvektion kasvattaessa lämpöhäviöitä. Tarkastelu on tehty laskennallisesti VTT:n ohjelmalla TCCC2D. Tarkasteltava rakenne oli 2,5 m korkea ulkoseinä, jossa oli ulkopuolisilta ilmavirtauksilta suojattu lasivillaeristys. Lämpötilat rakenteen eri puolten ilmatiloissa olivat +20 °C ja -20 °C. Kuvassa 4.1 on esitetty täysin konvektiottoman, ideaalisen ja neljän eri epäideaalisen tapauksen laskennalliset tulokset (Kokko et al. 1997). Kuvassa olevat prosenttiluvut esittävät arvioita siitä, kuinka monta prosenttia tehollinen eristepaksuus on pienempi kuin todellinen eristepaksuus tapauksessa 1B.



Kuva 4.1 Sisäisen konvektion vaikutus 2,5 m korkean lämmöneristerakenteen teholliseen paksuuteen todellisen paksuuden funktiona eri epäideaalitapauksissa. Käsitellyt tapaukset: 1: eristyskerros yhtenäinen, kontakti ympäröiviin pintoihin on lievästi epäideaalinen, 2: eristys on tehty 100 mm kerroksista, joiden välissä on epäideaalinen kontakti, A: lievästi epäideaalinen, B: enemmän epäideaalinen. (Kokko et al. 1997)



4.3 Laskennalliset tarkastelut

Sisäisen konvektion vaikutus otetaan nykyisin U-arvolaskelmissa eri tavoin huomioon riippuen siitä, mitä lämmönjohtavuusarvoja laskennassa käytetään. Laskettaessa RakMK C4 (2003) ohjeilla, λ_n -arvoissa on otettu lämmöneristyksen sisäisten ja sen kautta kiertävien vähäisten ilmapvirtausten vaikutus huomioon. Laskettaessa rakenteen U-arvoa eurooppalaisilla λ_{desing} -arvoilla lämmöneristeen ilmanläpäisevyyttä ei oteta huomioon lämmönjohtavuusarvoissa, vaan se otetaan huomioon RIL 225 (2004) ohjeen mukaan U-arvon lisäys-terminä.

Ns. ideaalisessa tapauksessa sisäisen konvektion suuruutta voidaan tarkastella käsinlaskentamenetelmällä. Laskentatulokset on riippuvainen Nusseltin luvusta N_u sekä modifioidusta Rayleighin luvusta Ra_m . Nusseltin luku N_u on riippuvainen mm. eristeen korkeuden ja paksuuden keskinäisestä suhteesta. Rayleighin luku Ra_m lasketaan kaavalla, jossa tekijöitä ovat mm. lämmöneristeen paksuus ja lämmöneristeen permiaabiliteetti ilmalle. Nusseltin luvun N_u ja modifioidun Rayleighin luvun Ra_m määrittäminen on esitetty tarkemmin esimerkiksi lähteessä (Hagentoft 2001).

Eri U-arvon laskentatapojen välisten erojen selvittämiseksi tehtiin laskennallisia tarkasteluja ideaalisessa tapauksessa eri lämmöneristepaksuuksilla. Seuraavassa on esitetty laskelmien oleelliset lähtötiedot:

Tarkasteltavan seinärakenteen korkeus:	3,0 m
Seinän lämmöneristeen paksuus:	100...400 mm
Yläpohjan lämmöneristeen paksuus:	400...1000 mm
Sisäpinnan lämpötila:	+20 °C
Ulkopinnan lämpötila:	-20 °C
Seinäeristeen ilmanläpäisevyys:	$150 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{msPa}$ (esim. levyvilla)
Yläpohjaeristeen ilmanläpäisevyys:	$600 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{msPa}$ (esim. puhallusvilla)
Lämmöneristeen lämmönjohtavuus:	0,037 W/mK
Yläpohjassa avoin yläpinta (ei tuulensuojaa)	

RakMK C4 (2003) sekä RIL 225 (2004) ohjeilla laskettaessa käytettiin em. lisäksi seuraavia lähtötietoja (mm. lisäystermit on laskettu ja määritetty lämmöneristeen ilmanläpäisevyyden lisäksi korjaustavan ja lämmöneristeen suojaustavan mukaan):

Seinäälaskelmat:

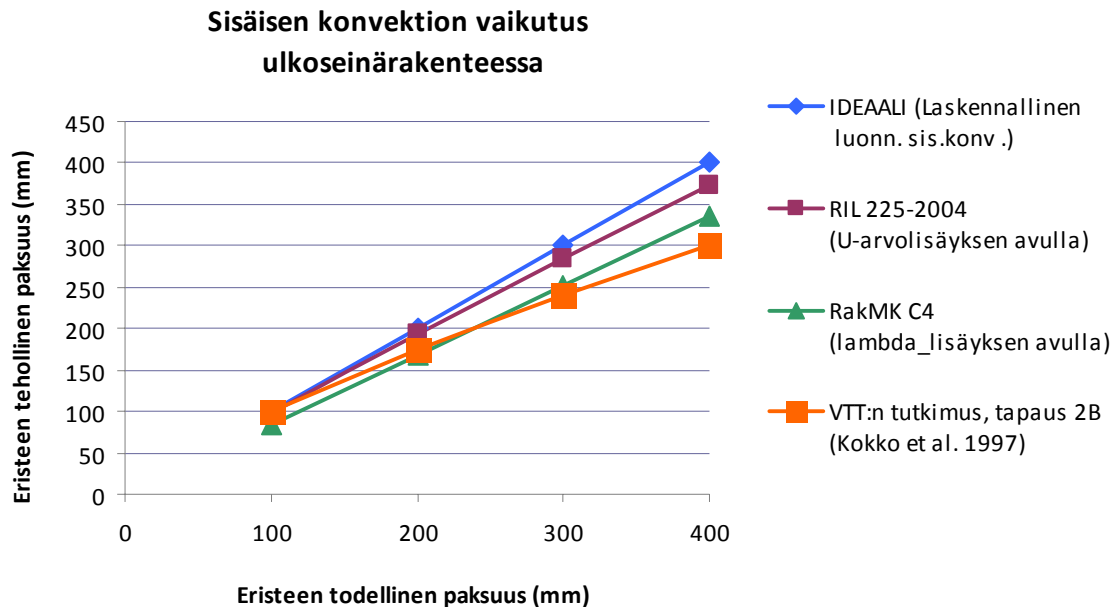
$\Delta\lambda_p$ peruslisäys:	0,004 W/mK (käytettäessä λ_n -arvoja)
$\Delta\lambda_{ka}$ ilmanläpäisevyydenlisäys:	0,003 W/mK (käytettäessä λ_n -arvoja)
U-arvon lisäystermit:	0,007 W/m ² K (käytettäessä λ_{desing} -arvoja)

Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan

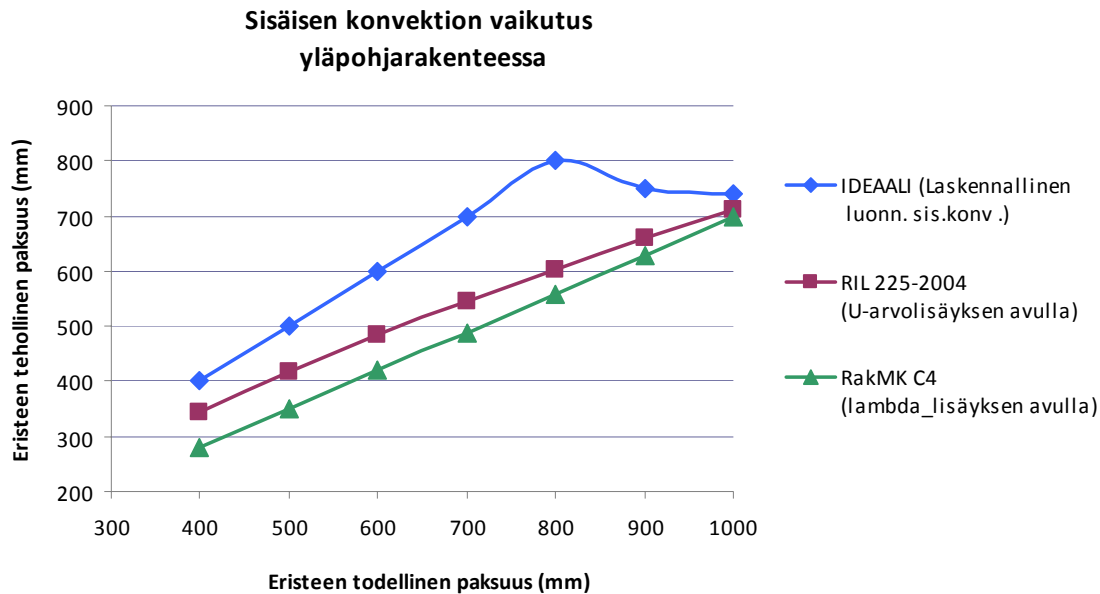
Yläpohjalaskelmat:

$\Delta\lambda_p$ peruslisäys:	0,004 W/mK (käytettäessä λ_n -arvoja)
$\Delta\lambda_{ka}$ ilmanläpäisevyyshäviö:	0,012 W/mK (käytettäessä λ_n -arvoja)
U-arvon lisäystermit:	0,015 W/m ² K (käytettäessä λ_{desing} -arvoja)

Kuvassa 4.2 on esitetty laskennallisia tuloksia lämmöneristeen tehollisesta paksuudesta eristeen todellisen paksuuden funktiona. Kuvassa 4.3 on esitetty sisäisestä konvektiosta aiheutuva lämmöneristeen prosentuaalinen heikkeneminen yläpohjarakenteessa ideaalisessa laskentatilanteessa. Lisäksi kuvissa 4.2 ja 4.3 on esitetty, miten nykyisen RakMK C4 (2003):n sekä RIL 225 (2004):n ohjeilla laskettaessa sisäisestä konvektiosta aiheutuva U-arvon heikennys otetaan huomioon. Vertailuksi kuvaan 4.2 on otettu mukaan myös kuvasta 4.1 tapauksen 2B käyrä.



Kuva 4.2 Sisäisen konvektion vaikutus lämmöneristeen teholliseen paksuuteen laskennallisesti 3 m korkuisessa ulkoseinärakenteessa, kun lämmöneristeen ilmanläpäisevyys on $150 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{msPa}$ ja lämmönjohtavuus $0,037 \text{ W/mK}$. Ulko- ja sisäilman lämpötilaero on $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Tapaukset on esitetty ideaalisessa tilanteessa, RIL 225 (2004):n ja RakMK C4 (2003):n ohjeiden mukaan lasketuissa tilanteissa sekä Kokko et al. (1997) esittämien laskentatulosten perusteella.



Kuva 4.3 Sisäisen konvektion vaikutus lämmöneristeen teholliseen paksuuteen laskennallisesti yläpohjarakenteessa, kun lämmöneristeen ilmanläpäisevyys on $600 \times 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{msPa})$ ja lämmönjohtavuus $0,037 \text{ W/mK}$. Lämmöneristeen yläpinnassa ei ole tuulensuojalevyä. Ulko- ja sisäilman lämpötilaero on $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Tapaukset on esitetty ideaalisessa tilanteessa sekä RIL 225 (2004):n ja RakMK C4 (2003):n ohjeiden mukaan lasketuissa tilanteissa.

Kuvasta 4.2 nähdään, että RIL 225 (2004) avulla laskettu U-arvon lisäystermi ei ota sisäisen konvektion vaikutusta yhtä paljon huomioon kuin λ_n -arvoihin sisältyvä varmuus. Kummallakin tavalla voidaan kuitenkin ottaa huomioon ideallisesti asennetussa lämmöneristekerroksessa tapahtuvan sisäisen konvektion vaikutus. Sen sijaan siinä tapauksessa, että lämmöneristekerroksen kontakti ympäröiviin pintoihin on epäideaalinen (käytännössä esiintyvä tilanne) ja lämmöneristekerros on paksu, sisäinen konvektio voi heikentää lämmöneristeen tehollista paksutta niin paljon, että sekä RIL 225 (2004) mukaan laskettu U-arvon lisäystermi että λ_n -arvoissa oleva lisävarmuus eivät ota sitä enää riittävästi huomioon. Kuvan 4.2 laskentaesimerkissä RIL 225 (2004) mukainen laskentamenetelmä on epävarmalla puolella jo silloin, kun seinän lämmöneristepaksuus ylittää 100 mm ja λ_n -arvot silloin, kun seinän paksuus ylittää 250 mm. Tästä syystä sekä RIL 225 (2004):ssa esitettyä laskentamenettelyä että λ_n -arvojen määrittämissä periaatteita tulee korjata vastaamaan tulevia lämmöneristyspaksuuksia ulkoseinärakenteiden osalta.

Yläpohjarakenteissa nykyiset laskentamenetelmät ottavat sisäisen konvektion vaikutuksen huomioon ideallisesti asennetussa lämmöneristekerroksessa silloin, kun lämmöneristeen paksuus on enintään 1000 mm (kuva 4.3). Tässäkin tapauksessa sisäisen konvektion lämmöneristyskykyä heikentävä vaikutus on kuitenkin suurempi, koska myöskään yläpohjassa lämmöneristykset eivät ole ideallisesti asennettuja. Tosin puhalluseristeitä käyttämällä asennuksesta tulee yleensä parempi kuin levyeristeitä käyttämällä. Toisaalta epäideaalisella lämmöneristeen asennuksella ei ole yläpohjarakenteissa niin suurta vaikutusta kuin seinä-



rakenteissa, koska yläpohjassa sisäinen konvektio tapahtuu eristekerroksen läpi. Ulkoseinä-rakenteissa konvektiovirtaukset tapahtuvat sen sijaan eristeen ulko- ja sisäpintoja pitkin. Kuvan 4.3 perusteella voidaan arvioida, että nyt suunnitellut U-arvojen kiristykset eivät vaadi yläpohjarakenteissa vielä sisäisen konvektion tarkempaa huomioinnin ottamista. Toisaalta kuvasta nähdään myös se, että tietyn rajan jälkeen eristekerroksen kasvattamisesta ei ole enää hyötyä yläpohjarakenteessa, koska sisäinen konvektio poistaa lisäeristämällä saavutettavan hyödyn kokonaan.

On huomattava, että sisäisen konvektion syntymiseen vaikuttaa lämmöneristekerroksen paksuuden ja lämmöneristeen ilmanläpäisevyyden lisäksi oleellisesti myös seinän yli vallitseva lämpötilaero ja lämmöneristeen lämmönjohtavuus. Mitä suurempi lämpötilaero on ja mitä pienempi on lämmöneristeen lämmönjohtavuus sitä ohuemmissa rakenteissa sisäinen konvektio alkaa heikentää rakenteen tehollista lämmöneristepaksuutta.

Ensiarvoisen tärkeää on, että avohuokoisen lämmöneristeen ilmanläpäisevyyden vaikutus ylipäättään otetaan jatkossa huomioon U-arvon laskennassa ellei sisäistä konvektiota ole estetty lämmöneristekerroksessa rakenteellisilla ratkaisulla. Tämä on tärkeää nimenomaan silloin, kun U-arvon laskennassa käytetään eurooppalaisia λ_{design} -arvoja.

4.4 Johtopäätökset

Idealisesti lämpöeristetyssä ulkoseinä-rakenteessa sisäisen konvektion vaikutus lämpöhäviöiden kasvuun on hyvin vähäinen. Käytännössä kaikki huokoiset lämmöneristerakenteet ovat kuitenkin epäideaalisia, jolloin sisäisen konvektion eristyskykyä heikentävä vaikutus on niissä suurempi. Epäideaalisuudet edistävät ilman virtausta lämmöneristeen reunoilla ja siten kasvattavat lämpöhäviöitä selvästi ideaaliseen tilanteeseen verrattuna varsinkin ulkoseinä-rakenteissa. Ulkoseinissä sisäisen konvektion U-arvoa heikentävä vaikutus voi olla 200 mm paksuisessa eristekerroksessa yli 10 %, 300 mm paksuisessa eristekerroksessa yli 15 % ja 400 mm paksuisessa eristekerroksessa yli 20 % (ks. kuva 4.1).

Yläpohjarakenteissa epäideaalisuuksien vaikutukset ovat vähäisemmät. Idealisessa tapauksessa sisäinen konvektio alkaa kasvaa voimakkaasti lämmöneristeen paksuuden ylittäessä n. 800 mm.

Eurooppalaisilla λ_{design} -arvoilla tehtävässä U-arvolaskelmassa sisäistä konvektiota ei oteta huomioon lainkaan. Tästä syystä RIL 225 (2004):ssä on esitetty erillinen menettely tätä varten, mutta menettelyä ei käytännössä kuitenkaan aina käytetä. Käytännön tilanteissa tämä on aiheuttanut epäselvyyksiä U-arvojen laskennan osalta.

RakMK C4 (2003):ssä sisäinen konvektio otetaan huomioon normaalin lämmönjohtavuuden λ_n -arvoissa. Näillä arvoilla lasketuissa rakenteiden U-arvoissa on sisäisen konvektion



suhteen varmuutta enemmän kuin RIL 225 (2004) mukaisella menetelmällä lasketuissa U-arvoissa.

Nyt suunnitellut U-arvojen kiristyksen edellyttävät sisäisen konvektion tarkempaa huomioinnista ulkoseinärakenteissa, mutta yläpohjarakenteiden osalta nykyisissä laskentamenetelmissä on riittävä varmuus.

Pystyrakenteissa (seinissä) pystysuorat lämmöneristeiden sisällä olevat konvektiokatkot vaimentavat tehokkaasti sisäisen konvektion vaikutuksia rakenteen lämpöhäviöihin. Pystysuora, suhteellisen ilmatiivis kerros estää lämpimän ja kylmän puolen välisen suoran ilmavirtauksen. Sisäisen konvektion eliminoiminen on tärkeää myös kosteusteknisesti tarkasteltuna. Konvektiokatko estää kosteuden siirtymisen lämmöneristeen sisäisen konvektion vaikutuksesta suoraan sisäpuolen kerroksista rakenteen kylmiin osiin mahdollisia paikallisia ilmapuotokohtia pitkin (Kokko et al. 1997). Konvektiokatkon tulee olla erittäin hyvin vesihöyryä läpäisevä, jotta rakenteeseen ei tiivisty kosteutta konvektiokatkon sisäpintaan.

5. IKKUNAT

5.1 Yleistä

Hyvin lämpöeristettyjen ikkunoiden ulkopintoihin tiivistyy ulkoilman kosteutta selvästi useammin, koska sisältä tuleva lämpö lämmittää ikkunan ulkopintaa vähemmän. Tällöin ikkunan ulkopinta on lähempänä ulkoilman lämpötilaa. Ulkopinnan lämpötila voi laskea myös ulkolämpötilan alapuolelle esimerkiksi kirkkaina öinä, jolloin ikkunan ulkopinta säteilee ympäristöönsä ja taivaalle lämpöä. Myös sopivasta suunnasta puhaltava tuuli voi alentaa ulkopinnan lämpötilaa. Kosteuden kondensoituminen ikkunan ulkopintaan alkaa, kun ikkunan ulkopinnan lämpötila alittaa ulkoilman kastepistelämpötilan.

Ikkunan lämmönläpäisykerroin eli U-arvo muodostuu lasiosan lämmönläpäisykertoimesta, valoaukon reunan viivamaisesta lisäkonduktanssista sekä karmi- ja puiteosan lämmönläpäisykertoimista. Hyvin lämpöeristetyn ikkunan ulkopinnan kondensoitumisen kannalta oleellisin tekijä on lasiosan lämmönläpäisykerroin.

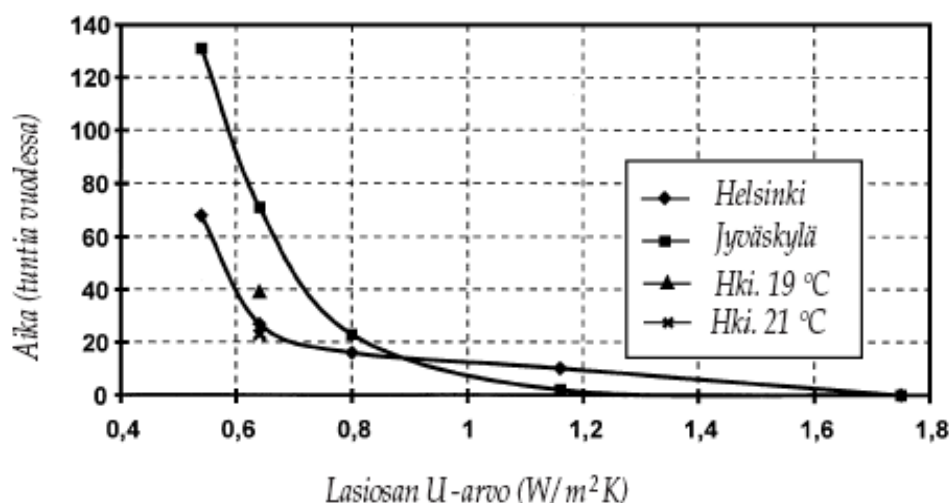
Suurin ulkoilman kosteuden tiivistymisriski lasin ulkopintaan on syksyisin, jolloin ulkoilman kosteus on suuri ja ikkunan lämpöhäviö ulko- ja sisäilman pienen lämpötilaeron vuoksi on pieni. Toinen tekijä, mikä aiheuttaa kondenssia ikkunoiden ulkopintoihin on ulkoilman lämpötilan nopea nousu kylmän ja kostean yön jälkeen. Tässä tilanteessa ikkunan lämpötila seuraa viiveellä ilman lämpötilaa ikkunan lämpökapasiteetin vuoksi.

Tässä tutkimuksessa hyvin lämpöeristettyjen ikkunoiden kondenssiherkkyyttä arvioitiin kirjallisuusselvityksen avulla sekä TTY:llä tehtyjen tutkimusten perusteella.



5.2 Kirjallisuusselvitys

Kirjallisuuden perusteella kondenssin esiintymisaika nousee jyrkästi, kun lasiosan lämmönläpäisykerroin pienenee tasolle 0,6–0,7 W/m²K. Kuvassa 5.1 on esitetty ikkunan ulkopinnan kondenssin esiintymisaika Helsingissä ja Jyväskylässä vuoden 1979 sää tietojen perusteella laskettuna. Tutkimuksessa arvioitiin, että kuvan 5.1 käyrän muoto on todennäköisesti varsin oikea, mutta kondenssin esiintymisaikoihin vaikuttavat merkittävästi laskelmissa vakioiksi oletetut ympäristötekijät, minkä vuoksi ajat ovat suuntaa antavia. (Hemmilä & Heinonen 1997)



Kuva 5.1 Ulkopuolisen kondenssin laskettu esiintymisaika tarkasteluvuonna 1979 Helsingissä ja Jyväskylässä. Huonelämpötilana tarkastelussa oli 20 °C, ja sen vaikutus käyrän tasoon on tarkasteltu Helsingin sää tiedoilla käyttämällä huonelämpötiloina 19 °C ja 21 °C. Käyrät ovat likimääräistyksistä johtuen suuntaa antavia. (Hemmilä & Heinonen 1997)

Kosteuden kondensoitumisherkkyteen ikkunan pinnassa voidaan vaikuttaa ikkunan ulkopinnan ominaisuuksia muuttamalla. Jos ikkunan ulkopinta muutetaan matalaemissiviteettipinnaksi, ikkunasta ei lähde lämpösäteilyä yhtä voimakkaasti ulospäin, jolloin ulkopinta pysyy lämpimämpänä ja kosteuden kondensoituminen ulkopintaan vähenee (kuva 5.2) (Werner 2007).

Kosteuden kondensoitumisen lisäksi hyvin lämpöeristetyissä ikkunoissa on todettu myös toinen selvästi havaittu ongelma. Hyvin lämpöeristetyissä ikkunoissa lasien rikkoutumisriski lisääntyy merkittävästi erityisesti sälekaihtimilla ja rullaverhoilla varustetuissa ikkunoissa, koska auringon aiheuttama lämpeneminen ja hyvin eristävien ikkunoiden eristyslasiin taivannomaista suurempi lasiväli aiheuttavat eristyslasiin suuremmat sisäiset paineen vaihtelut (Hemmilä 2008).



Kuva 5.2 Erilaisilla ulkolasin pinnoilla varustettuja ikkunoita kondensoitumiskokeessa. Vasemmalla itsepuhdistuva ulkolasi, keskellä matalaemissiviteettipintainen ulkolasi ja oikealla tavallinen ulkolasi. (Werner 2007)

5.3 Ikkunakokeet

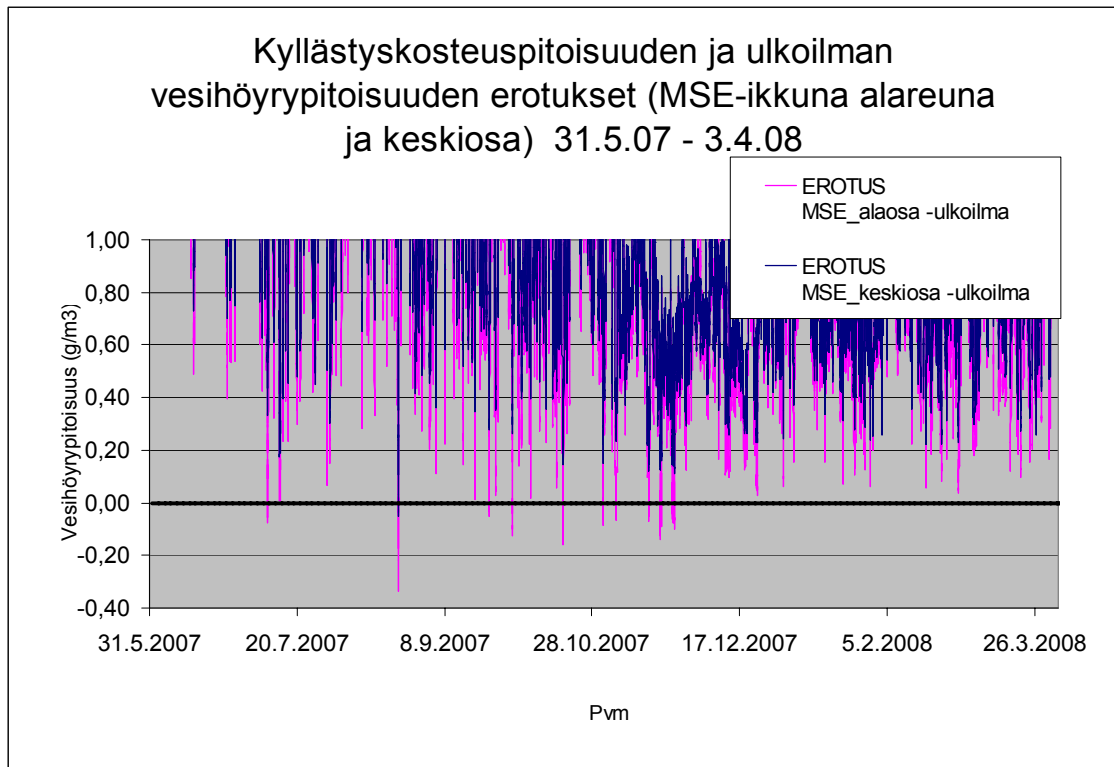
Tampereen teknillisen yliopiston toimesta tutkittiin kenttätutkimuksella Tampereella sijaitsevassa kerrostalohuoneistossa noin yhden vuoden ajan (5/2007–4/2008) MSE-ikkunan ja MS2E-ikkunan toimivuutta mm. kondenssin kannalta. Lähtökohtana tutkimukselle oli mm. se, että asukkailta oli tullut useita valituksia aiemmin MS2E-ikkunan kondenssi ongelmista.

Tutkittavat ikkunat olivat huoneistossa samaan ilmansuuntaan (pohjoiseen). MSE-ikkunan lasiosan U-arvo oli noin $1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ (koko ikkunan $1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$) ja MS2E-ikkunan lasiosan U-arvo oli noin $0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ (koko ikkunan noin $0,9 \text{ W/m}^2\text{K}$). Ikkunat toimivat tutkimuksen aikana tuloilmaikkunoina muuten paitsi 28.11.07 – 13.3.08 välisen ajan, jolloin korvausilma ei tullut ikkunalasien välistä, vaan ikkunan yläreunassa olleen venttiiliin kautta. (Vinha & Lähdesmäki 2008)

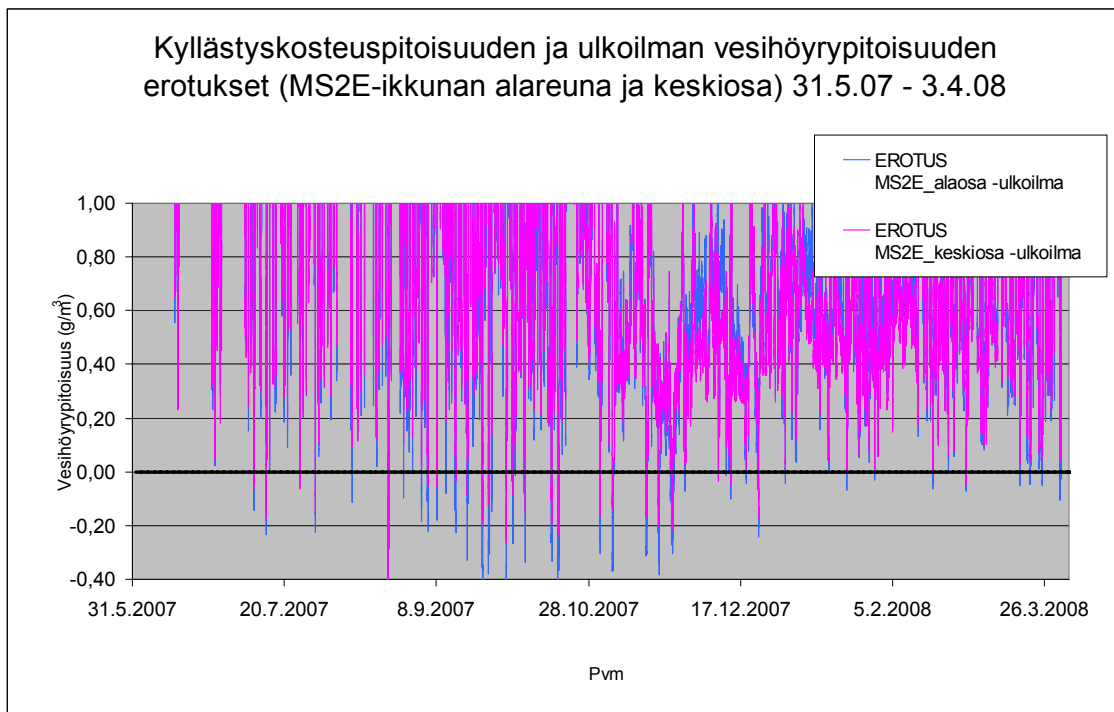
Kuvassa 5.2 on esitetty MSE-ikkunan ulkopinnan kyllästyskosteuspitoisuuden ja ulkoilman vesihöyrypitoisuuden erotukset ikkunan keskiosassa ja alareunassa laskettuna koko tutkimuksen ajalta. Erotuksen mennessä nollan alapuolelle, tapahtuu laskennallisesti kosteuden tiivistymistä ikkunan ulkopintaan. Kuvassa 5.3 on esitetty samat tulokset MS2E-ikkunan osalta. Taulukossa 5.1 on esitetty mittausdatasta laskettuna sekä MSE-ikkunan että MS2E-ikkunan ulkopinnoissa kondenssin yhteenlasketut esiintymisajat koko tutkimuksen aikana. (Vinha & Lähdesmäki 2008).

Tutkimuksen perusteella MS2E-ikkunassa havaittiin laskennallisesti ulkopinnan kondenssijaksoja huomattavasti enemmän kuin heikommin lämpöeristetyssä MSE-ikkunassa. Tuloilmaikkunoina molempien ikkunoiden ulkopinnan kondenssiriski lisääntyi selvästi.

Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan



Kuva 5.3 MSE-ikkunan ulkopinnan keskiosan ja alareunan kyllästyskosteuden ja ulkoilman vesihöyrypitoisuuden erotukset koko tutkimuksen aikana. (Vinha & Lähdesmäki 2008)



Kuva 5.4 MS2E-ikkunan ulkopinnan keskiosan ja alareunan kyllästyskosteuden ja ulkoilman vesihöyrypitoisuuden erotukset koko tutkimuksen aikana. (Vinha & Lähdesmäki 2008)

Tutkimuslousuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan



Taulukko 5.1 Ulkolasin ulkopinnan kondensoitumisaika MSE- ja MS2E-ikkunoiden ulkopintojen ala- ja keskiosissa koko tutkimuksen aikana. (Vinha & Lähdesmäki 2008)

	MSE-ikkunan keskiosa	MSE-ikkunan alaosa	MS2E-ikkunan keskiosa	MS2E-ikkunan alaosa
Laskennallinen kondenssaika ikkunan ulkopinnassa	0,5 h	67 h	128 h	198 h

5.4 Johtopäätökset

Ikkunan kondensoitumisherkyys kasvaa oleellisesti, jos ikkunan lasiosan U-arvo pienenee alle 0,6–0,7 W/m²K. Kosteuden kondensoituminen ikkunan ulkopintaan on mahdollista, koska tietyissä sääoloissa ulkopinta voi olla jopa ulkoilmaa kylmempi. Ulkopintaan kondensoituva kosteus ei kuitenkaan tarkoita sitä, että ikkuna olisi viallinen tai toimisi virheellisesti. Ainoa todellinen haitta aiheutuu siitä, että ikkunasta ei näe läpi. Kondenssi ajoittuu kuitenkin pääosin yöaikaan ja aamuhämärään, minkä vuoksi haitta on käytännössä pienempi kuin mitä kondensoitumisajan lisääntymisestä voisi päätellä. Toisaalta kondenssia esiintyy myös pakkaskautena, jolloin se voi pysyä huurteena ikkunan ulkopinnalla epäedullisissa olosuhteissa jopa muutamia päiviä. Kosteuden kondensoitumista voidaan vähentää esim. muuttamalla ikkunan ulkopinta matalaemissiviteettipinnaksi, jolloin ikkunasta ulkoilmaan lähtevä lämpösäteily vähenee.

Hyvin lämpöeristetyissä ikkunoissa myös lasien rikkoutumisriskin on todettu lisääntyvän merkittävästi erityisesti sälekaihtimilla ja rullaverhoilla varustetuissa ikkunoissa. Tämä johtuu siitä, että auringon aiheuttama lämpeneminen ja hyvin eristävien ikkunoiden eristyslasien tavanomaista suurempi lasiväli aiheuttavat eristyslasiin suuremmat sisäiset paineen vaihtelut. (Hemmilä 2008)

Ikkunoiden osalta U-arvoja voidaan kiristää nykyisestä tasosta jonkin verran ilman merkittäviä lisäongelmia. Ikkunoiden U-arvot ovat itse asiassa jo nykyisin tyypillisesti pienempiä kuin määräysten nykytaso edellyttää. Kirjallisuuden perusteella ikkunan U-arvon pienentäminen alkaa olla valmistusteknisistä syistä haasteellista, jos U-arvo pyritään laskemaan alle 0,9–1,0 W/m²K (Hemmilä 2008). Näin ollen tätä U-arvotasoa voitaneen pitää järkevästi saavutettavana alarajana. Tämä U-arvotaso tarkoittaisi n. 29–36 % kiristystä nykyisiin U-arvoihin.

6. TUULETETTU YLÄPOHJA

6.1 Yleistä

Tuuletetun yläpohjan lisäeristäminen viilentää tuuletustilaa ja nostaa sen suhteellista kosteutta. Kirkkaina öinä katon lämpösäteily alentaa vesikatteen alapinnan lämpötilaa. Nämä

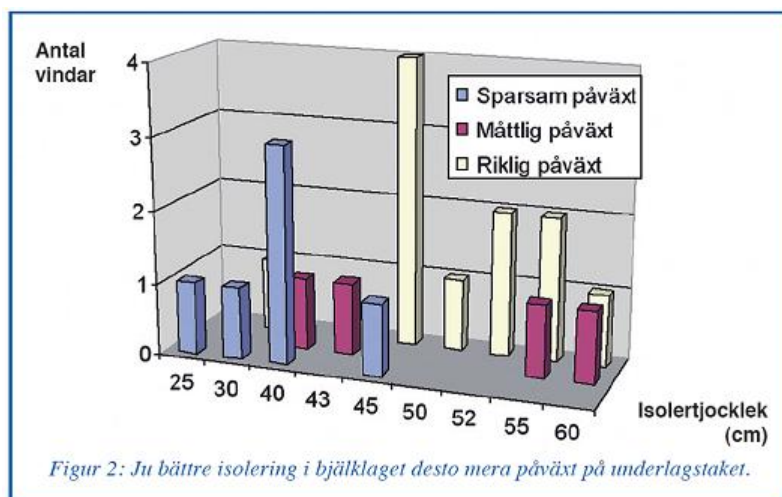


ilmiöt lisäävät homeen kasvun ja kosteuden kondensoitumisen riskiä tuuletustilassa. Myös ilmaston lämpeneminen muuttaa olosuhteita homeen kasvulle suotuisemmiksi, koska ulkoilman lämpötila ja suhteellinen kosteus ovat suuremman osan vuotta homeen kasvun kannalta suotuisalla alueella.

Tuulettujen yläpohjan olosuhteiden tutkimisessa on keskitytty kirjallisuusselvitykseen ja asiantuntijaryhmän keskusteluihin. Etenkin Etelä-Ruotsissa on havaittu ongelmia tuulettuvissa yläpohjissa. Useissa artikkeleissa lisääntyneiden ongelmien syyksi mainitaan kasvaneet lämmöneristyspaksuudet, se etteivät savupiiput lämmitä yläpohjaa niin paljon kuin ennen ja kosteustuoton kasvu. Tehty kirjallisuusselvitys perustui lähinnä Ruotsin tutkimuksiin. Tulevaisuudessa ilmaston lämpenemisen myötä olosuhteet Suomessa voivat olla hyvin samankaltaisia kuin eteläisessä Ruotsissa nyt.

6.2 Kirjallisuusselvitys

Ruotsissa tuulettuvista yläpohjista ja niissä esiintyvistä ongelmista on tehty erilaisia tutkimuksia ja kirjoitettu useita lehtiartikkeleita. Samuelson & Hägerhels (2006) ovat esittäneet 21:n vuonna 2001 tutkitun pientalon tuulettuvista yläpohjista otettujen näytteiden tuloksia. 8 taloista oli uusia (0–3 v. vanhoja) ja loput 13 olivat n. 10 v. vanhoja. Yläpohjista otetuista näytteistä arvioitiin homeen kasvu ja jaoteltiin ne yläpohjan eristepaksuuden mukaan (kuva 6.1). Runsasta itiöiden määrää ja sienirihmastoja esiintyi lähinnä kohteissa, joissa oli iso eristepaksuus.



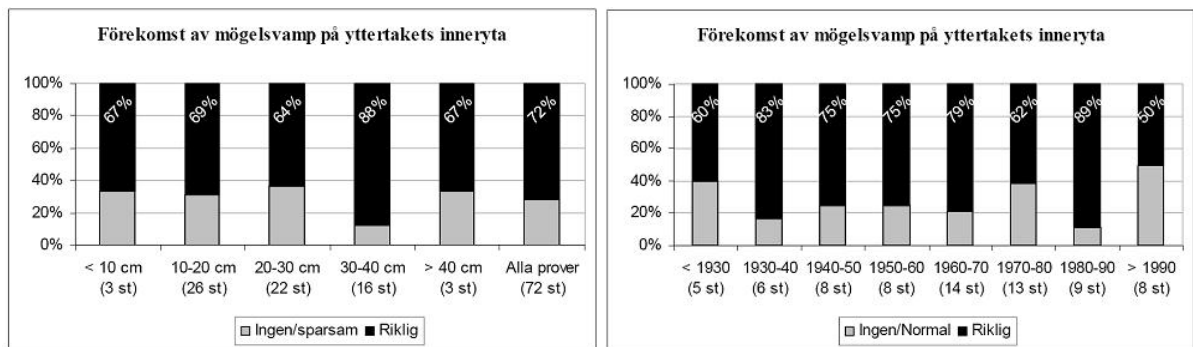
Kuva 6.1 Homeen kasvu tutkituissa rakennuksissa eristepaksuuksittain. (Samuelson & Hägerhels 2006)

Samuelson & Hägerhels (2006) pohtivat myös artikkelissaan eri tapoja parantaa tuulettuvan yläpohjan olosuhteita ja vähentää homeen kasvua. He jakoivat vaihtoehdot kolmeen osaan. Olosuhteita voitaisiin parantaa a) käyttämällä sellaisia materiaaleja ja pintakäsittelyjä, joissa homeet eivät kasvaisi, b) luomalla paremmat olosuhteet lämmittämällä tai kuivattamalla tuu-



letustilaa tai c) kehittämällä parempia rakenneratkaisuja, jotka lämmittäisivät tuuletustilaa tai päästäisivät vesihöyryä kattorakenteen läpi. Kirjoittajat totesivat kuitenkin toisenlaisten materiaalien tuovan mukanaan mahdollisesti muita ongelmia ja pintakäsittelyjen vaativan säännöllistä uusimista. Yläpohjan lämmittäminen ja kuivattaminen puolestaan kuluttaa ylimääräistä energiaa.

Chalmersissa tehdyssä diplomityössä (Ahrnens & Borglund 2007) lähetettiin kysely 200 omakotitaloon Länsi-Götanmaalla. 79 kohteista palautti kyselyn ja näytteen yläpohjan tuuletustilasta vesikaton sisäpinnasta. Kohteet olivat eri-ikäisiä ja ne oli rakennettu v. 1878–2003. 72 %:ssa kohteista havaittiin runsasta homekasvustoa vesikattorakenteen sisäpinnassa. Kohteissa, joissa eristettä oli 30–40 cm tai jotka oli rakennettu v. 1930–40 tai 1980–90 oli enemmän runsasta kasvustoa kuin muissa taloissa. Uusissa vuoden 1990 jälkeen rakennetuissa taloissa oli puolestaan vähemmän kasvustoa kuin muissa taloissa (kuva 6.2).



Kuva 6.2 Kenttätutkimuksen näytteiden homekasvusto yläpohjan eristepaksuuden (vasen) ja rakennuksen valmistumisvuoden (oikea) mukaan jaoteltuna. (Ahrnens & Borglund 2007)

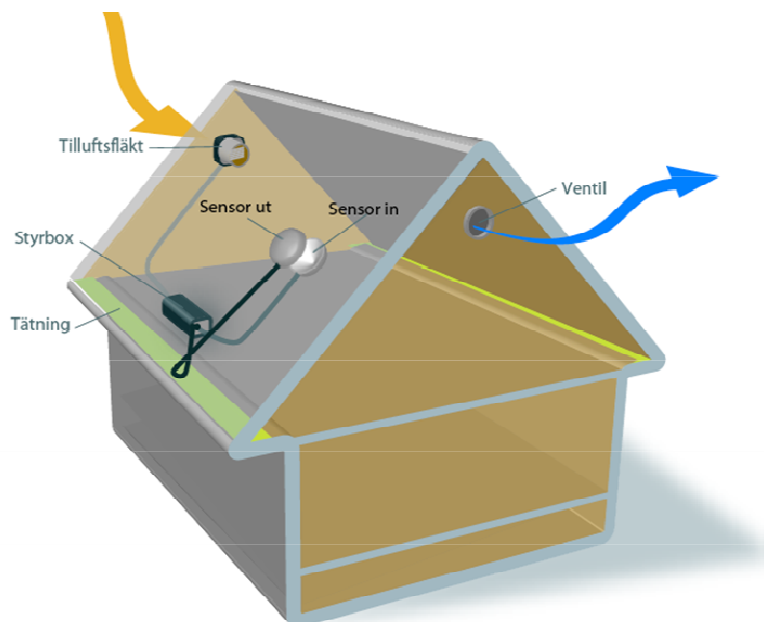
Samuelson (1996) raportoi toimistorakennuksen yläpohjassa tehdyistä kenttäkokeista, joissa tutkittiin olosuhteita eri tavalla tuuletetuissa osioissa. Rakennuksessa oli yläpohjassa 500 mm irtoeristettä. Yläpohjan höyrynsulun läpi ei ollut läpivientejä. Tuuletustilassa oli alipaine ulkoilmaan nähden, mutta ei kosteuslisää eikä rakennekosteutta. Tutkimus osoitti, että tehokas yläpohjan tuuletus ei aina ole hyvästä. Mitä vähemmän tuuletettiin, sitä kuivempaa mittauksissa oli. Koska yläpohja oli tiivis ja tuuletustilassa oli alipaine, tiivistyi ulkoilman kosteus kylminä öinä vesikattorakenteen alapintaan. Sasic Kalagasidis (2007) esittää, että n. 60 % tuulettuvien yläpohjien ongelmista johtuisikin kosteuden kondensoitumisesta kattorakenteen alapintaan ja 24 % rakenteen vesivuodoista.

Arfvidsson ja Harderup (2005) tekivät kokeita neljän kerrostalon yläpohjassa. Kohteet olivat vertailukohde, kohde, jossa kattoon oli tehty 50 mm EPS-eristys aluskatteen sisäpuolelle, kohde, jossa tuuletustilassa oli ylimääräinen lämmitys 2×200 W ja kohde, jossa ilmanvaihtoa yläpohjassa oli vähennetty. Tutkimus osoitti, että kaikki tekijät nostivat tuuletustilan lämpötilaa talvella. Kirjoittajien mukaan on mahdollista, että vähennetty tuuletus tuuletustilassa voisi toimia rakennuksen käyttöaikana, mikäli rakenne asuintiloihin on ilmatiivis ja pysyisi

sellaisena rakennuksen käyttöön. Tuuletukselta tarvitaan kuitenkin joka tapauksessa rakennusaikaisen kosteuden poistamiseen.

Kuten edellä todettiin, ilmavuotojen ja sisäilman kosteuden pääsyn estämiseksi rakennuksen yläpohjan tulisi olla mahdollisimman ilmatiivis. Toisaalta mikäli kosteustuotto ei ole kovin suurta, voi ilmavuoto olla yläpohjan olosuhteiden kannalta hyvästäkin, koska lämmin ilma lämmittää tuuletustilaa. Uvsløkk (2005) raportoi mm. laskentatuloksista, joissa rakennuksen (kosteustuotto 10 kg/d) homeriski on suurimmillaan ilmavuotoluvun ollessa karkeasti ottaen välillä 2...4 1/h. Näistä pienimmällä tai isoimmalla ilmavuotoluvun arvolla riski homeen kasvulle pienenee. Rakennuksen energiatehokkuuden kannalta tulee kuitenkin pyrkiä mahdollisimman pieneen ilmavuotolukuun.

Ruotsissa on myös kehitetty mukautuvan ilmanvaihdon tuotesovellutuksia kylmän ullakkotilan tuuletukselta varten (Hagentoft et al. 2007, Forsaeus & Thorin 2007) (kuva 6.3). Suomesakin markkinoidaan kuivatusjärjestelmää, jolla tuulettuvien tilojen ilmanvaihtoa voidaan tarvittaessa rajoittaa ja tuuletustilaa lämmittää (OlosuhdeVahti™-esite 2008). Säädettävän ilmanvaihdon ongelmana on, että se synnyttää yläpohjan tuuletustilaan joko yli- tai alipaineen riippuen siitä käytetäänkö ilmanvaihtoon sisääntulo- tai poistopuhallinta. Kumpikin voi olla yläpohjan toiminnan kannalta haitallista. Ylipainetilanteessa tuuletustilasta voi virrata mikrobeja ja niiden aineenvaihduntatuotteita sisäilmaan ilmansulun rei'istä. Toisaalta taas alipainetilanteessa sisältä voi virrata lisää ilmaa ja sen mukana kosteutta yläpohjaan. Yläpohjan ilmatiiviyys on tässäkin tapauksessa ehdoton edellytys tämän tyyppisen järjestelmän käyttämiselle.



Kuva 6.3 Periaatekuva säädettävän koneellisen ilmanvaihtojärjestelmän toiminnasta yläpohjan tuuletustilassa. (Hagentoft et al. 2007)



6.3 Johtopäätökset

Lämmöneristysten lisääminen heikentää tuuletetun yläpohjan kosteusteknistä toimintaa, koska lisäeristäminen viilentää tuuletustilaa ja lisää siellä homeen kasvulle suotuisia olosuhteita. Etenkin Ruotsissa on lukuisissa yhteyksissä raportoitu kasvaneista ongelmista yläpohjissa, jotka on liitetty mm. kasvaneisiin eristemääriin. Myös Suomessa tuuletetuissa yläpohjissa esiintyy jo ongelmia ja ilmaston lämpeneminenkään ei tilannetta paranna.

Lisäeristämisen vaikutusta on kirjallisuusselvityksen perusteella vaikeaa arvioida. Toistaiseksi yläpohjassa tapahtuvaa lievää homeen kasvua on pidetty hyväksyttävänä osittain siksi, että sisätiloissa rakennuksen yläosassa on yleensä ylipaine, joka estää homeiden ja niiden aineenvaihduntatuotteiden kulkeutumista ilmapirtausten mukana sisäilmaan. Oleellista kuitenkin on, että yläpohja on mahdollisimman ilmatiivis, jotta kosteutta ei pääse virtaamaan myöskään sisältä tuuletustilaan.

Yläpohjan lisälämmöneristäminen puhallettavilla eristeillä on yleensä kohtuullisen helppoa, mutta eristämisestä saatavaa hyötyä heikentää se, että yläpohjan lämmöneristys on jo nyt hyvä. Toisaalta samasta syystä lisälämmöneristysten vaikutus tuuletetun yläpohjan lämpötiloihin ei ole enää niin merkittävä kuin aiemmin.

Jos ulkoilman lämpötilat ja suhteelliset kosteudet nousevat ilmastonmuutoksen seurauksena, yläpohjan olosuhteet muuttuvat entistä suotuisammiksi homeen kasvulle. Tällöin myös höyrynsulkumuovien yläpinnassa voi esiintyä homeen kasvun kannalta suotuisia olosuhteita kesäaikaan jäähdytetyissä rakennuksissa.

Edellä kerrotuista syistä johtuen ehdotettu lämmöneristysmääräysten kiristys 30–40 %:lla nykyisiin U-arvoihin verrattuna ei ole suositeltavaa myöskään yläpohjan osalta. U-arvojen kiristämällä on ehkä yläpohjissa hieman vähemmän haittavaikutuksia kuin alapohjissa ja ulkoseinissä, kun otetaan huomioon rakennusfysikaaliset, tekniset ja taloudelliset tekijät. Siksi yläpohjan U-arvovaatimusta voitaneen kiristää jonkin verran enemmän kuin muissa rakenneosissa, jotta välttyttäisiin mittavilta alapohjan ja ulkoseinien U-arvojen kiristyksiltä.

Kaiken kaikkiaan tuuletettujen yläpohjien suunnitteluohjeita tulee parantaa, jotta yläpohjissa voidaan eliminoida kosteuden haittavaikutukset aiempaa paremmin.

7. RYÖMINTÄTILAINEN ALAPOHJA

7.1 Yleistä

Tässä luvussa on pyritty arvioimaan ryömintätilaisen alapohjan lämmöneristävyiden lisäämisen vaikutuksia ryömintätilan lämpötila- ja kosteusolosuhteisiin. Tarkastelussa on käytetty hyväksi olemassa olevaa tutkimustietoa nykyisillä lämmöneristävyksillä ryömintätilaan tule-



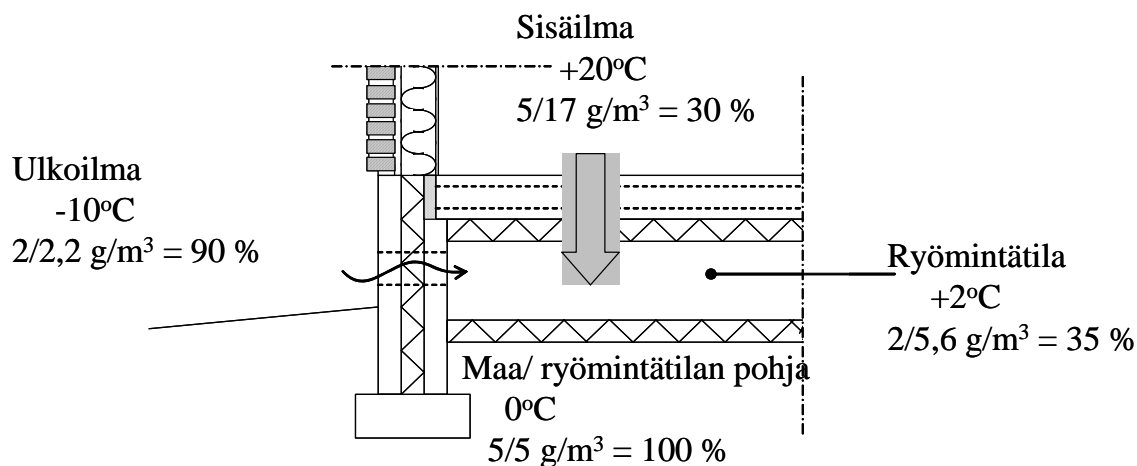
vista tyypillisistä olosuhteista ja arvioitu asiantuntijaryhmässä miten olosuhteet muuttuvat lämmöneristävyyden lisääntyessä. Lisäksi on tehty lyhyt kirjallisuushaku ruotsalaisista ryömintätilan olosuhteita käsittelevistä tutkimuksista.

Ryömintätilaisen alapohjan toimintaa on tarkasteltu staattisena tarkasteluna kolmessa eri olosuhteessa: talvella, kesällä ja poikkeuksellisen kosteana kesänä. Tarkasteluissa ulkoilman ja sisäilman olosuhteiksi on valittu sellaiset keskimääräiset olosuhteet, jotka kuvaavat mahdollisimman hyvin kyseistä vuodenaikaa. Ensin tarkastellaan millaiset olosuhteet ryömintätilassa vallitsevat keskimäärin kun alapohjan lämmöneristävyys on nykyisin voimassa-olevien määräysten mukainen. Sitten tarkastellaan miten olosuhteet muuttuisivat jos lämmöneristävyyttä parannetaan.

7.2 Tyypilliset olosuhteet nykyisissä ryömintätiloissa

Talvella

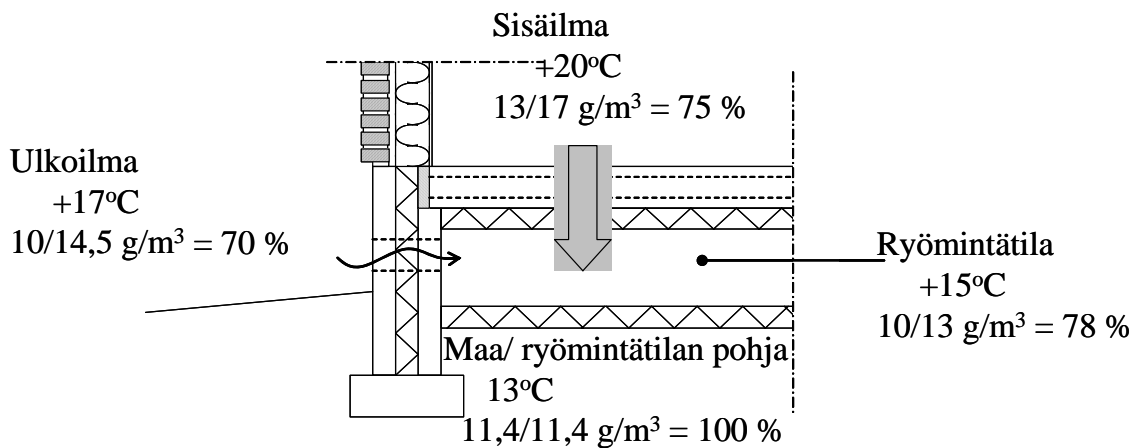
Talvella ryömintätilassa on keskimäärin kuvan 7.1 mukaiset olosuhteet. Ryömintätilan lämpötila (+2 °C) on ulkoilmaa korkeampi, koska lämpövuoto alapohjalaatan läpi ja ulkoilmaa lämpimämmästä pohjamaasta lämmittää ryömintätilaa. Ryömintätilan ilman kosteuspitoisuus (2 g/m³) on sama kuin ulkoilman kosteuspitoisuus (2 g/m³), koska maan lämpötila on alhainen eikä sieltä tule juurikaan lisäkosteutta. Ryömintätilan suhteellinen kosteus on alhainen (RH ≈ 35 %) ja rakenne toimii hyvin.



Kuva 7.1 Tyypilliset ryömintätilan olosuhteet talvella.

Kesällä

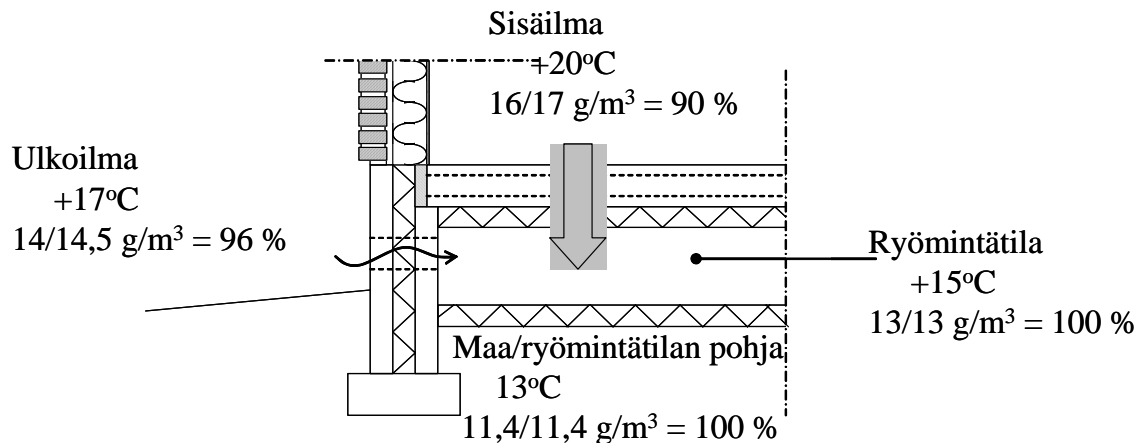
Kesällä olosuhteet ryömintätilassa ovat tyypillisimmillään kuvan 7.2 mukaiset. Kesällä ryömintätilan pohjamaan lämpötila (+13 °C) on alhaisempi kuin ulkoilman lämpötila (+17 °C), jolloin se alentaa jonkin verran ryömintätilan lämpötilaa. Toisaalta lämpövuoto alapohjalaatan läpi lämmittää hieman ryömintätilaa. Ryömintätilan kosteuspitoisuus koostuu ulkoilman kosteudesta (10 g/m³) ja maapohjasta haihtuvasta kosteudesta. Kosteusmäärä on suurin loppukesällä. Ryömintätilan suhteellinen kosteus on melko korkea (RH ≈ 78 %), mutta ei kuitenkaan ylitä kriittistä kosteutta, jossa mikrobin kasvu olisi mahdollinen.



Kuva 7.2 Tyypilliset ryömintätilan olosuhteet kesällä.

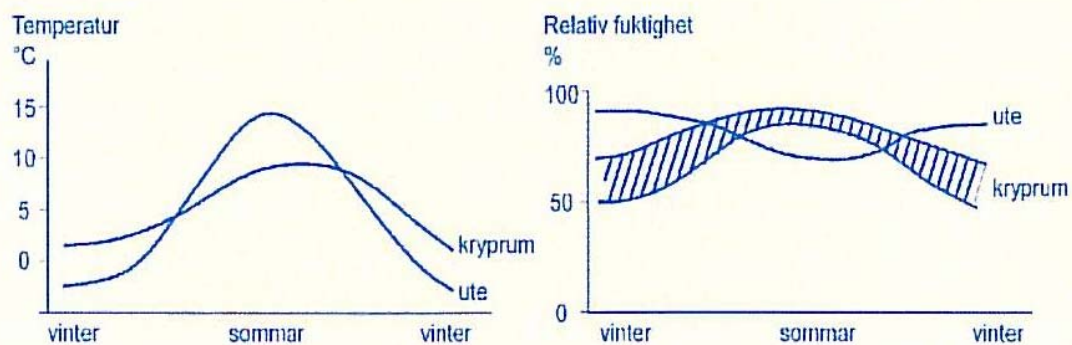
Eriyisen sateisena kesänä olosuhteet ryömintätilassa ovat kuvan 7.3 mukaiset. Lämpötila ryömintätilassa (+15 °C) on ulkoilmaa viileämpi samoin kuin edellä. Ulkoilman kosteuspitoisuus (14 g/m³) on hyvin korkea ja viileämmässä ryömintätilassa on kyllästystila ja pinnoille kondensoituu kosteutta. Koska kosteuspitoisuus on yhtä korkea ryömintätilassa ja maassa, maa ei ole kosteuslähde, eikä maanpinnan peittäminen alenna ryömintätilan kosteuspitoisuutta. Tällaiset mikrobin kasvuun otolliset olosuhteet muodostuvat ryömintätilaan kosteina kesinä, eikä niitä voida parantaa millään rakenteellisella ratkaisulla, kuten esim. tuuletusaukkojen määrää lisäämällä tai maanpinnan peittämisellä.

Ryömintätilan suhteellista kosteutta voidaan laskea tällöin merkittävästi vain koneellisella kuivatuksella tai ryömintätilan lämmityksellä ja niilläkin vain siinä tapauksessa, että kosteuden poistuminen maasta ryömintätilan ilmaan on rajoitettu esim. maan pinnalle laitetun hyvän lämpöeristyksen avulla.



Kuva 7.3 Ryömintätilan olosuhteet sateisena kesänä.

Myös ruotsalaisissa lähteissä pidetään ulkoilmalla tuuletettavan ryömintätilan olosuhteita sellaisina, että mikrobien kasvu ryömintätilassa on mahdollinen ja rakennetta pidetään ns. riskirakenteena (Padt et al. 2004 ja SBUF 2007). Kuvassa 7.4 on esitetty ryömintätilan vuotuiset lämpötila- ja kosteusolosuhteet ruotsalaisten tutkimusten mukaan.



Temperatur och relativ fuktighet under året i ute- och kryprumluft.

Kuva 7.4 Ruotsalaistutkimusten mukaiset tyypilliset olosuhteet ryömintätilassa. (Padt et al. 2004)

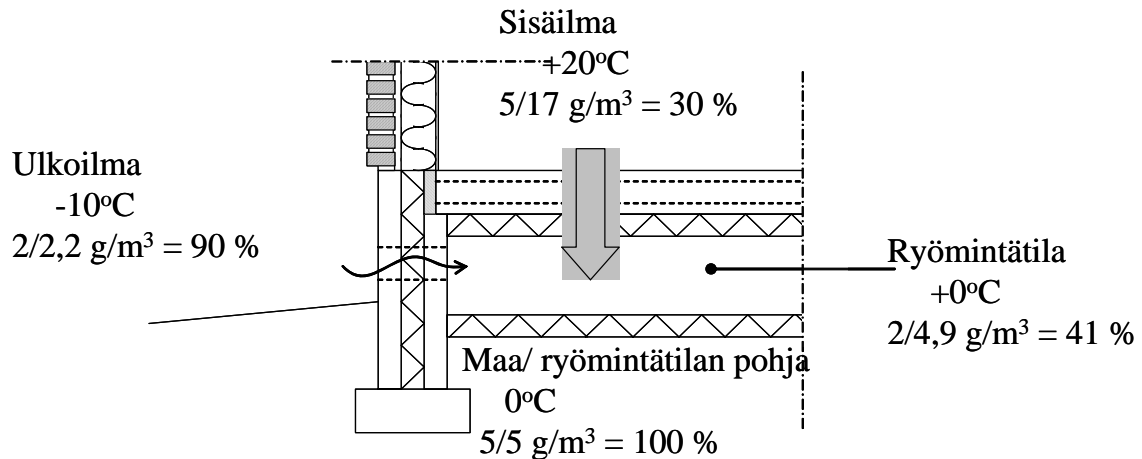
7.3 Lämmöneristeen lisäämisen vaikutus olosuhteisiin

Jos alapohjan lämmönvastusta suurennetaan, lämpövuoto ryömintätilaan pienenee ja olosuhteet muuttuvat kuvien 7.5, 7.6 ja 7.7 mukaisesti.

Talvella

Talvella (kuva 7.5) ryömintätilan lämpötila (+0 °C) on alhaisempi kuin edellä koska alapohjan läpi johtuva lämpövuoto on pienempi, mutta kuitenkin lämpimän puolella. Joissakin tapa-

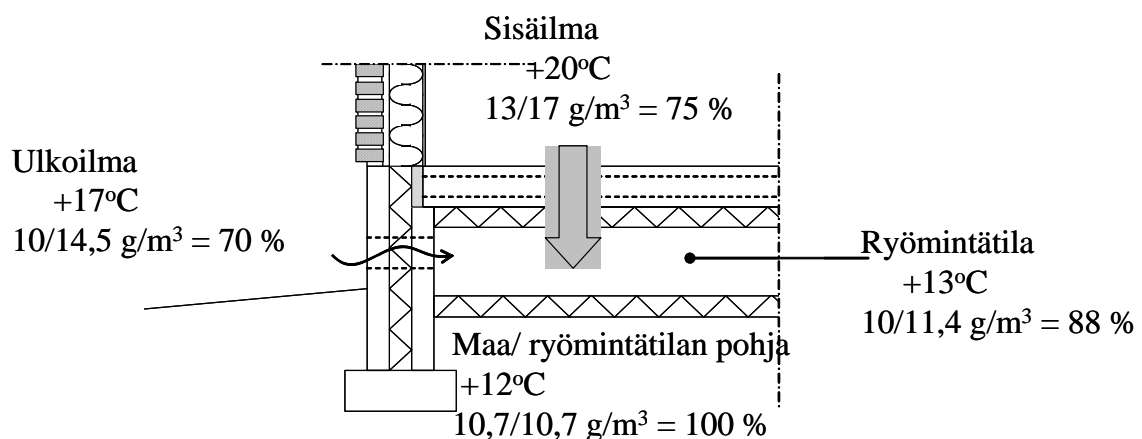
uksissa lämpötila voi kuitenkin laskea ryömintätilassa alle nollan, jolloin on riski, että ryömintätilassa lämpöeristämättömät putket voivat jäätyä. Tällaisia havaintoja on jo ollut joissakin erittäin hyvin lämpöeristetyissä ryömintätiloissa, joissa viemäriputket ovat jääntyneet talvella. Tuuletettaessa kuivalla ulkoilmalla ryömintätilan suhteellinen kosteus ($RH \approx 41 \%$) pysyy kuitenkin edelleen suhteellisen alhaisena.



Kuva 7.5 Alapohjan lämmönvastuksen lisäämisen vaikutus ryömintätilan olosuhteisiin talvella.

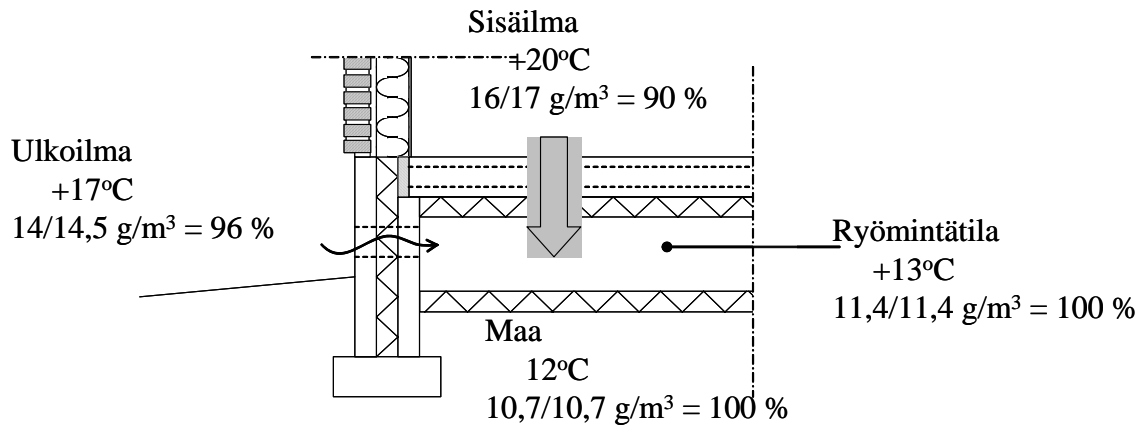
Kesällä

Kesällä (kuva 7.6) ryömintätilan lämpötila (+13 °C) pysyy samoin alhaisempana kuin edellä kun lämpövuoto alapohjan läpi pienenee. Ryömintätilan kosteus koostuu ulkoilman kosteudesta (10 g/m³) ja ryömintätilan pohjamaasta haihtuvasta kosteudesta. Ryömintätilan suhteellinen kosteus ($RH \approx 88 \%$) saattaa helposti nousta yli kriittisen kosteuspitoisuuden, jolloin mikrobikasvu ryömintätilassa on mahdollinen.



Kuva 7.6 Alapohjan lämmönvastuksen lisäämisen vaikutus ryömintätilan olosuhteisiin kesällä.

Erityisen sateisena kesänä (Kuva 7.7) olosuhteet ryömintätalassa pysyvät sellaisena, että mikrobikasvu ryömintätalassa ja kondenssi ryömintätalassa pinoille on mahdollinen.



Kuva 7.7 Alapohjan lämmönvastuksen lisäämisen vaikutus ryömintätalassa olosuhteisiin sateisena kesänä.

Lisättäessä alapohjan lämmönvastusta, vuosittainen ajanjakso, jolloin ryömintätalassa olosuhteet mahdollistavat mikrobikasvun ryömintätalassa pitenee. Ulkoilmalla tuuletettava ryömintätalallinen alapohjarakenne on nykyisillä lämmöneristävyyksillä toteutettunakin riskirakenne mikrobien kasvun suhteen. Erityisesti puurakenteisessa alapohjassa on jopa puun lahoaminen mahdollinen. Alapohjan lämmöneristävyyden lisääminen muuttaa entisestään ryömintätalassa olosuhteita mikrobikasvulle otollisemmiksi ja pidentää ajanjaksoa, jona olosuhteet ovat kasvulle suotuisat.

Kuten edellä jo todettiin, ryömintätalassa olosuhteita voidaan parantaa ainoastaan koneellisella kuivatuksella tai tuuletustalassa lämmityksellä. Kummankin menetelmän käyttö edellyttää sitä, että maapohja on hyvin lämpöeristetty. Kuivatuksen tai lämmityksen käyttö kuluttaa kuitenkin merkittävästi sähköenergiaa eivätkä ne ole siksi perusteltuja ratkaisuja. Laitteiden toimintahäiriöt ja rikkoutumiset muodostavat myös merkittävän riskin alapohjan kosteusteknisen toiminnan kannalta.

7.4 Johtopäätökset

Lämmöneristävyyden lisääminen ryömintätalassa alapohjarakenteeseen vähentää lämpövuotoa ryömintätalassa ja siten viilentää ryömintätalassa lämpötilaa. Tästä seuraa, että ryömintätalassa mikrobien kasvulle otollinen vuosittainen ajanjakso pitenee ja toisaalta joissakin tapauksissa ryömintätalassa lämpötila talvella voi laskea alle nollan, josta seuraa jäätymisriski lämpöeristämättömille ryömintätalassa kulkeville putkille. Siten lämmöneristävyyden lisääminen heikentää ryömintätalassa alapohjan kosteusteknistä toimintaa merkittävästi.



Ryömintätilaisessa alapohjassa riski homeongelmille on kuitenkin vielä suurempi kuin tuultuvassa yläpohjassa, koska siellä esiintyy jo nykyisin merkittävästi enemmän homeen kasvulle suotuisia olosuhteita maaperän vaikutuksesta. Ryömintätilan olosuhteet ovat ajoittain otolliset myös lahottajasienille ja ilmastonmuutos heikentää alapohjan toimintaa tässä suhteessa entisestään. Lisäksi rakennuksen alaosassa tyypillisesti oleva alipaine mahdollistaa ryömintätilan mikrobien kulkeutumisen sisään epätiiviyiskohtien kautta. Ryömintätilaisen alapohjan hyvä ilmatiiviyys onkin rakenteen toiminnan kannalta ensiarvoisen tärkeä asia.

Puurakenteinen ryömintätilainen alapohja on kosteusteknisen toiminnan osalta jo nyt riskirakenne. Jos alapohja on tehty kivirakenteisena ja eloperäinen rakennusjäte on poistettu ryömintätilasta, on rakenteen kosteudensietokyky oleellisesti parempi kuin puurakenteisella alapohjalla. Ylipäätään ryömintätilan pintojen materiaalien valinnassa tulee kiinnittää entistä enemmän huomiota kosteudenkestävyyteen.

Ryömintätilaisen alapohjan läpi tapahtuvat lämpöhäviöt ovat pienempiä kuin ulkoilmaan rajoittuvissa rakennusosissa, koska maaperä lämmittää ryömintätilan ilmaa. Tästä syystä alapohjan lisäeristämisestä saatava taloudellinen hyöty on vähäisempi. Toisaalta maapohjan lämpöeristäminen muuttaa ryömintätilan olosuhteita lähemmäksi ulkoilman olosuhteita.

Edellä kuvatuista syistä johtuen ryömintätilaisen alapohjarakenteen U-arvovaatimusta ei tule merkittävästi kiristää. Kaiken kaikkiaan ryömintätilaisten alapohjien suunnitteluohjeita tulee parantaa, jotta alapohjissa voidaan eliminoida kosteuden haittavaikutukset aiempaa paremmin.

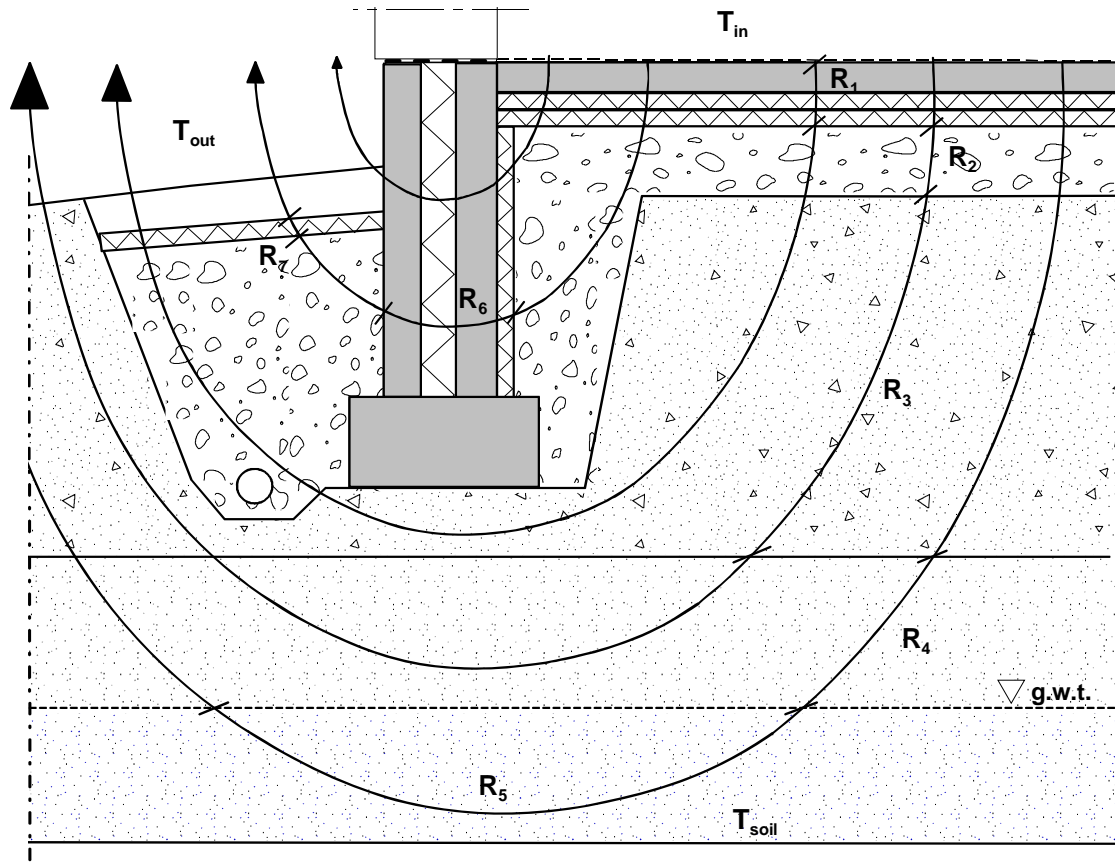
8. MAANVASTAINEN ALAPOHJA

8.1 Yleistä

Tarkastelun tavoitteena on selventää maanvastaisen alapohjarakenteen toimintaa sekä vertailla erilaisia laskentamenetelmiä maanvastaisen alapohjan lämmönhukan määrittämiseksi. Toisaalta tavoitteena on arvioida maanvastaisen alapohjan lämmöneristävyuden parantamisen vaikutuksia rakenteen lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan sekä toimenpiteen tehokkuutta.

Maanvastaisen alapohjan lämpötekniiseen käyttäytymiseen on alapohjan alapuolisella maalla ja sen lämmöneristävyydellä on suuri merkitys. Rakennuksen reuna-alueella sokkelin lämmöneristävyys ja routaeristys vaikuttavat merkittävästi lämpövuohon maanvaraisesta alapohjasta. Rakennuksen keskialueella maanvastaisen alapohjan alapuolinen maa muodostaa merkittävän osan rakenteen lämmönvastuksesta. Teoreettisista tarkasteluissa maanvastaisen alapohjan läpi johtuvien lämpöhäviöiden lämpövuot kuvataan yleisesti kuvan 8.1 mukaisiksi.

Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan



Kuva 8.1 Teoreettiset lämpövuot maanvastaisesta alapohjasta maahan.

Maanvastainen alapohja käsitellään eri tavalla lämpöhäviöiden määrittämiseksi eri laskentatavoissa. Laskettaessa RakMK C3 (2007) mukaisia lämpöhäviöitä ja U-arvoa, alapuolinen maa otetaan mukaan alapohjan U-arvoon. Laskettaessa RakMK D5 (2007) mukaista lämpöhäviöenergiaa ja energiatodistuksen mukaista energialuokkaa ja energiatehokkuuslukua (ET-luku) (RakMK D5 2007, YM:n asetus 765/2007), alapuolinen maa ei ole mukana alapohjan U-arvossa. Tällöin ulkoilman sijasta käytetään RakMK D5 (2007):ssä annettuja maan lämpötila-arvoja. Eri laskentamenetelmät aiheuttavat sekaannusta ja alapohjan osuus kokonaislämpöhäviöistä on erisuuruinen eri laskentamenetelmillä.

TTY:n tutkimusten mukaan (Leivo & Rantala 2003, Rantala 2003) maanvastaisen alapohjan alapuolisen maan lämpötilat ovat todellisuudessa korkeampia kuin RakMK D5 (2007):ssä on esitetty. Tutkimukset osoittavat myös sen, että RakMK C4 (2003):ssä esitetyt maan lämmönvastukset ovat todellisuudessa suurempia.

Maanvastaisen alapohjan (sekä maanvastaisten seinien ja ryömintätillaisen alapohjan) lämpöhäviöiden laskentaan on olemassa tarkempi laskentamenetelmä, joka on esitetty standardissa ISO 13370 (2007). Tällä laskentamenetelmällä saadut tulokset ovat lähempänä TTY:llä saatuja tutkimustuloksia.

Tutkimusllostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan



Tässä luvussa tehdyissä tarkasteluissa on käytetty hyväksi Rakentamismääräyskokoelman osia C3 (2007), C4 (2003) ja D5 (2007), YM:n asetusta rakennuksen energiatodistuksesta ja energiatehokkuusluvun määrittämisestä (765/2007) sekä ISO 13370 (2007) -standardia laskentamenetelmien vertailussa, TTY:llä tehtyjä laajoja tutkimuksia maanvastaisesta rakenteesta (Leivo & Rantala 2003, Leivo & Rantala 2005, Leivo & Rantala 2006 ja Rantala 2003) ja asiantuntijaryhmän mielipiteitä rakenteen toiminnan selvittämisessä.

Laskennallisissa energiakulutustarkasteluissa on käytetty tavanomaista ”normipientaloa”, jonka pinta-ala on 140 m² (10×14 m). Ulkoseinien pinta-ala on yhteensä 138 m², josta 21 m² on ikkunoita ja 5 m² ovia. Yläpohjan pinta-ala on 145 m² (yläpohjassa vinoja osia). Energiankulutuslaskelmissa säävyöhykkeenä on käytetty vyöhykettä III (Jyväskylä) ja keskimääräisenä sisälämpötilana +21 °C, kuten YM:n asetuksessa (765/2007) rakennuksen energiatodistuksesta ja energiatehokkuusluvun määrittämisestä määrätään.

8.2 Maan lämmönvastus

Rakennuksen lämpöhäviöiden tasauslaskelmassa (RakMK C3 2007), samoin kuin RakMK C4 (2003):ssa maanvastaisen alapohjan (ja kellarin seinän) U-arvo lasketaan ottamalla maan lämmönvastus huomioon. Rakennuksen energiankulutusta ja energiatodistuksen mukaista energialuokkaa ja energiatehokkuuslukua (ET-luku) määriteltäessä (RakMK D5 2007 ja YM:n asetus 765/2007) alapohjan U-arvo lasketaan ilman maan lämmönvastuksia käyttämällä lämpöhäviöiden laskennassa ulkoilman lämpötilan sijasta alapohjan alapuolisen maan lämpötilaa. Maakerrosten lämmönvastukset ovat RakMK C4 (2003) mukaan seuraavat:

- Sorasta tai sepelistä tehdyn vähintään 200 mm paksun lämmöneristyskerroksen lämmönvastus on 0,2 m²K/W.
- Alapuolisen perusmaan lämmönvastus on annettu taulukossa 8.1. Reuna-aluetta on alapohjassa 1 metri rakennuksen ulkoseinälinjalta ja sisäaluetta rakennuksen keskialue. Kellarin seinässä reuna-aluetta on 1 metri seinää ympäröivän maanpinnan alapuolella. Lämmönvastukset on määritetty ottaen tietty paksuus maata rakenteen lämmönvastukseen mukaan. Taulukossa 8.1 on esitetty myös maa-ainesten normaalin lämmönjohdavuus.


 Taulukko 8.1 Maan lämmönvastukset R_b perustusten ja alapohjan ollessa pysyvästi kuivatettuja (RakMK C4 2003).

Maa-aines	Normaalinen lämmönjohtavuus λ_n W/mK	Maan lämmönvastus R_b (m ² K/W)			
		Perusmaa alapohjan alla		Perusmuurin viereinen maa	
		Reuna-alue	Sisäalue	Reuna-alue	Sisäalue
1	2	3	4	5	6
Savi Hiekka ja sora, salaojitettu	1,4	0,8	3,2	0,40	1,6
Hiesu ja hieta Hiekka ja sora, salaojittamaton Moreeni	2,3	0,5	2,0	0,25	1,0
Kallio	3,5	0,4	1,2	0,15	0,6

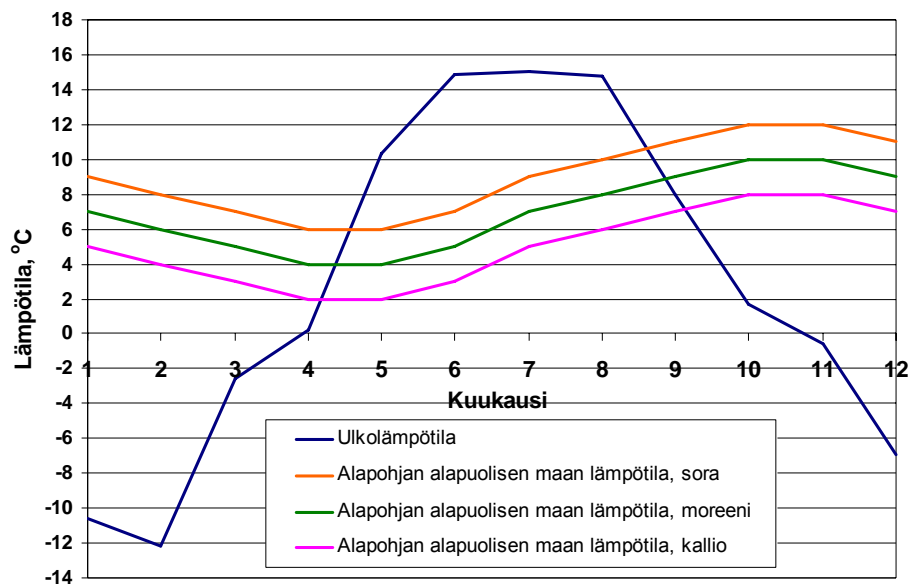
ISO 13370 (2007) -standardissa maan lämmönvastuksena käytetään taulukon 8.2 arvoja. Taulukossa on vertailuna RakMK C4 (2003):ssa annetut maan lämmönvastusten arvot. Merkittävin ero menetelmissä on, että ISO 13370 (2007) -standardissa ei oteta erikseen huomioon salaojituserroksen lämmönvastusta.

Taulukko 8.2 Maan lämmönvastukset ISO 13370 (2007) ja RakMK C4 (2003).

Maalaji	ISO 13370 Lämmönjohtavuus, λ (W/mK)	RakMK C4 Lämmönjohtavuus, λ (W/mK)
Savi ja siltti	1,5	1,4
Hiekka ja sora	2,0	2,0
Kallio	3,5	3,5

8.3 Lämpötilajakauma maanvastaisen alapohjan alapuolisessa maassa

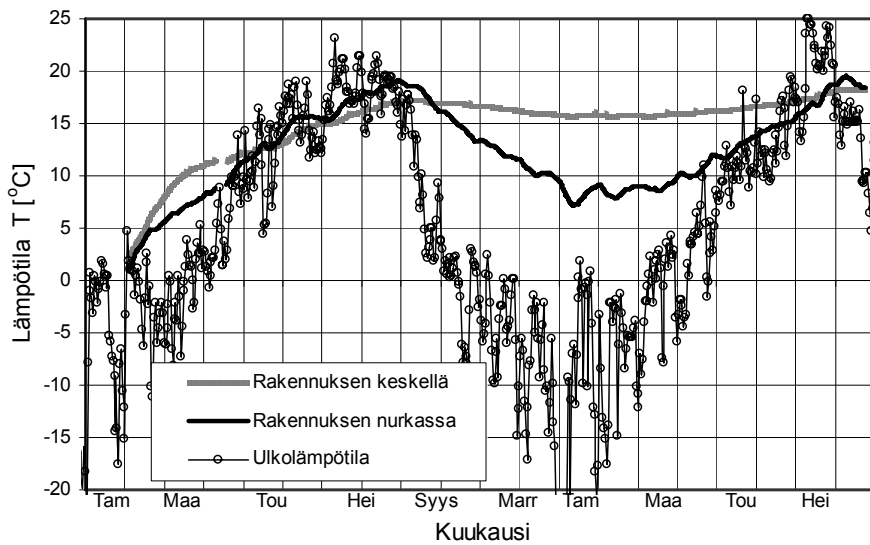
RakMK D5 (2007):n taulukossa 4 on esitetty kuukausittain ulkolämpötilan ja maanvastaisen alapohjan alapuolisen maan lämpötilan ero. Tämän mukaan alapohjan alapuolisen maan kuukausittainen lämpötila ilmastovyöhykkeellä III olisi kuvan 8.2 mukainen, kun maan vuotuinen keskilämpötila on 7 °C (2 + 5 °C) alapohjan U-arvon ollessa 0,2–0,3 W/m²K.



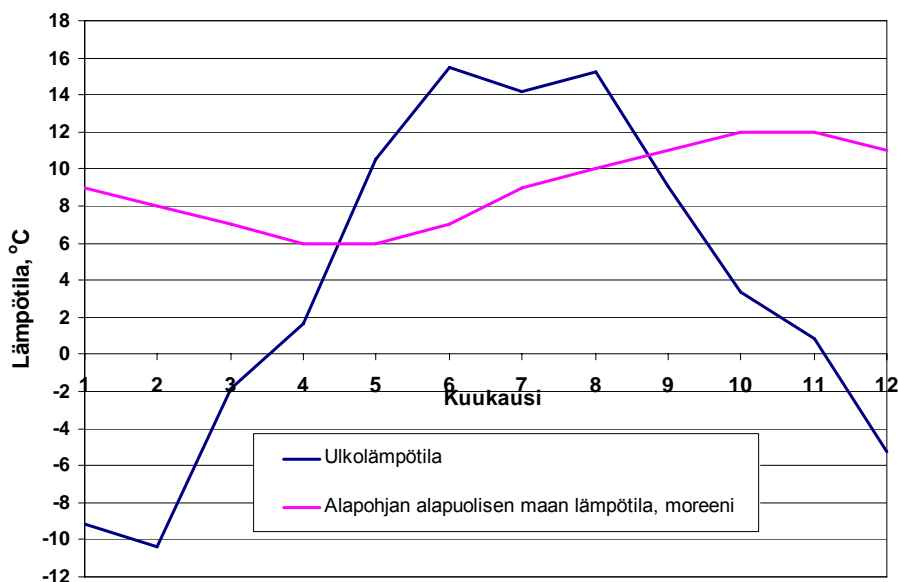
Kuva 8.2 Alapohjan alapuolisen maan kuukausittainen lämpötilä eri maalajeilla ja kuukausittainen ulkolämpötilä ilmastovyöhykkeellä III.

TTY:llä on tehty vuosina 1999–2005 kenttämittauksia maanvastaisen alapohjan alapuolisen maan lämpötilä- ja kosteusolosuhteista (Leivo & Rantala 2003, Leivo & Rantala 2005, Rantala 2003).

Kuvassa 8.3 on esimerkkinä Tampereella sijaitsevan uuden rivitalon päätyhuoneiston maanvastaisen alapohjan alapuolisen maan lämpötilan mittaustulokset noin 1,5 vuoden ajalta. Maanvastaisessa alapohjassa oli lämmöneristeenä rakennuksen reuna-alueella 100 mm EPS ja keskialueella 50 mm EPS, alapohjan keskimääräinen U-arvo oli 0,27 W/m²K ja perusmaa oli moreenia. Kuvassa 8.3 esitetään lämpötila kahdessa mittauspisteessä: rakennuksen keskellä ja rakennuksen ulkonurkassa, mittauskohtien ollessa maakerroksessa välittömästi lämmöneristeen alapuolella. Mittaukset on aloitettu rakennuksen lämmityksen alkamisaikana. Toisena mittausvuonna lämpötilakenttä on saavuttanut tasapainonsa ja muutokset lämpötilassa riippuvat ulkolämpötilan ja sisälämpötilan vaihteluista. Tällöin lämpötila maanvastaisen alapohjan alapuolisessa maassa vaihteli vuodessa rakennuksen keskellä +15,8...+17,6 °C ja rakennuksen ulkonurkassa +8,2...+18,4 °C. Vertailuna kuvassa 8.4 esitetään RakMK D5 (2007) mukainen maanvastaisen alapohjan kuukausittainen keskilämpötila, joka vaihtelee +6...+12 °C.



Kuva 8.3 Lämpötila rivitalon päätyhuoneiston maanvastaisen alapohjan alla, kenttämittaustulokset. (Leivo & Rantala 2003)

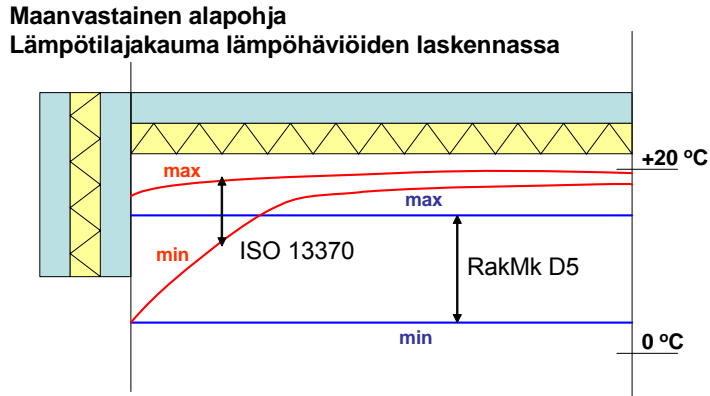


Kuva 8.4 RakMK D5 (2007) mukainen alapohjan alapuolisen maan kuukausittainen lämpötila ilmastovyöhykkeellä II, johon Tampere kuuluu (vuotuinen ulkoilman keskilämpötila on +4 °C).

RakMK D5 (2007):ssa oletetaan koko maanvastaisen alapohjan alle sama lämpötila, joka riippuu pääasiassa ulkolämpötilasta ja jonkin verran maanvastaisen alapohjan lämmöneristävyydestä ja perusmaalajista. Standardin ISO 13370 (2007) laskentamenetelmä perustuu maanvastaisen alapohjan lämpötilajakaumaan, jossa lämpötila rakennuksen alla riippuu etäisyydestä ulkoseinälinjaan. Lisäksi standardin ISO 13370 (2007) maanvastaisen alapohjan alapuolisen maan lämpötila riippuu sisä- ja ulkolämpötila ja maanvastaisen alapohjan

Tutkimuslousuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan

lämmöneristävyuden lisäksi perusmuurin lämmöneristävyydestä. Laskentamenetelmien perustana olevaa lämpötilajakaumaa maanvastaisen alapohjan alla havainnollistaa kuva 8.5.

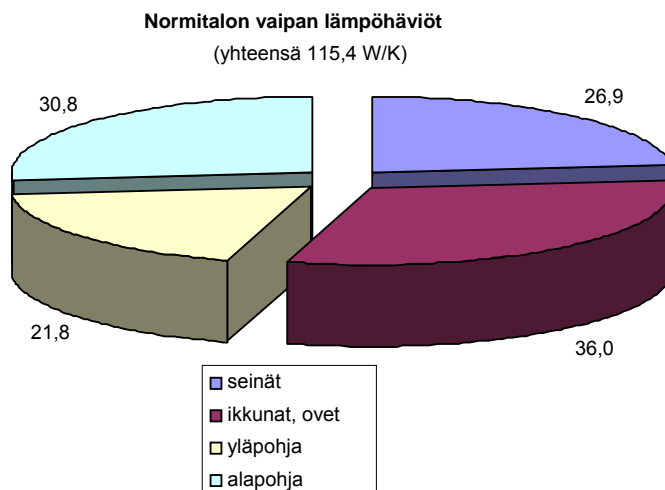


Kuva 8.5 Periaatteellinen kuva maan lämpötilajakauman laskentaolettamuksista eri laskentamenetelmissä.

8.4 Maanvastaisen alapohjan lämpöhäviöiden suuruus

Laskentamenetelmien eroa havainnollistetaan seuraavassa laskentaesimerkin avulla.

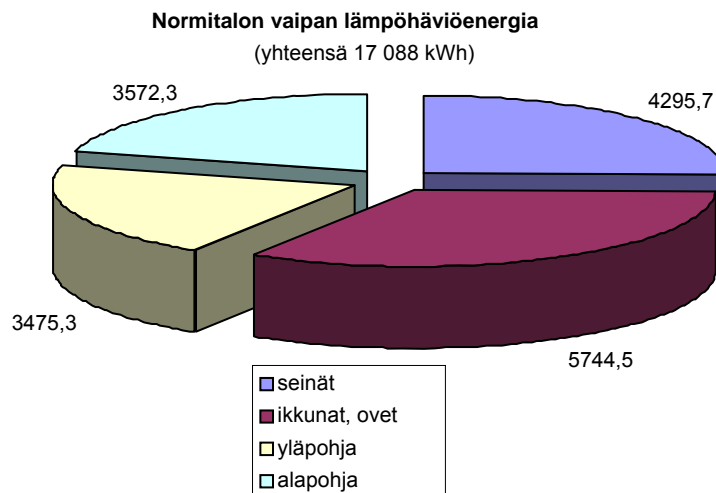
Laskettaessa vaipan lämpöhäviöiden tase nykyisen RakMK C3 (2007) mukaisilla vaipan U-arvoilla ja RakMK C4 (2003) mukaisella maan lämmönvastuksella (moreeni, alapohjassa 100 mm lämmöneristettä, $\lambda = 0,037 \text{ W/mK}$) lämpöhäviöiden jakauma on kuvan 8.6 mukainen. Maanvastaisen alapohjan osuus vaipan lämpöhäviöistä on 26,7 %.



Kuva 8.6 "Normitalon" vaipan lämpöhäviöiden jakauma laskettuna RakMK C3 (2007) ja RakMK C4 (2003) mukaan.



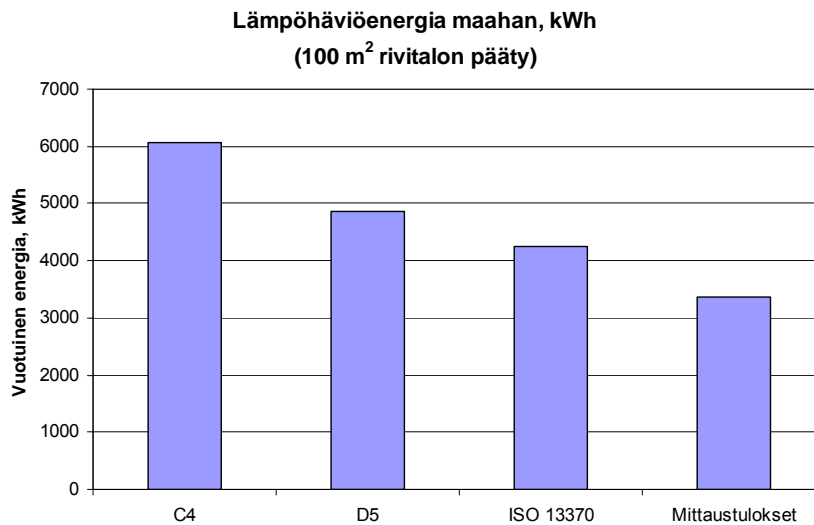
Laskettaessa "normitalon" vaipan läpi johtuvaa lämpöhäviöenergiaa RakMK D5 (2007) mukaan lämpöhäviöenergiat ja niiden jakauma on kuvan 8.7 mukainen. Maanvastaisen alapohjan U-arvona on käytetty arvoa 0,24 W/m²K (vähennetty moreeniin lämmönvastus) ja alapohjan alapuolisen maan ja ulkoilman lämpötilaerona arvoa +5 °C eli alapohjan alapuolisen maan keskilämpötila on +7 °C RakMK D5 (2007) mukaisesti. Tässä tapauksessa alapohjan osuus vaipan lämpöhäviöenergiasta on selvästi pienempi kuin edellä eli 20,7 %.



Kuva 8.7 "Normitalon" vaipan lämpöhäviöenergian jakauma laskettuna RakMK D5 (2007) mukaan.

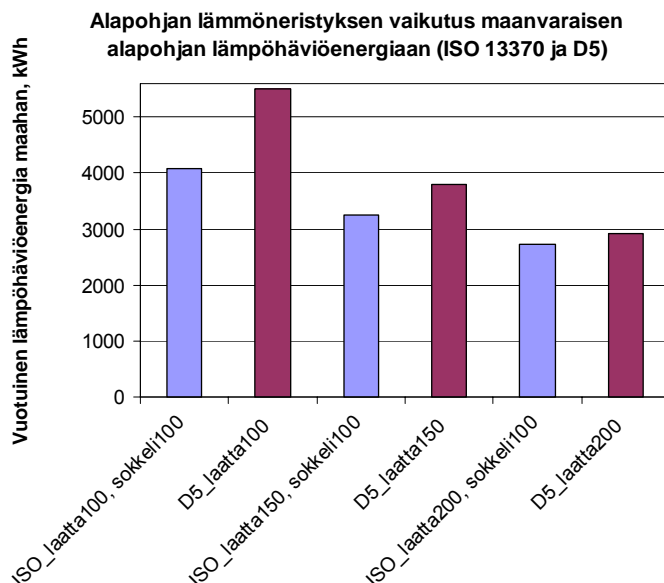
Jos vaipan U-arvoja pienennetään 30 % (seinät: 0,17 W/m²K, ikkunat ja ovet: 0,98 W/m²K, yläpohja: 0,105 W/m²K ja alapohja maa (moreeni) mukaan lukien: 0,17 W/m²K), lämpöhäviöt pienenevät 82,7 W/K (-28 %), joista lämpöhäviöt maahan ovat 28,4 %. Lämpöhäviöenergiaa laskettaessa alapohjan U-arvo on tällöin ilman maata 0,23 W/m²K. Vastaavasti lämpöhäviöenergia on tällöin 13 253 kWh (-22 %), joista lämpöhäviöenergia maahan on 28,6 %. Tällöin molemmilla laskentavoilla johtumislämpöhäviöiden maahan johtuva osuus on samansuuruinen, mutta lämpöhäviöenergia ei pienene samassa suhteessa kuin lämmönläpäisykertoimet pienenevät.

Laskettaessa edellä esitetyn kenttämittauksen maanvastaisen alapohjan alapuolisen maan lämpötiloista lämpöhäviöenergia maahan ja vertailemalla eri laskentatavoilla (RakMK C4 2003, RakMK D5 2007 ja ISO 13370 2007) saatavia laskennallisia lämpöhäviöenergioita (kuva 8.8) voidaan todeta, että Standardilla ISO 13370 (2007) laskettu lämpöhäviöenergia eroaa vähiten saaduista mittaustuloksista ollen noin 26 % suurempi kuin mittaukset osoittavat. RakMK D5 (2007) mukaisella laskentatavalla lämpöhäviöenergia on noin 45 % suurempi kuin lämpötilamittauksista laskettu lämpöhäviö. Mikäli lämpöhäviöenergia laskettaisiin RakMK C4 (2003) mukaisilla maan lämmönvastuksilla, ero mittaustuloksiin olisi vielä tätäkin suurempi (80 %). Tämä kuvastaa hyvin sitä, kuinka paljon suurempia maan lämmönvastukset ovat todellisuudessa verrattuna nykyisessä RakMK C4 (2003):ssä esitettyihin arvoihin.



Kuva 8.8 Laskennalliset lämpöhäviöenergiat maahan eri laskentatavoilla sekä koekohteen mittaus- tuloksista laskettu lämpöhäviöenergia.

RakMK D5 (2007) mukainen laskennallinen lämpöhäviöenergia on noin 15 % suurempi kuin standardilla ISO 13370 (2007):lla laskettu arvo. Tämä ero johtuu suurelta osin siitä, että standardissa ISO 13370 (2007) perusmuurin lämmönvastus vaikuttaa merkittävästi alapohjasta maahan johtuviin lämpöhäviöihin, mitä ei oteta huomioon RakMK D5 (2007):ssä ollenkaan. Kuvassa 8.9 on tehty vertailuja perusmuurin lämmöneristyspaksuuden vaikutuksesta lämpöhäviöenergiaan kolmella alapohjan lämmöneristepaksuudella (EPS-eriste, $\lambda = 0,04$ W/mK). Eri laskentatapojen ero on 7–26 %. Suurin ero eri laskentamenetelmien välille saadaan pienimmällä alapohjan lämmöneristepaksuudella.



Kuva 8.9 Perusmuurin lämmöneristyspaksuuden vaikutus maanvaraisen alapohjan lämpöhäviö- energiaan maahan. Eri vaihtoehdoissa esitetyt lukuarvot tarkoittavat EPS- lämmöneristeen ($\lambda = 0,04$ W/mK) paksuutta alapohjassa ja perusmuurissa.

Tutkimuslaskelma saa kopioida vain kokonaisuudessaan



8.5 Johtopäätökset

Maanvastaisen alapohjan U-arvo lasketaan nykyisin eri tavalla lämpöhäviöiden tasauslaskelmassa ja energiankulutuslaskelmassa. Laskettaessa alapohjan lämpöhäviöitä tasauslaskelmassa (RakMK C4 2003) maan lämmönvastus on mukana alapohjan U-arvossa. Toisaalta laskettaessa alapohjan lämpöhäviöenergioita (RakMK D5 2007), maan lämmönvastus ei ole mukana alapohjan U-arvossa ja ulkolämpötilan sijaan käytetään RakMK D5 (2007):ssä annettuja alapohjan alapuolisen maan lämpötiloja. Kaksi eri laskentamenetelmää aiheuttaa käytännössä epäselvyyksiä maanvastaisen alapohjan lämpöhäviöiden laskennassa.

Maanvastaisen alapohjan lämmönvastuksesta merkittävä osuus muodostuu erityisesti rakennuksen keskialueella pohjamaan lämmönvastuksesta. Tällöin alapohjan lämmöneristyksen parantaminen pienentää alapohjan läpi siirtyvää lämpövirtaa suhteellisesti vähemmän kuin muissa rakennusosissa, joissa U-arvo riippuu lähes ainoastaan lämmöneristyksen määrästä. Nykyisessä RakMK C4 (2003):ssä annetut maan lämmönvastukset ja RakMK D5 (2007):ssä annetut maanvastaisen alapohjan alapuolisen maan lämpötilat ovat varmalla puolella olevia arvoja, jolloin maan lämmönvastuksen osuus jää laskelmissa merkittävästi pienemmäksi kuin todellisuudessa. Tämän seurauksena maanvastaisen alapohjan lämmöneristyksen lisääminen antaa laskennallisesti selvästi enemmän hyötyä kuin todellisuudessa. ISO 13370 (2007) -standardilla laskettu maanvastaisen alapohjan lämmönvastus on tutkimusten mukaan lähimpänä todellista alapohjan lämmönvastusta.

Koska kansainvälisissä ISO 13370 (2007) ja EN ISO 13790 (2004) -standardeissa otetaan huomioon maan lämmönvastus sekä alapohjan U-arvoa että energiankulutusta laskettaessa, on suositeltavaa, että maan lämmönvastus on mukana kummassakin laskennassa myös Suomen määräyksissä. Tällöin lämpöhäviöiden ja energiankulutuksen laskennassa voidaan käyttää samaa U-arvoa ja laskenta selkeytyisi tältä osin oleellisesti. Tämä edellyttää kuitenkin samalla sitä, että maan lämmönvastuksia korjataan suuremmiksi RakMK C4 (2003) olevassa taulukossa (ks. taulukko 8.1).

Lämpimissä rakennuksissa käytetään nykyisin maanvastaisen alapohjan lämmöneristykseenä yleisesti 150 mm EPS -eristystä. Jos tämän alapohjarakenteen U-arvo lasketaan nykyisen RakMK C4 (2003) laskentamenetelmällä ja maan lämmönvastuksilla, saadaan alapohjan U-arvoksi n. 0,14–0,19 W/m²K riippuen maalajista sekä rakennuksen koosta ja muodosta. Tämä merkitsisi alapohjarakenteen U-arvoon siis n. 20–40 % kiristystä nykytilanteeseen verrattuna. Todellisilla maan lämmönvastuksilla laskettuna U-arvo olisi vielä huomattavasti pienempi. Tätä paksumman lämmöneristyksen käyttö maassa on tarpeetonta.

Kuten luvussa 2.5 todettiin, lämmöneristepaksuuden lisääminen aiheuttaa myös betonilaa-
tan painumisen lisääntymistä, koska lämmöneristeet joustavat enemmän. Myöskään tästä



syystä maanvastaisen alapohjan U-arvoa ei ole syytä kiristää edellä ehdotettua tasoa enemmän.

Koska lämmönerityksen lisääminen alapohjaan ei tuota todellisuudessa läheskään sitä hyötyä, mitä nykyisten määräysten mukaan saadaan laskennallisesti, ei ole myöskään perusteltua ottaa maanvastaista alapohjarakennetta mukaan lämpöhäviöiden kompensointilaskelmiin. Sama koskee myös maanvastaisia seinärakenteita.

Rakennuksen reuna-alueella lämpövuoto alapohjasta riippuu suurelta osin perusmuurin lämmöneristävyydestä, joten perusmuurin U-arvolle tulisi määrittellä vähimmäisarvo, esimerkiksi 0,25–0,3 W/m²K.

Kosteusteknisesti lämmöneristeen lisääminen maanvastaiseen alapohjaan on hyvä asia, koska maapohja jäähtyy ja riski alapohjan läpi alhaalta ylöspäin tapahtuvan vesihöyryn diffuusion aiheuttamille kosteusongelmille alapohjassa vähenee. Toisaalta nykyisten määräysten mukainen alapohjan lämmöneristävyys on riittävä rakenteen kosteustekninen toimivuuden kannalta ja lämmöneristykseen lisääminen ei paranna rakenteen kosteusteknistä toimintaa tässä suhteessa enää merkittävästi.

9. RAKENNUSTEN ROUTASUOJAUS

Lämpimien rakennuksen routasuojaukseen perustuu siihen, että lämpövuoto alapohjan läpi pitävät osaltaan perustukset lämpiminä. Mitä enemmän alapohjan lämmöneristystä parannetaan sitä enemmän tarvitaan routasuojaukseen anturoiden pohjan sulana pitämiseksi talvella. Tässä mielessä alapohjan lämpöeristykseen lisääminen lisää eristyskustannuksia myös routasuojauksen osalta.

Uusissa Talonrakennuksen routasuojausohjeissa (2007) on annettu ohjeet rakennusten routasuojauksen mitoituksista silloin, jos ryömintätilaisen alapohjan U-arvo on $\geq 0,16$ W/m²K ja maanvastaisen alapohjan U-arvo perusmaan lämmönvastuksen kanssa laskettuna $\geq 0,10$ W/m²K. Mikäli alapohjien U-arvovaatimuksia kiristetään näitä tasoja alemmaksi, routasuojauksen mitoitusohjeet tulee päivittää uudestaan tai mitoitus on tehtävä kylmän rakennuksen routasuojausohjeiden mukaisesti. Kylmän rakennuksen mitoitukseseen siirtymisen lisäksi routasuojauksen määrää merkittävästi nykyiseen tilanteeseen verrattuna, joten tässä mielessä U-arvojen tarpeeton kiristäminen alapohjarakenteissa ei ole järkevää.

10. RANKARAKENTEISET ULKOSEINÄT

10.1 Yleistä

Lämmöneristykseen lisääminen heikentää myös ulkoseinärakenteiden kosteusteknistä toimintaa rakenteen ulkopinnan viilentyessä. Ulkoseinissä kosteuden poistuminen rakenteesta

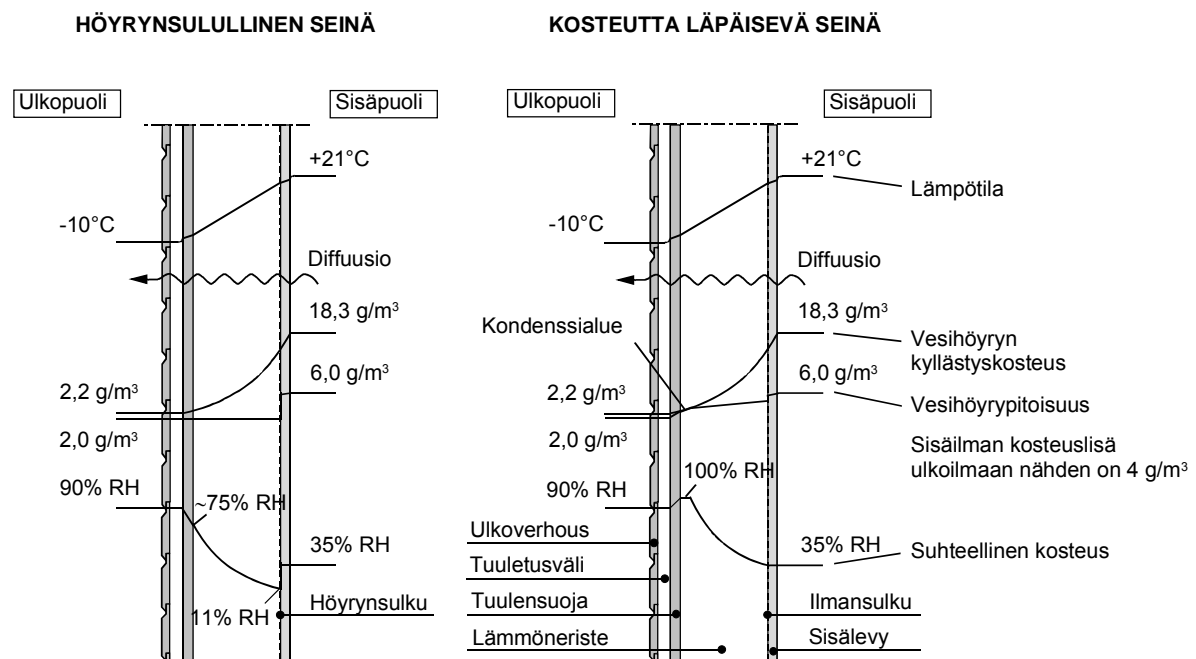


on kuitenkin tehokkaampaa kuin ylä- ja alapohjissa, koska ilma virtaa lämpötilaeron seurauksena alhaalta ylöspäin tuuletusvälissä. Rakenteen hyvän kosteusteknisen toiminnan edellytys on, että tuuletusväli on avoinna ulkoilmaan eikä tukkeutunut esim. laastipurseiden tai tuulensuojalevyjen turpoamisen seurauksena.

Puurunkoisia seinärakenteita on tutkittu TTY:llä laajasti vuosina 1997–2006 eri tutkimushankkeissa. Tässä luvussa on tarkasteltu puurunkoisen seinärakenteen rakennusfysikaalista toimintaa näistä tutkimuksista saatujen tulosten avulla (Vinha 2007).

10.2 Puurunkoisen ulkoseinärakenteen kosteustekninen toiminta

Puurunkoisessa ulkoseinärakenteessa tarvitaan aina riittävän vesihöyrynvastuksen omaava höyrynsulku rakenteen sisäpinnassa, jotta rakenteeseen ei pääse diffuusiolla liikaa kosteutta sisäilmasta. Seinärakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta kriittisin kohta on tuulensuojan sisäpinnassa, johon sisältä tuleva kosteus ensimmäisenä tiivistyy tai aiheuttaa homeen kasvun kannalta otolliset olosuhteet. Kuvasta 10.1 nähdään, että kosteutta läpäisevässä seinässä kondensoituminen alkaa ilman vesihöyrypitoisuuden saavuttaessa tuulensuojan sisäpinnassa vesihöyrynvastuksen kyllästyskosteuspitoisuuden.

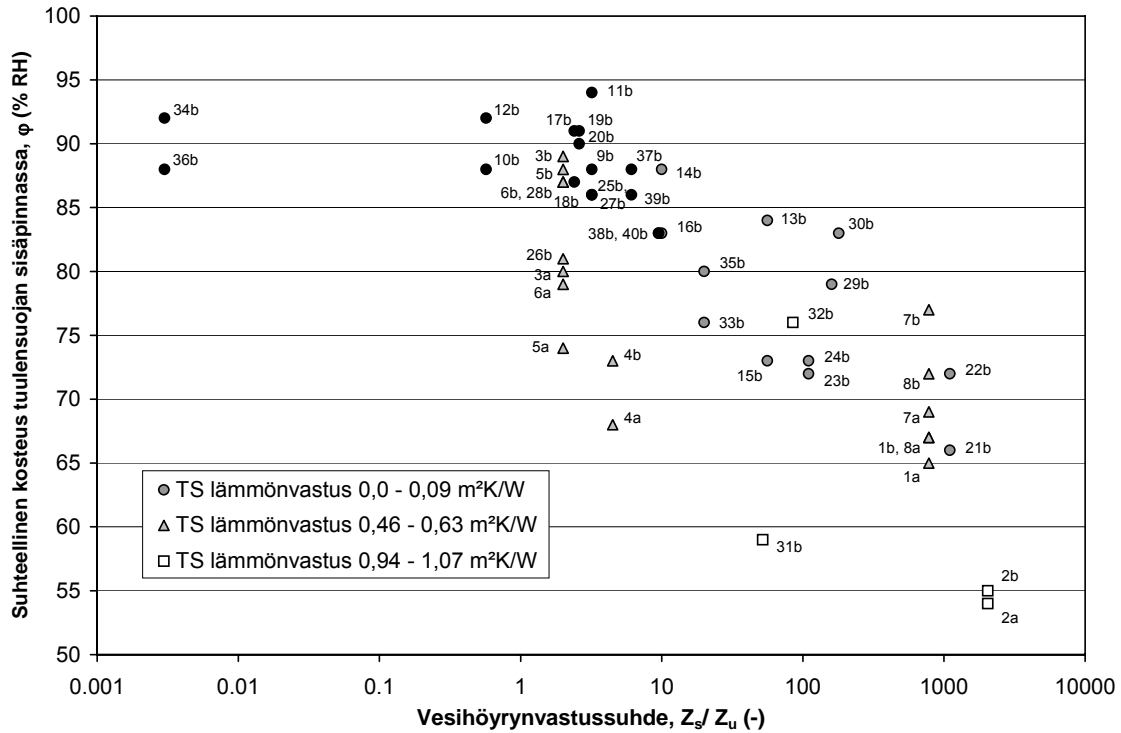


Kuva 10.1 Periaatekuva höyrynsulullisen ja kosteutta läpäisevän puurunkoisen ulkoseinärakenteen kosteusteknisestä toiminnasta talviolosuhteissa. (Vinha 2007)

Kuvassa 10.2 on esitetty koetuloksia TTY:llä tehtyjen puurunkoisten ulkoseinärakenteiden laboratoriokokeista, joissa varioitiin rakenteen sisä- ja ulkopinnan välisen vesihöyrynvastuksen sekä erilaisten tuulensuoja- ja lämmöneristemateriaalien vaikutusta ulkoseinän kosteus-



tekniseen toimintaan. Kuvaan on koottu suhteellisen kosteuden mittaustulokset tuulensuojan sisäpinnasta eri kokeissa talviolosuhteissa (ulkoilman lämpötila oli $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja suhteellinen kosteus 90 \% RH , sisäilman lämpötila oli $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja kosteuslisä 4 g/m^3 ulkoilmaan nähden).



Kuva 10.2 Ulkoseinä- ja katonrakenteiden huokosilman suhteelliset kosteudet tuulensuojan sisäpinnassa rakenteen sisä- ja ulkopinnan välisen vesihöyrynvastussuhteen funktiona. Mittaukset on tehty talviolosuhteissa sisäilman kosteuslisän ollessa 4 g/m^3 . Mustat pallot kuvaavat kokeisiin, joissa tuulensuojan sisäpintaan kondensoitui kosteutta. (Vinha 2007)

Kuvasta 10.2 nähdään, että vesihöyrynvastussuhteen lisääminen paransi yleisesti ottaen seinärakenteiden kosteusteknistä toimintaa. Tämän lisäksi mm. tuulensuojan hyvä lämmöneristyskyky ja pieni vesihöyrynvastus alensivat suhteellista kosteutta tuulensuojan sisäpinnassa.

Rakenteiden toimintaa selvitettiin tarkemmin laskennallisilla tarkasteluilla, joissa käytettiin kosteuden kondensoitumisen ja homeen kasvun kannalta kriittisiä ulkoilman olosuhteita Suomen ilmastossa (Vinha 2007). Laskelmien avulla määritettiin sisäpinnan vesihöyrynvastuksen minimiarvot eri lämmöneriste- ja tuulensuojamateriaaleilla toteutetuille seinärakenteille. Lämmöneristeiden paksuudet olivat laskelmissa 175 mm ja 200 mm . Laskentatulokset on kerätty taulukkoon 10.1. Taulukossa mainittuja alhaisen kosteuskapasiteetin lämmöneristeitä ovat esim. kivivilla, lasivilla ja muovikuitueristeet, keskimääräisen kosteuskapasiteetin eristeitä esim. puukuitu- ja pellavaeristeet ja korkean kosteuskapasiteetin eristeitä esim. puru- ja kutterinlastu.

Tutkimusllostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan



Taulukko 10.1 Sisäpinnan vesihöyrynvastuksen ja sisä- ja ulkopinnan välisen vesihöyrynvastussuhteen minimiarvot, puurunkoisissa ulkoseinärakenteissa, kun sisäilman kosteus talvella on 5 g/m^3 . Arvot on määritetty lähteessä Vinha (2007) esitetyllä menetelmällä käyttäen rakenteiden toiminnan arvioinnissa kosteuden kondensoitumisen ja homeen kasvun kannalta kriittisiä ulkoilman olosuhteita Suomen ilmastossa.

Tuulensuoja	Lämmöneriste					
	Alhainen kosteuskapasiteetti		Keskimääräinen kosteuskapasiteetti		Korkea kosteuskapasiteetti	
	$w_{\text{hygr}} \leq 5 \text{ kg/m}^3$		$w_{\text{hygr}} \approx 15 \text{ kg/m}^3$		$w_{\text{hygr}} \approx 40 \text{ kg/m}^3$	
	Z_s/Z_u	$Z_{v,s}$ $\times 10^3 \text{ s/m}$	Z_s/Z_u	$Z_{v,s}$ $\times 10^3 \text{ s/m}$	Z_s/Z_u	$Z_{v,s}$ $\times 10^3 \text{ s/m}$
Lasivillalevy 30 mm	4:1	6.2	2:1	3.1	2:1	3.1
Huokoinen kuitulevy 25 mm	9:1	38	8:1	34	2:1	8.5
Huokoinen kuitulevy 12 mm	18:1	44	15:1	37	3:1	7.3
Kipsilevy 9 mm	20:1*	53	21:1	55	10:1	26
Kovalevy 4,8 mm	14:1	200	28:1	390	Ei hyväksyttävä	
OSB-lastulevy 12 mm	11:1	790	Ei hyväksyttävä		Ei hyväksyttävä	
Kuusivaneri 9 mm	26:1	220	78:1	650	Ei hyväksyttävä	
Kuusivaneri 9 mm + lasivillalevy 30 mm	6:1	93	7:1	110	5:1	78
Tuulensuojakalvo, $Z_v = 300 \text{ s/m}$	40:1*	12	10:1*	3.0	2:1	0.6
Tuulensuojakalvo, $Z_v = 1000 \text{ s/m}$	41:1	41	31:1	31	2:1	2.0
Tuulensuojakalvo, $Z_v = 3000 \text{ s/m}$	73:1	220	76:1	230	74:1	220
Tuulensuojakalvo, $Z_v = 5000 \text{ s/m}$	110:1	550	Muovikalvo		Ei hyväksyttävä	

Tähdellä (*) merkityissä rakenteissa homeen kasvu oli kriittisempi tekijä rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta kuin kosteuden kondensoituminen.

Taulukosta 10.1 nähdään, että seinärakenteiden sisäpinnalta vaadittava vesihöyrynvastus samoin kuin sisä- ja ulkopinnan välinen vesihöyrynvastussuhde vaihtelevat merkittävästi riippuen käytetystä lämmöneristeestä ja tuulensuojasta. Laskentatulokset osoittavat myös sen, että rakenteen sisä- ja ulkopinnan vesihöyrynvastussuhteen minimiarvo on suuressa osassa tapauksista suurempi kuin 5:1, mikä on annettu nykyisin ohjeeksi RakMK C2 (1998):ssa. Näin ollen tämä ehto ei ole yksistään riittävä seinärakenteen luotettavalle kosteustekniselle toiminnalle edes nykyisillä lämmöneristepakauksilla.

Lisäohjeita seinän sisäpinnalta vaadittavasta vesihöyrynvastuksesta on mahdollista antaa monella eri tavalla. Eräs tapa on antaa höyrynsululle myös vesihöyrynvastuksen minimiarvo vesihöyrynvastussuhteen lisäksi. Jos tuulensuojana käytetään tyypillisimpiä hyvin vesi-

Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan



höyryä läpäiseviä materiaaleja (kipsilevy, huokoinen kuitulevy, mineraalivillalevy, hyvin vesihöyryä läpäisevä tuulensuojakalvo), sisäpinnan vesihöyrynvastus on riittävä silloin, kun se on vähintään $55 \times 10^3 \text{ s/m}$ ($7,5 \times 10^9 \text{ m}^2\text{sPa/kg}$). Tiiviillä tuulensuojilla kuten vanerilla, kovalevyllä ja OSB-lastulevyllä sisäpinnan vesihöyrynvastuksen tulee olla huomattavasti suurempi, mutta tällaisia tuulensuojia ei ole suositeltavaa ylipäättään käyttää yksinään, koska ne hidastavat ylimääräisen kosteuden kuivumista seinärakenteesta oleellisesti.

Taulukosta nähdään kuitenkin, että esim. vaneria voidaan käyttää tuulensuojana silloin, jos sen ulkopuolelle laitetaan erillinen lämmöneristys. Tämä menettely mahdollistaa myös jonkin verran vesihöyrytiiviimpien levyjen käytön tuulensuojana esim. jäykistystarkoituksessa. Tutkimuksen perusteella tuulensuojille on hankala antaa vesihöyrynvastuksen maksimiarvoa, koska tämä riippuu tuulensuojan lämmöneristyskyvystä. Tuulensuojakalvon vesihöyrynvastus tulisi olla pienempi kuin $5 \times 10^3 \text{ s/m}$ ($0,68 \times 10^9 \text{ m}^2\text{sPa/kg}$), mutta hyvin lämpöä eristävällä tuulensuojalla (lämmönvastus $\approx 1,0 \text{ m}^2\text{K/W}$) vesihöyrynvastuksen suositeltavaksi arvo on $15 \times 10^3 \text{ s/m}$ ($2,05 \times 10^9 \text{ m}^2\text{sPa/kg}$). Mikäli tuulensuojana käytetään kalvoa, jonka vesihöyrynvastus on suurempi kuin $1 \times 10^3 \text{ s/m}$ ($0,13 \times 10^9 \text{ m}^2\text{sPa/kg}$) tulee sisäpinnassa käyttää muovikalvoa tai vastaavan vesihöyrynvastuksen omaavaa ainekerrosta. Edellä kerrotun perusteella yksityiskohtaisten ohjeiden antaminen Rakentamismääräyskoelmassa voi olla hankalaa, mutta nykyisiä ohjeita tulee kuitenkin muuttaa, jotta ne takaisivat seinärakenteiden turvallisen toteuttamisen. Eräs mahdollisuus on antaa sisäpinnan vesihöyrynvastukselta vaadittavat arvot taulukkona, jossa muuttujina ovat esim. tuulensuojan vesihöyrynvastus ja lämmönvastus.

Ulkoseinän lämmöneristyspaksuutta lisättäessä riski kosteuden kondensoitumiselle ja homeen kasvulle tuulensuojan sisäpinnassa kasvaa, koska pinnan lämpötila laskee lähemmäs ulkoilman lämpötilaa. Rakenteen toimintaa voidaan tällöin parantaa samalla tavoin kuin aiemmin on kerrottu eli lisäämällä tuulensuojalevyn lämmönvastusta ja vesihöyrynläpäisevyyttä tai höyrynsulun vesihöyrynvastusta. Tarkempien höyrynsulun vesihöyrynvastusarvojen määrittäminen eri rakenteille on mahdollista toteuttaa samaa laskentamenetelmää käyttäen (Vinha 2007), millä taulukon 10.1 arvot on määritetty.

Taulukon 10.1 vesihöyrynvastusarvoja määritettäessä kriittisempi ilmiö oli lähes poikkeuksetta kosteuden kondensoituminen rakenteeseen talviolosuhteissa. Jos talvet lämpenevät tulevaisuudessa ilmaston muutoksen seurauksena, voi rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta kriittisemmäksi tekijäksi muodostuakin homehtumisriski. Näin ollen matala-energiarakenteiden sisäpinnan vesihöyrynvastuksen minimiarvoja määritettäessä tulee laskelemissa arvioida samalla myös ilmastonmuutoksen vaikutuksia.

Samassa tutkimuksessa tarkasteltiin myös seinän sisäosan kosteusteknistä toimintaa tilanteissa, jossa kosteusvirran suunta on ulkoa sisälle päin. Tällöin voi riskinä olla kosteuden kondensoituminen tai homeen kasvu höyrynsulun ulkopinnan lähellä. Tällaisia tilanteita voi



esiintyä ajoittain esim. kesäaikaan ulkoilman suhteellisen kosteuden ollessa korkea. Tutkimuksessa havaittiin, että nykyisissä ulkoilman olosuhteissa tällaista riskiä ei vielä ole, vaikka rakennus olisi jäähdytettykin kesäaikaan. Tilanne voi kuitenkin muuttua, jos ulkoilman lämpötilat ja suhteelliset kosteudet nousevat ilmastonmuutoksen seurauksena kesäaikaan. Lämmöneristeen lisäämisellä ei sen sijaan ole merkittävää vaikutusta tähän ilmiöön.

Puurunkoisissa ulkoseinissä höyrynsulku asennetaan usein n. 50 mm syvyyteen seinän sisäpinnasta, jotta sähkörsiat ja -johdot voidaan asentaa ilmansulkua rikkomatta. Tällaisissa tapauksissa höyrynsulun ulkopuolelle tuleva lisäeristys parantaa rakenteen kosteusteknistä toimintaa, koska paksumpi lämmöneristys nostaa rakenteen lämpötilaa höyrynsulun kohdalla. Tällöin riski homeen kasvulle ja kosteuden kondensoitumiselle höyrynsulun sisäpinnassa vähenee.

Toisaalta lämmöneristystä lisättäessä ongelmaksi tulee se, että kantavan pystyrungon levyttä ei voida enää kasvattaa nykyisestä 200 mm:stä, koska leveämpää sahatavaraa ei ole saatavilla. Tällöin sisäpinnan koolaus saatetaan tehdä leveämmästä sahatavarasta, jolloin höyrynsulku voi tulla liian syvälle rakenteeseen. Tämä lisää kosteuden kondensoitumis- ja homeutumisen riskiä höyrynsulun sisäpinnassa. TTY:llä tehtyjen tutkimusten mukaan 75 % lämmöneristyksestä tulisi olla höyrynsulun ulkopuolella (Vinha 2007). Parempi ratkaisu on tehdä pystyrungon ulkopintaan toinen koolaus, jolloin lämmöneristyksen lisäys tapahtuu höyrynsulun ulkopuolelle.

Kriittisin kohta 50 mm syvyyteen laitettun höyrynsulun sisäpinnassa on pystyrungon kohdalla, koska pystyrunko viilentää höyrynsulun sisäpintaa ja synnyttää siihen helpommin homeen kasvun kannalta otolliset olosuhteet. Tämä voidaan estää tekemällä höyrynsulun sisäpuolelle pystykoalaus samalle kohdalle kuin takana oleva pystyrunko. Tällöin höyrynsulun sisäpinnan lämpötila nousee. Vaihtoehtoisesti rakenteen ulkopinnassa voidaan käyttää hyvin lämpöä eristävää tuulensuojaa tai vaakakoolausta. Jälkimmäinen tapa on ulkoseinän lämpöeristyksen kannalta parempi tapa.

Kuten luvussa 2.9 todettiin, lämmöneristyspaksuuden kasvaminen voi muuttaa puurunkoisen ulkoseinän toteutustapaa siten, että sahatavarasta tehdyn pystyrungon tilalle tulee esim. levyuuma- tai ristikkoratkaisu. Tällöin sisäpuolista lisäkoolausta ei ole enää järkevää käyttää ja vaipan hyvä ilmanpitävyys on vaikeampi saavuttaa sähköasennuksista johtuen. Yksitölkparungon tilalle voi tulla myös eriytetty kaksoistolpparunko, minkä seurauksena saattaa tulla ongelmia rakennusten jäykistyksen järjestämisessä.

10.3 Johtopäätökset

Puurunkoisten ulkoseinärakenteiden nykyiset kosteustekniset suunnitteluohjeet ovat RakMK C2 (1998):ssa puutteelliset eivätkä ne takaa nykyisillä lämmöneristysmääräyksillä toteutettujen seinärakenteiden luotettavaa kosteusteknistä toimintaa kaikissa tilanteissa. Suurim-



massa osassa ulkoseinärakenteita sisäpinnan höyrynsulun vesihöyrynvastus tulee olla suurempi kuin nykyisissä ohjeissa annettu sisä- ja ulkopinnan välinen vesihöyrynvastussuhde 5:1. Tämä asia korostuu edelleen, kun rakenteiden lämmöneristyspaksuutta kasvatetaan, koska rakenteen ulkopinta viilenee. Lämmöneristeen lisäämisen vaikutukset voidaan kuitenkin eliminoida esim. lisäämällä tuulensuojalevyn lämmönvastusta ja vesihöyrynläpäisevyyttä tai höyrynsulun vesihöyrynvastusta.

Lämmöneristeen lisäämisen vaikutukset ja vaadittavat höyrynsulun vesihöyrynvastuksen minimiarvot voidaan selvittää samalla tarkastelumenetelmällä, jolla ulkoseinärakenteiden toimintaa on tarkasteltu nykyisillä eristepaksuuksilla (Vinha 2007). Tätä menetelmää ja siihen liittyviä periaatteita voidaan käyttää soveltuvin osin myös ylä- ja alapohjarakenteiden kosteusteknisen toiminnan tarkastelussa. Uusissa tarkasteluissa tulee ottaa huomioon myös ilmastonmuutoksen aiheuttamat vaikutukset rakenteiden toimintaan.

RakMK C2 (1998) muutettaessa on mietittävä millä tavalla uudet ohjeet annetaan, koska seinän sisäpinnalta vaadittava vesihöyrynvastus riippuu oleellisesti sekä tuulensuojan että lämmöneristeen rakennusfysikaalisista ominaisuuksista. Eräs mahdollisuus on antaa vaaditut minimiarvot taulukossa.

Höyrynsulkumuovia voidaan käyttää n. 50 mm syvyydellä seinän sisäpinnasta, jos vähintään 75 % lämmöneristeestä on höyrynsulun ulkopuolella. Lisäksi höyrynsulun sisäpuolelle tulee laittaa pystykoolaus tai vaihtoehtoisesti pystyrungon ulkopintaan hyvin lämpöä eristävä tuulensuoja tai vaakakoolaus.

Jos ulkoilman lämpötilat ja suhteelliset kosteudet nousevat ilmastonmuutoksen seurauksena, olosuhteet muuttuvat ulkoseinän ulko-osissa entistä suotuisammiksi homeen kasvulle. Tällöin myös höyrynsulkumuovin ulkopinnassa voi esiintyä homeen kasvun kannalta suotuisia olosuhteita kesäaikaan jäähdytetyissä rakennuksissa.

11. MASSIIVIRAKENTEET

11.1 Yleistä

Nykyisin käytössä olevia massiivirakenteita ovat muun muassa hirsi- ja kevytbetonirakenteiset ulkoseinät. Lämmöneristysmääräysten kiristyminen nyt ehdotetulla tavalla poistaa käytännössä kokonaan mahdollisuuden massiivirakenteiden käyttöön kevytbetoniseinissä ja tekee sen hirsiseinissäkin vaikeaksi toteuttaa.

Massiivirakenteiset ulkoseinät ja yläpohjat toimivat kosteusteknisesti turvallisesti, koska niissä ei ole rakennekerrosten välisiä rajapintoja, joihin kosteus voi tiivistyä. Lämmöneristerakenteiden lisääminen massiivirakenteeseen voi kuitenkin aikaansaada kosteuden tiivisty-



mistä rakenteen rajapintoihin tai homeenkasvulle otolliset olosuhteet rakenteessa. Tämä ongelma korostuu erityisesti korjausrakentamisessa.

Massiivirakenteiset talot kuluttavat myös vähemmän lämpöenergiaa kuin U-arvojen perusteella on laskettu. Tämä johtuu siitä, että massiivirakenteet varastoivat auringosta tulevaa lämpöenergiaa. Lisäeristäminen vähentää myös auringon lämpöenergian varastoitumista seinään siltä puolelta, johon lisäeristys tehdään.

Massiivirakenteen sisäpuolinen lämmöneristys heikentää rakenteen kosteusteknistä toimintaa käytettävästä lämmöneristeestä riippumatta, koska massiivirakenne tässä tilanteessa viilenee. Massiivirakenteen sisäpinnassa voi esiintyä paljon herkemmin homeen kasvun kannalta otollisia olosuhteita tai kosteuden kondenssia. Rakenne kuivuu hitaammin kuin lisäeristämätön rakenne ja sen kosteuspitoisuus jää korkeammalle tasolle. Sisäpuolinen lämmöneriste estää myös ikkunoista tulevan lämpösäteilyn varautumista vaipparakenteisiin. Mikäli vanhoille rakennuksille asetetaan tulevaisuudessa lämmöneristysmääräyksiä korjauksen yhteydessä, joudutaan korjauksissa turvautumaan usein sisäpuoliseen lämmöneristämiseen.

Kun massiivirakenteeseen tehdään lisäeristys ulkopuolelle avohuokoista lämmöneristettä käyttäen, rakenteen kosteustekninen toiminta yleensä paranee. Samalla kuitenkin menetetään merkittävä osa rakenteen lämmönvarauskyvystä, koska auringonsäteily ei pääse lämmittämään massiivirakenteen pintaa ulkoa päin. Joissakin tapauksissa, kuten esim. hallirakennusten kevytbetonikatoissa, kyse voi olla merkittävästä ilmaisen lämpöenergian vähenemisestä vuositasolla. Korjauskohteissa ulkopuolinen seinärakenteiden lisälämmöneristämisen ei ole myöskään aina mahdollista, koska julkisivut ovat monissa tapauksissa suojeltuja.

Tässä tutkimuksessa massiivirakenteiden toimintaa tarkasteltiin kahdelta kannalta. Massiivirakenteiden lämmönvarauskyvyn merkityksestä rakennuksen energiankulutukseen tehtiin suppea kirjallisuusselvitys, jossa aineistona käytettiin TTY:n Talonrakennustekniikan sekä Energia- ja prosessitekniikan laitosten tutkimusjulkaisuja. Lisäksi lämmöneristykseen lisäyksen vaikutusta massiivirakenteiden kosteustekniseen toimintaan arvioitiin WUFI 2D-ohjelmalla tehdyillä esimerkkilaskelmilla.

11.2 Kirjallisuusselvitys

Massiivisen rakennusvaipan suuri lämpökapasiteetti vaikuttaa lämmitys- ja jäähdytysenergian kulutukseen ja tarvittaviin tehoihin sekä erityisesti kesäajan sisälämpötiloihin ja edelleen termiseen viihtyisyyteen. Euroopassa massiivisuutta on hyödynnetty perinteisesti nimenomaan kesäajan viihtyisyyden parantamisessa, kun taas Yhdysvalloissa massiivisuudella on pyritty vähentämään jäähdytysenergian kulutusta. Massan vaikutus voidaan hyödyntää joko passiivisesti tai aktiivisesti (esim. upottamalla lämmitys-/ jäähdytysputkistot massiivi-

Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan



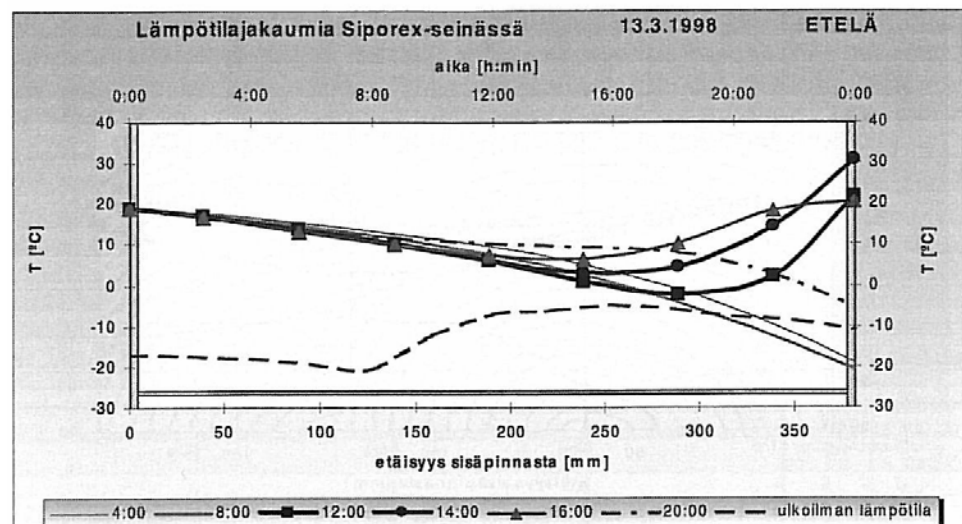
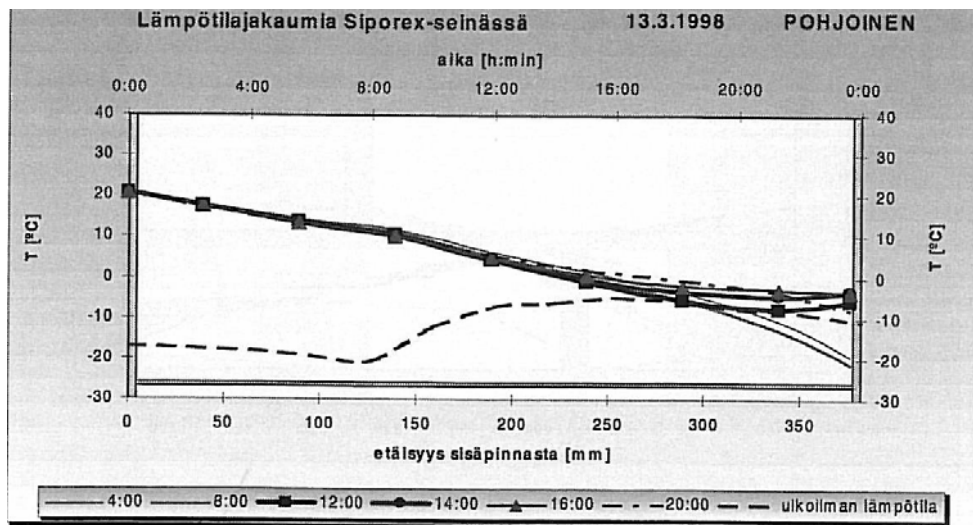
seen laattaan). Massiivisuuden vaikutuksia on tutkittu 1980-luvulta saakka. Nykyinen tutkimus keskittyy lähinnä aktiivisten ratkaisujen kehittämiseen. Passiivisen massiivisuuden vaikutuksen rakennuksen lämmitysenergian kulutukseen on arvioitu olevan noin 5–15 %. Tehokkaasti massiivisuutta hyödyntäväksi menetelmäksi on Euroopassa todettu rakennusten yötuuletus. Yötuuletuksella tarkoitetaan yöaikaista tehostettua ilmanvaihtoa ilman koneellista jäähdytystä. Menetelmä sopii käytettäväksi erityisesti toimistoissa ja julkisissa rakennuksissa. Massiivisissa rakennuksissa yötuuletus pienentää jäähdytystehoa suurimmillaan 40 % ja jäähdytysenergiaa 20 %. (Hietamäki et al. 2003).

Vaipparakenteiden sisäpuolisen lämpökapasiteetin vaikutus otetaan tällä hetkellä huomioon rakennusten energiasuunnittelussa RakMK D5 (2007):ssa esitetyn aikavakion avulla. Aikavakio τ on rakennuksen koosta riippumaton, lämpökapasiteettia kuvaava suure. Rakennuksen aikavakio määritetään kaavalla $\tau = C/H$, jossa C on rakennuksen sisäinen lämpökapasiteetti ja H on rakennuksen ominaislämpöhäviö. Sisäinen lämpökapasiteetti ei ota huomioon lämmöneristekerroksen ulkopuolista lämpökapasiteettia.

Tehtyjen tutkimusten mukaan myös ulkopinnan massiivisuus vähentää rakennuksen lämpöenergian kulutusta. Auringon säteily lämmittää vaipan ulkopintaa ja lämpöenergiaa varastoituu massiiviseen rakenteeseen. TTY:n Rakennustekniikan laitoksella tutkittiin 1990-luvun lopulla ulkoseinärakenteiden vaikutusta rakennuksen energiankulutukseen. Tarkasteluissa seurattiin kuuden koerakennuksen energiankulutusta. Rakennuksista kolmessa seinärakente oli massiivinen, yhdessä rankarakenteinen ja kahdessa ulkopuolelta eristetty massiivirakenne. Muilta rakenneosiltaan koerakennukset olivat identtisiä. Seinärakenteiden U-arvot vaihtelivat 0,17–0,86 W/m²K, joista kokonaan massiivirakenteisten seinien U-arvot olivat kaikkein heikoimmat. Koerakennusten olosuhteita ja energiankulutusta seurattiin jatkuvilla mittauksilla ja saatuja tuloksia verrattiin laskennallisiin energiankulutusarvoihin (Lindberg et al. 1998). Koska tutkimuksen tulokset on julkaistu jo vuonna 1998, on laskennassa seurattu edellisen RakMK D5 (1985) ohjeita. Nykyinen RakMK D5 (2007) poikkeaa tästä muun muassa pinta-alojen laskennassa.

Koerakennusten seinistä mitattiin lämpötiloja sisä- ja ulkopinnoissa sekä rakenteen sisältä. Seinän lämpötilajakauma oletetaan usein lineaariseksi ja vuorokauden pituisina jaksoina vakioksi. Oletetussa jatkuvuustilassa lämpövirran tiheys on vakio jokaisessa poikkileikkauksessa eli lämpöä ei varastoidu. Jatkuvuustarkastelu vastaa todellisuutta parhaiten materiaaleilla, joilla on pieni lämpökapasiteetti. Lämmön varastoitua rakennusmateriaaliin, seinän lämpötilajakauma muuttuu epälineaariseksi. Lämpöä varastoituu muun muassa auringon säteilystä. Säteilyn vaikutus on selvimmin havaittavissa aurinkoisina ja kylminä päivinä lämpöä varaavissa eteläseinissä. Lämpöä johtuu säteilyn lämmittämistä ulkopinnoista viileämpiä sisäosia kohti, vaikka ulkoilman lämpötila on alempi kuin sisäilman (Lindberg et al. 1998). Massiivisen seinärakenteen lämpötilajakaumat yhden vuorokauden aikana maaliskuussa 1998 on esitetty kuvassa 11.1.

Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan



Kuva 11.1 Massiivirakenteisen kevytbetoniseinän lämpötilajakaumat aurinkoisena ja kylmänä päivänä pohjois- ja eteläjulkisivuilla. Sisäpinnan lämpötila on 20 °C ja ulkolämpötila vaihtelee -20 °C:sta -10 °C:een. (Lindberg et al. 1998)

Kaikissa koerakennuksissa mitattu energiankulutus oli pienempi kuin laskennallinen kulutus. Eniten eroja mitatun ja laskennallisen energiankulutuksen välillä (31 %) oli eristetyllä tiiliseinällä, jonka tumma, massiivinen tiili-ulkoverhous pystyi absorboimaan ja varastoimaan auringon säteilyenergiaa. Seuraavaksi suurin prosentuaalinen ero oli kevytbetoniseinällä (21 %). Auringon säteilyn ilmaisenergia oli yksi energiankulutukseen vaikuttavista tekijöistä. Tosin sitä merkittävämmiksi tekijöiksi todettiin materiaalien lämmönjohtavuusarvojen poikkeaminen todellisuudesta sekä rakennuksen pinta-alan laskentamenetelmä. (Lindberg et al. 1998) Sekä materiaaliarvot että pinta-alojen laskentamenetelmä ovat tarkentuneet tutkimuksen julkaisun jälkeen. Tutkimusten perusteella lämmönkulutus voi vähentyä massiivirakenteisilla ulkoseinillä toteutetuissa rakennuksissa vuositasolla n. 5–10 % seinän ulko-osan

Tutkimuslöstuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan

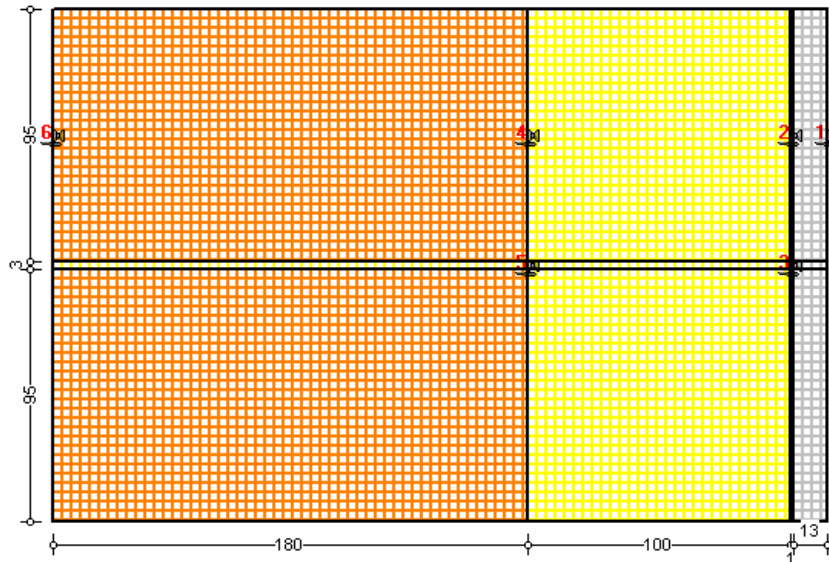


lämmönvarauskyvyn vaikutuksesta. Jos myös katto on massiivirakenteinen, voi lämmönkulutus vähentyä merkittävästi enemmänkin.

Lämmönkulutuksen vähentyminen rakennuksen vaipparakenteisiin kohdistuvan auringon säteilyn johdosta riippuu muun muassa rakennuksen maantieteellisestä sijainnista, ympärillä olevasta varjostuksesta, pintojen värityksestä ja vaipassa mahdollisesti olevan lämmöneristekerroksen paksuudesta. Tämän vuoksi lämmönkulutuksen pienenemisen arviointi eri tilanteissa on hankalaa ja ilmiön mukaan ottaminen energiankulutuslaskelmiin on haasteellista.

11.3 Laskennalliset tarkastelut

Kosteustekniset laskentatarkastelut tehtiin massiivihirsiseinälle, jonka sisäpuolelle lisättiin mineraalivillaeristys. Tarkastelun muuttujina olivat lämmöneristeen paksuus sekä sisäpinnan kalvon vesihöyrynvastus. Rakenteiden mallinnuksessa jouduttiin tekemään yksinkertaistuksia, johtuen laskentaohjelman ja aikataulun rajoituksista. Muun muassa viistosadetta tai auringon säteilyä ei otettu laskennassa huomioon. Laskennan tarkastelupisteet 1-6 olivat rakenteen rajapinnoissa, pisteet 2 ja 3 höyrynsulun takana ja pisteet 4 ja 5 hirren ja mineraalivillan välissä. Piste 5 oli pystysuunnassa hirsien välisen sauman kohdalla ja piste 4 n. 50 mm etäisyydellä saumasta ehjän hirren kohdalla (kuva 11.2).



Kuva 11.2 Sisäpuolelta lisäeristetyin hirsiseinärakenteen laskentamalli. Rakennekerrokset oikealta: kipsilevy 13 mm, ilman-/höyrynsulku (materiaali vaihteli), mineraalivilla (paksuus vaihteli), massiivihirsi 180 mm. Tarkastelupisteitä oli 6 kpl.

Laskelmissa keskityttiin kosteuden kondensoitumisriskitarkasteluihin, koska kondensoitumista arvioitiin tapahtuvan ko. hirsiseinärakenteessa herkemmin talviolosuhteissa kuin ho-



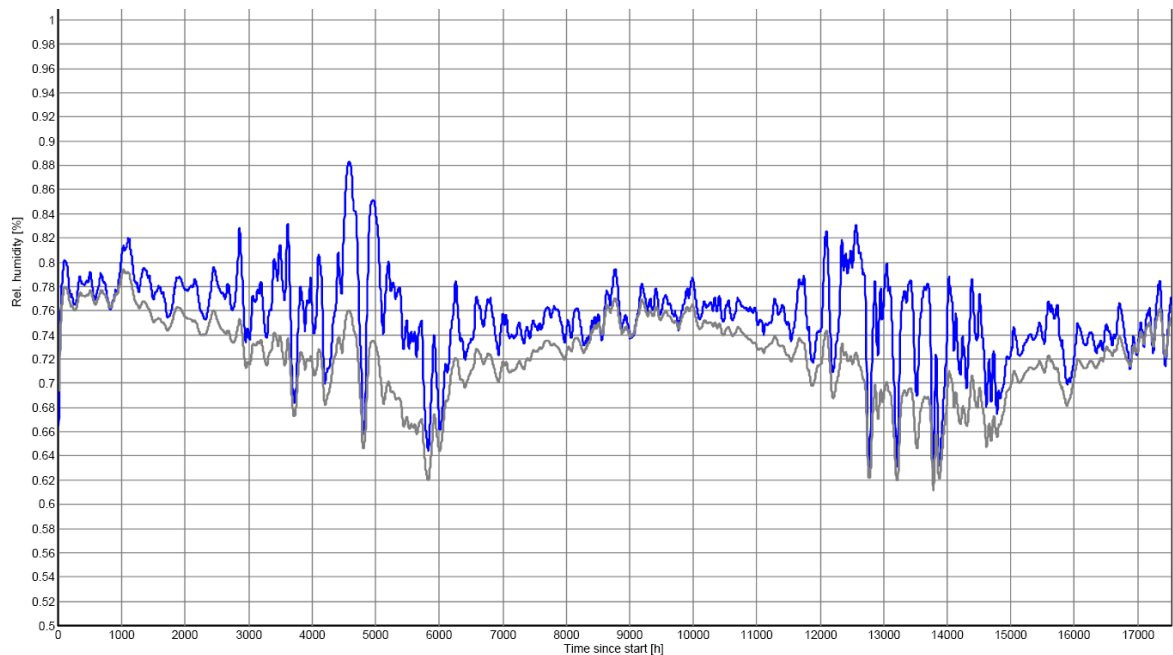
mehtumista syysolosuhteissa. Kokonaisvaltainen rakenteiden kosteusteknisen toiminnan tarkastelu edellyttää kuitenkin kummankin riskin tarkastelua kriittisissä olosuhteissa.

Tarkasteluissa määritettiin rakenteen kosteusolosuhteet rajapinnoissa useamman vuoden (2–8 vuotta) ajanjaksoilla, kun ulkoilman olosuhteet noudattivat kondenssin kannalta kriittisen vuoden, Sodankylä 1985-86, olosuhteita (Vinha 2007). Sisäilman olosuhteet olivat vakiot (lämpötila 21 °C ja kosteuslisä talvella 5 g/m³). Hirren alkukosteus oli 18 paino-%. Muutamia vertailulaskelmia tehtiin myös kosteammalle hirrelle, jonka alkukosteus oli 24 paino-%. Muiden materiaalien alkukosteus vastasi 60 % RH -olosuhteita.

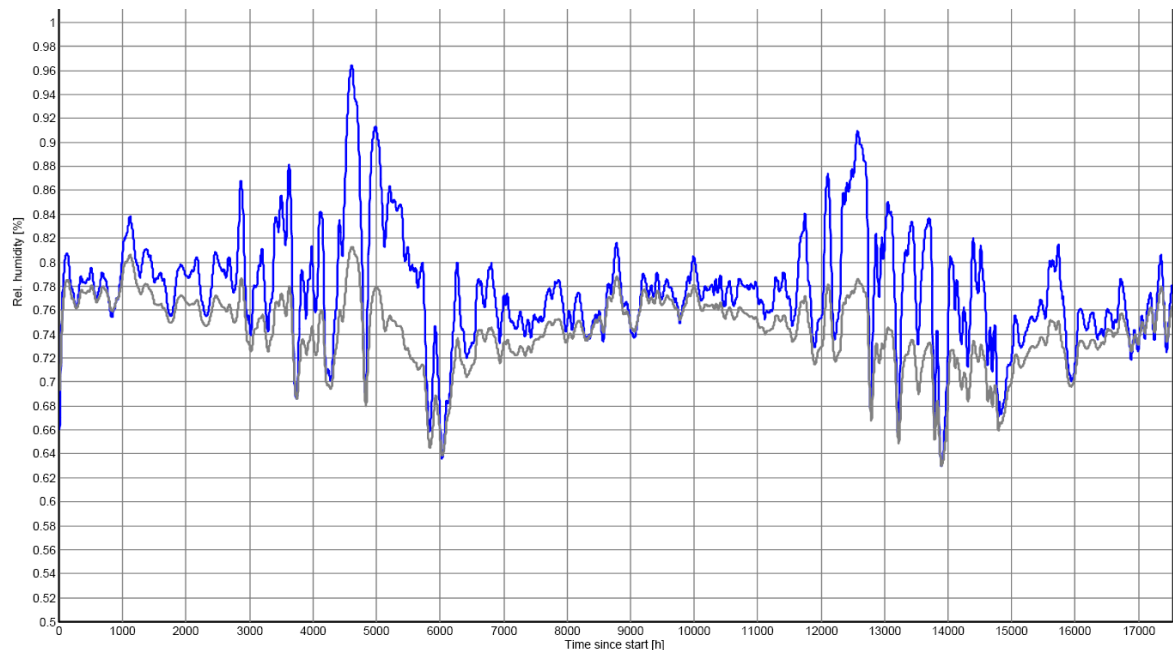
Laskentatarkastelut suoritettiin seitsemälle erilaiselle seinärakenteelle, jotka kuvasivat pääpiirteissään tulevia lämmöneristysmääräysten kiristyksiä. U-arvot rakenteille laskettiin käsin. Kaikille seinärakenteille ei laskettu vertailulaskelmia pisimmillä ajanjaksoilla eikä eri hirren kosteuspitoisuuksilla.

- Seinä 1: Nykyinen U-arvovaatimus 0,24 W/(m²K). Lämmöneristeenä oli 100 mm mineraalivillaa ja höyrynsulkuna muovikalvo ($Z_v = 3330 \times 10^3$ s/m).
- Seinä 2: 30 % kiristys U-arvossa 0,17 W/(m²K). Lämmöneristeenä oli 150 mm mineraalivillaa ja höyrynsulkuna muovikalvo ($Z_v = 3330 \times 10^3$ s/m).
- Seinä 3: 42 % kiristys U-arvossa 0,14 W/(m²K). Lämmöneristeenä oli 200 mm mineraalivillaa ja höyrynsulkuna muovikalvo ($Z_v = 3330 \times 10^3$ s/m).
- Seinä 4: 30 % kiristys U-arvossa 0,17 W/(m²K). Lämmöneristeenä oli 150 mm mineraalivillaa ja höyrynsulkuna muovitiivistyspaperi ($Z_v = 366 \times 10^3$ s/m).
- Seinä 5: Nykyinen U-arvovaatimus 0,24 W/(m²K). Lämmöneristeenä oli 100 mm mineraalivillaa ja ilmansulkuna bitumivuorauspaperi ($Z_v = 5,1 \times 10^3$ s/m).
- Seinä 6: 30 % kiristys U-arvossa 0,17 W/(m²K). Lämmöneristeenä oli 150 mm mineraalivillaa ja ilmansulkuna bitumivuorauspaperi ($Z_v = 5,1 \times 10^3$ s/m).
- Seinä 7: Massiivihirsi 180 mm U-arvo 0,6 W/(m²K). Vertailulaskelma.

Suurin riski kosteuden kondensoitumiselle oli hirren ja mineraalivillan rajapinnassa ehjän hirren kohdalla (tarkastelupiste 4). Lasketuissa esimerkeissä kondenssia ei esiintynyt seinärakenteen rajapinnoissa nykyiset vaatimukset täyttävällä lämmöneristepaksuudella (kuva 11.3). Kun lämmöneristepaksuutta kasvatettiin seinissä 2-4, suhteellinen kosteus hirren ja mineraalivillan rajapinnassa pysyi lähellä kondenssirajaa pidempiä aikoja talvikausilla kuin seinällä 1. Kondenssiraja saavutettiin kuitenkin vain yksittäisissä tapauksissa (kuvat 11.4 – 11.5).

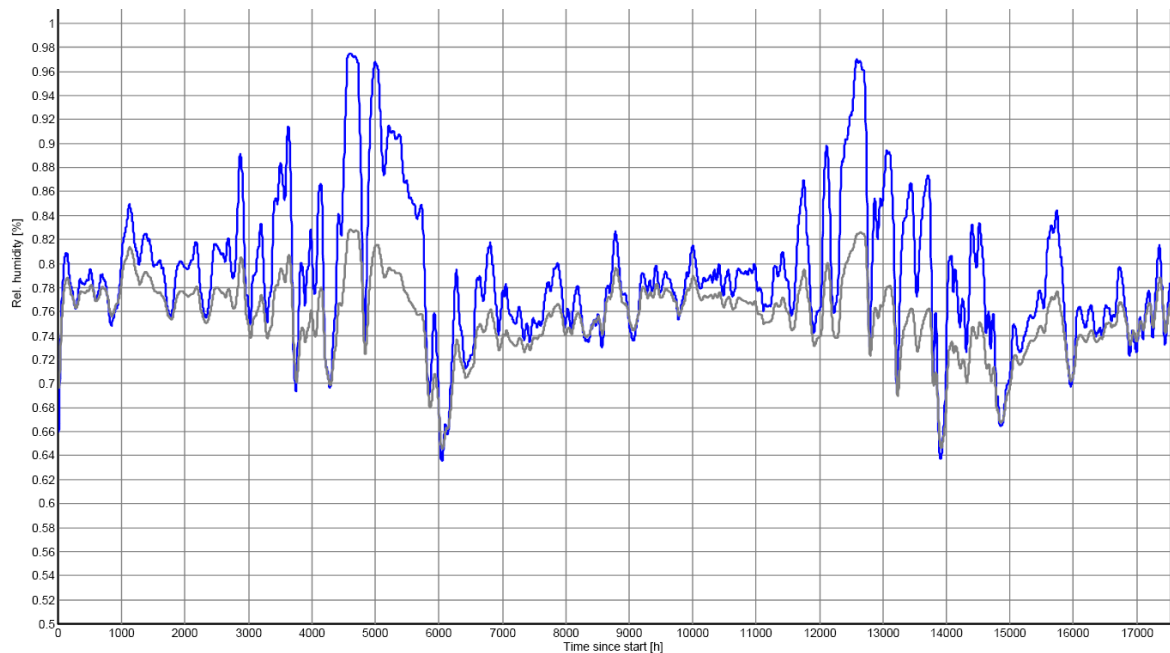


Kuva 11.3 Sisäpuolelta lisäeristetyin hirsiseinärakenteen suhteelliset kosteudet kahden vuoden laskenta-ajalla U -arvon $0,24 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ täyttävässä seinärakenteessa, kun rakenteen sisäpinnassa on höyrynsulkumuovi. Sininen käyrä ilmoittaa suhteellisen kosteuden hirren ja mineraalivillan rajapinnassa hirren puolivälissä ja harmaa käyrä hirsien välisen sauman kohdalla. Kondenssiraja on laskennassa 97 \% RH .



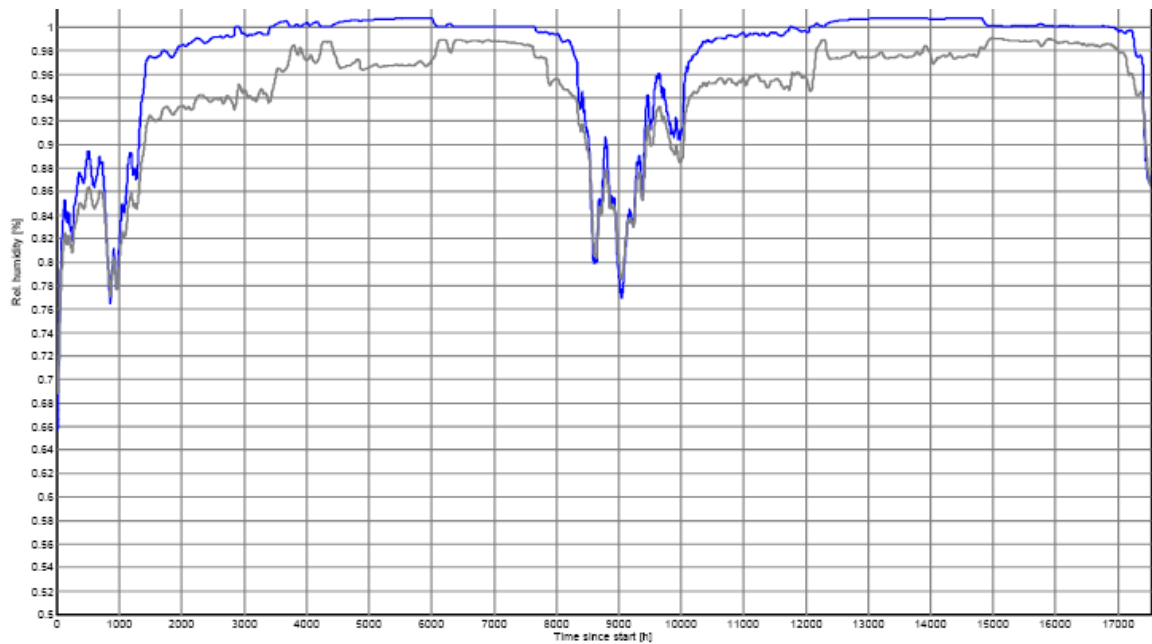
Kuva 11.4 Sisäpuolelta lisäeristetyin hirsiseinärakenteen suhteelliset kosteudet kahden vuoden laskenta-ajalla U -arvon $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ täyttävässä seinärakenteessa, kun rakenteen sisäpinnassa on höyrynsulkumuovi. Sininen käyrä ilmoittaa suhteellisen kosteuden hirren ja mineraalivillan rajapinnassa hirren puolivälissä ja ja harmaa käyrä hirsien välisen sauman kohdalla. Kondenssiraja on laskennassa 97 \% RH .

Tutkimuslaskutuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan



Kuva 11.5 Sisäpuolelta lisäeristetyin hirsiseinärakenteen suhteelliset kosteudet kahden vuoden laskenta-ajalla U -arvon $0,14 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ täyttävässä seinärakenteessa, kun rakenteen sisäpinnassa on höyrnsulkumuovi. Sininen käyrä ilmoittaa suhteellisen kosteuden hirren ja mineraalivillan rajapinnassa ehjän hirren kohdalla ja harmaa käyrä hirsien välisen sauman kohdalla. Kondenssiraja on laskennassa 97 % RH.

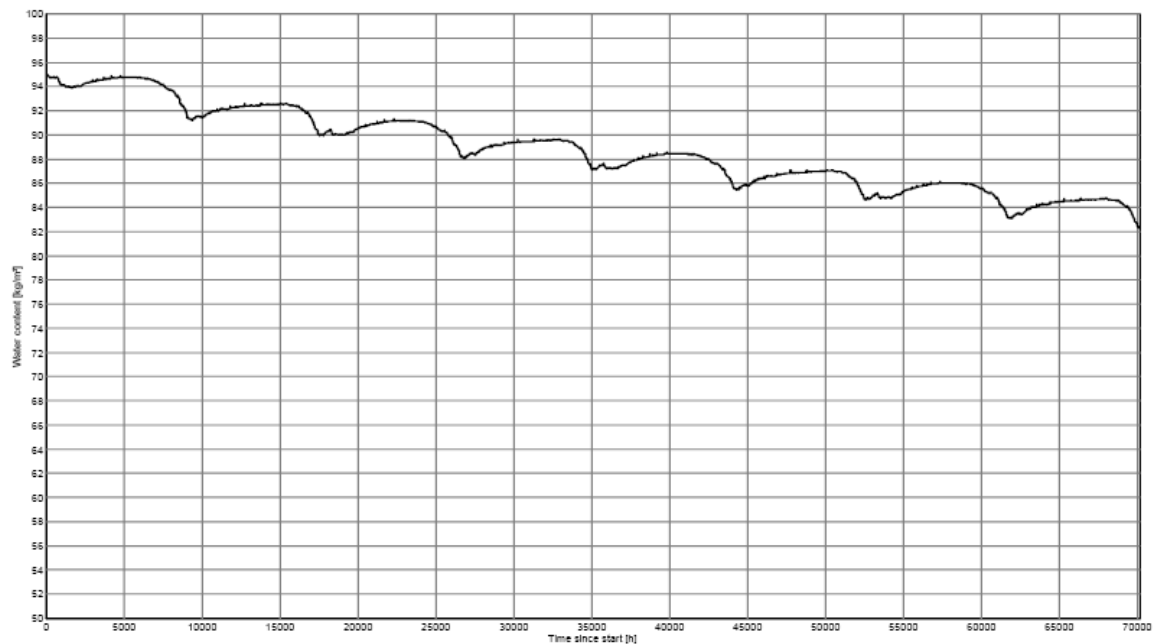
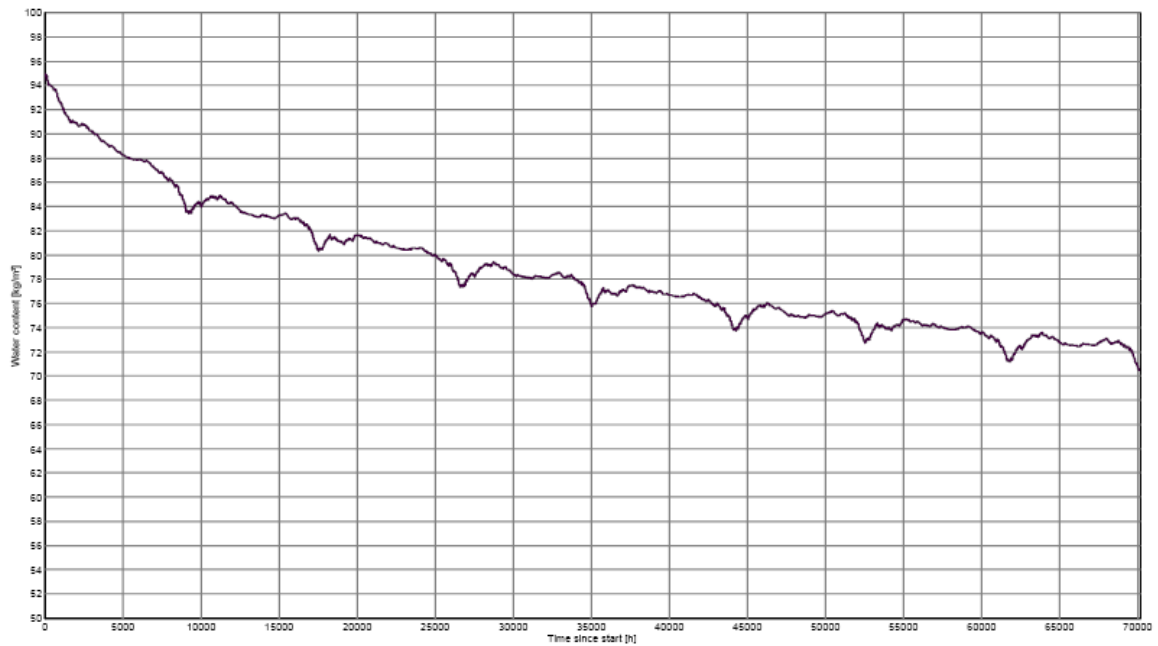
Kuvissa 11.3 – 11.5 on huomionarvoista se, että seinärakenteiden kondensoitumisriski lisääntyi lämmöneristettä lisättäessä, vaikka seinän sisäpinnassa oli kaikissa tapauksissa höyrnsulkumuovi. Muovikalvon muuttaminen muovitiivistyspaperiksi ei vaikuttanut merkittävästi suhteellisen kosteuden tasoon hirsiseinän sisäpinnassa, vaikka muovitiivistyspaperin vesihöyrnsvastus oli oleellisesti pienempi kuin muovikalvolla. Sen sijaan seinärakenteissa 5 ja 6, joissa sisäpinnan kalvon vesihöyrnsvastus oli vielä huomattavasti tätäkin pienempi, hirren ja mineraalivillan rajapinnassa esiintyi lähes jatkuva kondenssi (kuva 11.6). Bitumipaperia käytettäessä kosteuden kondensoituminen hirren sisäpintaan oli voimakasta myös nykyistä U -arvoa vastaavassa seinärakenteessa.



Kuva 11.6 Sisäpuolelta lisäeristetyin hirsiseinärakenteen suhteelliset kosteudet kahden vuoden laskenta-ajalla U -arvon $0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$ täyttävässä seinärakenteessa, kun rakenteen sisäpinnassa on hyvin kosteutta läpäisevä ilmansulku. Sininen käyrä ilmoittaa suhteellisen kosteuden hirren ja mineraalivillan rajapinnassa ehjän hirren kohdalla ja harmaa käyrä hirsien välisen sauman kohdalla. Kondenssiraja on laskennassa 97 % RH.

Seinärakenteilla 5 ja 6 tehdyt vertailulaskelmat osoittivat, että kondenssiajat pitenevät myös kosteutta läpäisevällä ilmansululla toteutetussa rakenteessa lämmöneristyspaksuuden kasvaessa. Näin ollen bitumipaperien ja vastaavien ilmansulkukalvojen käyttö on jatkossa entistä riskialttiimpaa sisäpuolelta lisäeristetyissä hirsiseinärakenteissa.

Vertailulaskelmilla määritettiin myös rakenteiden kosteuspitoisuuksia kahdeksan vuoden laskenta-ajalla massiiviselle hirsiseinälle ja lisäeristetyille ratkaisulle (kuva 11.7). Sisäpuolinen lämmöneriste hidasti rakenteen kuivumista ja rakenteen lopullinen kosteus jäi korkeammalle tasolle. Muovitiivistyspaperin käyttö ei nopeuttanut rakenteen kuivumista muovikalvoon verrattuna. Kosteutta läpäisevää bitumipaperia käytettäessä kuivuminen hidastui entisestään, koska sisäilmasta virtasi kosteutta lisää rakenteeseen.



Kuva 11.7 Ylhäällä massiivihirren ja alhaalla sisäpuolelta lisäeristetyin hirsiseinän rakennekosteuden muutos kahdeksan vuoden laskenta-ajalla. Lisäeristetyin seinän U -arvo on $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$. Hirren alkukosteus on 18 paino-%.

Laskentatarkastelujen tulosten arvioinnissa tulee ottaa huomioon, että tarkastelut on tehty vain yksittäisille erikseen valituille rakenteille, eikä niitä voida yleistää koskemaan kaikkia lisäeristettyjä seinärakenteita. Esim. hirsiseinän paksuutta pienennettäessä kosteuden kondensoitumisriski kasvaa, koska hirren sisäpinta viilenee. Toisaalta hirren kuivuminen tapahtuu tällöin nopeammin, koska hirressä olevan ylimääräisen kosteuden määrä on vähäisem-

Tutkimuslousuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan



pi. Laskennassa ei ole otettu huomioon myöskään esim. mahdollisia viistosateesta aiheutu-
via vesivuotoja eristetilaan tai sisäpinnan höyrynsulussa olevia mahdollisia reikiä. Näissä
tapauksissa rakenteen kosteustekniset riskit ovat huomattavasti tässä esitettyjä suuremmat.

Merkittävää laskennan tuloksissa on kondenssiriskin kasvu lämmöneristepaksuutta lisättä-
essä ja erityisesti sen merkittävä kasvu, kun sisäpuolinen vesihöyrynvastus ei ole riittävä.

11.4 Johtopäätökset

Massiivirakenteisissa ulkoseinissä ja yläpohjissa ei ole rakennekerrosten välisiä rajapintoja,
joihin kosteus voi tiivistyä tai joissa voi syntyä homeen kasvua. Lämmöneristysmääräysten
kiristyminen ehdotetussa muodossaan estää/ vaikeuttaa täysin massiivisten rakenteiden
käyttöä.

Massiivirakenteen sisäpuolinen lämmöneristys heikentää rakenteen kosteusteknistä toimin-
taa käytettävästä lämmöneristeestä riippumatta, koska massiivirakenne viilenee. Tällöin
massiivirakenteen sisäpinnassa voi esiintyä paljon herkemmin kosteuden kondenssia tai
homeen kasvun kannalta otollisia olosuhteita. Pahin tilanne syntyy silloin, jos sisältä pääsee
virtaamaan kosteaa ilmaa lämmöneristeen taakse massiivirakenteen sisäpintaan.

Laskentatarkastelujen perusteella kondenssiriski lämmöneristeen ja massiivisen seinära-
kenteen rajapinnassa kasvoi sisäpuolelta eristetyssä rakenteessa erityisesti silloin, kun sei-
närakenteen sisäpinnan vesihöyrynvastus ei ollut riittävä. Näin ollen kosteutta läpäiseviä
ilmansulkukalvoja ei tule käyttää tällaisten rakenteiden sisäpinnassa. Huomionarvoista on
kuitenkin se, että kondenssiriski kasvoi siinäkin tapauksessa, että rakenteen sisäpinnassa
oli höyrynsulkumuovi. Massiivinen seinärakenne myös kuivui laskentatarkasteluissa hi-
taammin ja rakenteen lopullinen kosteuspitoisuus jäi korkeammalle tasolle. Sisäpuolinen
lämmöneriste estää myös ikkunoista tulevan lämpösäteilyn varautumista vaipparakenteisiin.

Sisäpuolelta eristettyjen massiivirakenteiden kosteusteknistä toimintaa tulee kartoittaa laa-
jempien laskentatarkastelujen avulla, jotta voidaan määrittää kriittiset lämmöneristyspak-
suudet rakenteiden suunnittelua ja toteuttamista varten. Näissäkin laskelmissa tulee ottaa
huomioon myös ilmastonmuutoksen aiheuttamat vaikutukset. Massiivirakenteisten seinien
toimintaa voidaan tutkia saman tarkastelumenetelmän avulla, jota on käytetty puurunkoisten
ulkoseinärakenteiden toiminnan arvioinnissa (Vinha 2007).

Mikäli vanhoille rakennuksille asetetaan tulevaisuudessa lämmöneristysmääräyksiä korja-
uksen yhteydessä, joudutaan korjauksissa turvautumaan monissa tapauksissa sisäpuoli-
seen lämmöneristämiseen, koska rakenteita ei voida tai haluta lisäeristää ulkopuolelta. Tä-
mä lisää merkittävästi riskiä rakenteiden kosteusvaurioille. Sisäpuolisen lämmöneristämisen
aiheuttamat riskit onkin arvioitava huolellisesti korjausrakentamiseen kohdistuvia määräyk-
siä suunniteltaessa.



Jos massiivirakenteeseen tehdään lisäeristys ulkopuolelle avohuokoista lämmöneristettä käyttäen, rakenteen kosteustekninen toiminta yleensä paranee, mutta samalla menetetään merkittävä osa rakenteen lämmönvarauskyvystä, koska auringonsäteily ei pääse lämmittämään enää massiivirakenteen pintaa ulkoa päin. Joissakin tapauksissa, kuten esim. kevyt-betonikatoissa, kyse on merkittävästä ilmaisen lämpöenergian vähenemisestä vuositasolla.

Rakenteiden massiivisuutta voidaan hyödyntää etenkin jäähdytysenergian kulutuksen alentamisessa sekä kesäajan viihtyisyyden parantamisessa esim. yötuuletuksen avulla, kuten RakMK D3 (2007):ssä on todettu. Tämä mahdollisuus tulisi ottaa huomioon uusien rakennusten energiasuunnittelussa. Lämmöneristekerroksen ulkopuoliset massat vaikuttavat myös rakenteen lämpötilajakaumaan ja edelleen lämmitysenergian kulutukseen, mutta vaihtuksen suuruuden arviointi eri tilanteissa on hyvin hankalaa. Tästä johtuen ilmiön mukaan ottaminen energiankulutuskalkeelmiin on haasteellista.

12. RAKENNUSTEN JÄÄHDYTYS

12.1 Yleistä

Ilmaston lämpeneminen, sisäisten lämpökuormien lisääntyminen ja rakennusten lämmöneristuksen lisääminen lisäävät rakennusten viilennyksen ja koneellisen jäähdytyksen tarvetta. Tarve jäähdytykselle vaihtelee huomattavasti rakennustyyppin, rakennuksen sijainnin, massiivisuuden, tilojen sijainnin ja tilojen käytön mukaan.

Jäähdytystä tarkasteltaessa tulee arvioida erikseen jäähdytyksen nettotarve sen mukaan, mikä sisälämpötila on tavoitteena. Tämän jälkeen pitää arvioida, kuinka paljon jäähdytystarpeesta voidaan hoitaa ilman koneellista jäähdytystä ilmanvaihtoa lisäämällä ja esim. yötuuletuksella. Loppu jäähdytystarpeesta voidaan hoitaa koneellisella jäähdytyksellä. Jäähdytyksen kokonaishyötysuhde vaihtelee riippuen toteutustavasta ja laitteista. Sähköä kuluu alle puolet jäähdytyksen nettotarpeesta. Jäähdytysenergian nettotarve on tällä hetkellä hieinan vuoden 2003 rakentamismääräysten vaatimuksia paremmin eristetyissä pientaloissa 3-13 kWh/m² eli keskimäärin suuruusluokaltaan lähes 10 kWh/m² ja asuinkerrostaloissa selkeästi suurempi eli suuruusluokaltaan 20 kWh/m² (Kalema et al. 2006). Laskelmissa on kuitenkin suuri epätarkkuus. Jos puolet esitetyistä keskimääräisistä jäähdytystarpeista katettaisiin koneellisella jäähdytyksellä, se tarkoittaisi pientaloissa sähkönkulutusta n. 2-3 kWh/m²,a ja asuinkerrostalossa n. 5 kWh/m²,a.

Jäähdytystarpeen kasvua tarkasteltiin pientaloesimerkin avulla käyttäen DOF-Energia 2.0 ohjelmaa, joka perustuu RakMK D5 (2007) mukaiseen laskentaan. Matalaenergiatalolle saatiin jäähdytykseen ostettavan sähkön määräksi n. 6 kWh/m²,a, kun sisälämpötilaksi valittiin 21 °C (kuva 2). Sisälämpötilalla 23 °C jäähdytystarve jäi kuitenkin hyvin vähäiseksi. Koska Sisäilmastoyhdistyksen tekemän sisäilmastoluokituksen (2008) mukaan parhaassa S1 luokassa kesäaikaisten sisälämpötilojen pitäisi pysyä alueella 23–25 °C, ei tehdyn kokei-



lulaskelman mukaan siis syntyisi vielä matalaenergiapientaloissa huomattavaa jäähdytystarvetta. Kyseinen laskentamenettely ei kuitenkaan ole kovin luotettava jäähdytyksen osalta eikä kyseisten laskelmien perusteella voi tehdä pitkälle vieviä johtopäätöksiä. Edellä mainittuun lähteeseen verrattuna laskettu jäähdytystarve näyttäisi liian pieneltä.

Suomessa jäähdytetään tällä hetkellä oleskelutiloja ensisijassa työpaikoilla ja asiakastiloissa, jotta työteho ja asiakasviihtyvyyden ei laskisi kesällä liikaa. Tyypillisiä jäähdytettyjä tiloja ovat esim. kokoustilat ja atk-tilat. Asunnoissa koneellista jäähdytystä ei vielä ole kuin erikoistapauksissa. Tarve jäähdytykselle olisi kuitenkin jo nyt esim. asuinkerrostalojen ylimmissä kerroksissa.

Kokonaisuudessaan koneellisen jäähdytysenergian kulutus on vielä koko Suomen tasolla vähäistä. Jäähdytysenergian käytön määrästä ei kuitenkaan ole tarkempaa tietoa, koska se sisältyy huoneisto- ja kiinteistösähkön kulutukseen. Luotettavia koko rakennuskantaa koskevia jäähdytykseen liittyviä laskentamallejakaan ei ole. Meillä ei esim. ole käytössä laskennan tarvitsemaa "jäähdytystarvelukua" vastaavasti kuin meillä on lämmitystarveluku.

Jäähdytystä voidaan käytön luonteen näkökulmasta verrata valaistukseen. Tilojen käyttäjän vastuulla on usein laittaa jäähdytys päälle ja ottaa jäähdytys pois päältä. Haluttu lämpötila on myös usein tilojen käyttäjän säädettävissä ja riippuu säätäjistä. On siis hyvin vaikea enustaa jäähdytysenergian kulutuksen kehittymistä. Yleensä oletetaan, että 23 °C olisi sopiva sisälämpötila kesällä, mutta lämpötila voidaan säätää alemmaksi.

Uusien lämmöneristysvaatimusten vaikutusta jäähdytystarpeeseen ja jäähdytysmenetelmiin tulee ensin tarkastella talotyypeittäin ja erikseen eri vuodenaikoina (eri ulkolämpötiloilla). Sen jälkeen pitää arvioida, mitä lisäännytynyt jäähdytystarve käytännössä vaikuttaa rakenneteknisiin ratkaisuihin, laiteratkaisuihin ja miten ratkaisut vaikuttavat rakennusten rakennusfysikaaliseen toimintaan.

Parempi lämmöneristys nostaa sisälämpötiloja silloin, kun ulkona on kylmempää kuin sisällä ja sisäiset lämpökuormat ovat suuremmat kuin lämmitystarve. Tämä tilanne on tyypillisesti keväällä ja syksyllä. Tällöin on kuitenkin mahdollista viilentää sisäilmaa käyttämättä viilenykseen erillisiä jäähdytyslaitteita. Yksinkertaisimmillaan se tapahtuu ikkunoita avaamalla. Kesällä ulkoilman lämpötilan noustessa sisälämpötilaa korkeammalle, voi lisäeristyksestä olla hyötyäkin, koska tällöin esim. ullakkotilojen lämpö siirtyy hitaammin sisätiloihin. Tällaiset jaksot ovat kuitenkin suhteellisen lyhyitä verrattuna koko ajanjaksoon, jolloin jäähdytystarvetta esiintyy.

Pääsääntöisesti sisätilojen ylläpitoa pyritään vähentämään estämällä auringonpaisteesta johtuvia lämpökuormia rakenneteknisin keinoin sekä vähentämällä sisäisiä lämpökuormia. Yksittäisten tarkastelujen perusteella näyttää kuitenkin siltä, että rakennetekniset keinot eivät varmuudella riitä, kun rakennetaan matalaenergiataloja ja vielä niitäkin paremmin eris-



tettyjä taloja. Jos rakenneteknisiin keinoin halutaan pitää sisälämpötilat kurissa, tulee ikkunoiden kohdalle rakentaa ulkopuolisia tehokkaita varjostimia, joiden toteutus on kuitenkin käytännössä usein hankalaa. Koneellinen jäähdytys tulee siis lisääntymään myös asuinrakennuksissa, kun lämmöneristystä parannetaan.

Koneellisen jäähdytyksen suurin vaikutus on lisääntyneissä rakennuskustannuksissa. Jos matalaenergiarakentamisessa kevyemmän lämmitysjärjestelmän avulla säästetään rakennuskustannuksia, niin ainakin osa säästöstä voi mennä jäähdytysjärjestelmän rakentamisen lisäkustannuksiin.

Koneellinen jäähdytys muuttaa rakennusten rakennusfysikaalista toimintaa. Jäähdytyksen takia kesäaikana on ajanjaksoja, jolloin sisällä on kylmempää kuin ulkona. Tällöin kosteusvirrat vaipparakenteissa kääntyvät sisäänpäin ja höyrösulun paikka onkin tällöin väärällä puolella (ks. luku 10). Jos ulkoilman vesihöyrypitoisuus ja lämpötilat nousevat kesällä ilmastomuutoksen seurauksena (lisääntyvät sateet), ulkoa sisäänpäin tapahtuva kosteusvirta voi aiheuttaa homeen kasvua höyrösulun ulkopinnassa jäähdytetyissä rakennuksissa. Tästäkin ilmiöstä johtuen sisätilojen liiallista jäähdyttämistä on syytä välttää.

Koneellinen jäähdytys parantaa periaatteessa tilojen käytön viihtyvyyttä. Käytännössä kylmän ilman virtauksista tulee kuitenkin helposti vetohaittoja. Tämän takia kehitellään myös erilaisia lattia-, katto- ja seinäjäähdytyksiä. Jos niitä otetaan käyttöön, ne lisäävät entisestään rakennuskustannuksia ja rakenteiden rakennusfysikaalinen käyttäytyminen jälleen muuttuu.

Seuraavissa luvuissa on tarkasteltu vielä erikseen jäähdytystä toimistorakennuksissa, asuinkerrostaloissa ja pientaloissa ennen johtopäätöksiä.

12.2 Toimistorakennukset

Uusiin toimistorakennuksiin sekä muihin palvelurakennuksiin asennetaan yleisesti koneellinen jäähdytys.

Jäähdytystarve syntyy tyypillisesti jo viileillä aurinkoisilla ilmoilla, jolloin siis ulkolämpötila on selvästi sisälämpötilaa alhaisempi. Näissä tilanteissa vaipan lisäeristäminen lisää jäähdytystarvetta. Tällöinkin auringon puoleisilla seinillä lisäeristys saattaa kuitenkin vähentää jäähdytystarvetta. Näissä olosuhteissa voidaan isommissa kohteissa käyttää jäähdytysjärjestelmässä ns. vapaakiertoa, joka hyödyntää jäähdytyksessä ulkoilman viileyttä. Sähkönkäyttö jäähdytykseen on tällöin melko vähäistä. Tällöin ilmanvaihdon lämmön talteenottoa vähentämällä voidaan myös lisätä viilennystehoa ilman sähkönkäytön lisäystä. Viilennystehoa voidaan lisätä myös yöaikaista ilmanvaihtoa lisäämällä, jolloin puhaltimien sähkönkulutus kuitenkin hieman kasvaa.



Erittäin ratkaisevaa jäähdytystarpeen kannalta on ikkunoiden suuntaus ja auringonsuojausominaisuudet. Varsinkin toimistorakennuksien ikkunavalinnoissa korostuvat entistä enemmän auringonsuojausominaisuudet lämmöneristävyyden lisäksi.

12.3 Asuinkerrostalot

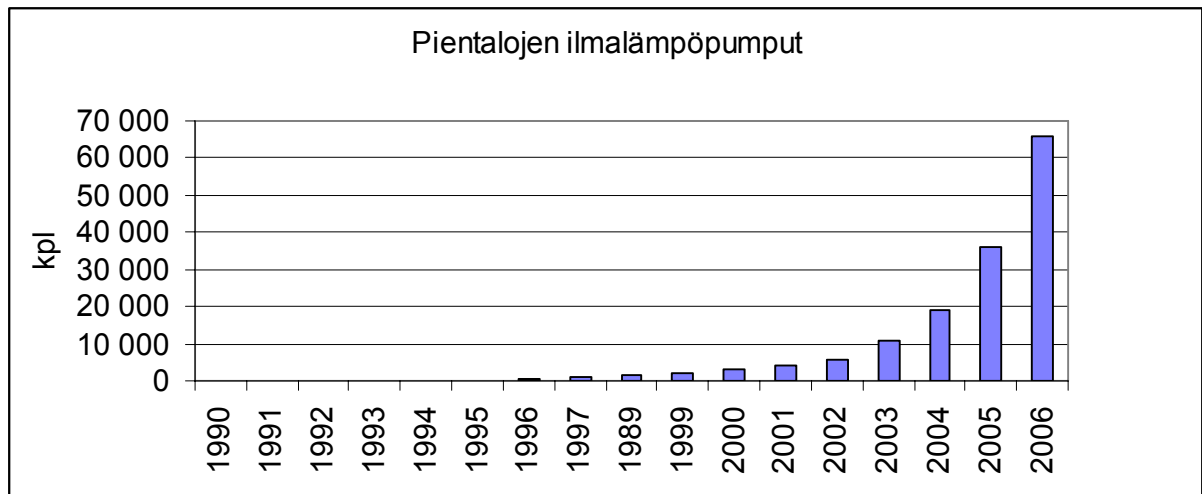
Asuinkerrostaloihin ei Suomessa ole vielä yleisesti asennettu koneellista jäähdytystä. Varsinkin ylimpien kerrosten lämpötilat ovat jo nyt nousseet helteillä liian korkealle. Uusimpiin määräyksiin lisättiin vaatimus sisälämpötilan tarkistuksesta.

Asuinkerrostalojen ylimpien kerrosten liian korkeita sisälämpötiloja voidaan alentaa mm. ikkunoiden varjostuksilla, yläpohjan lisäeristyksellä, kattomateriaalin valinnalla ja mahdollisen ullakon lisätuuletuksella. Rakennetekniset keinot eivät kuitenkaan aina riitä ja sen takia koneellinen jäähdytys tulee todennäköisesti lisääntymään myös asuinkerrostaloissa. Ainakin koneellisen ilmanvaihdon (ilmalämpöpumpun) lisäämiseen jälkikäteen tullaan todennäköisesti uudistuotannossa varautumaan kohteissa, joissa liian korkeiden sisälämpötilojen riski on suuri.

12.4 Pientalot

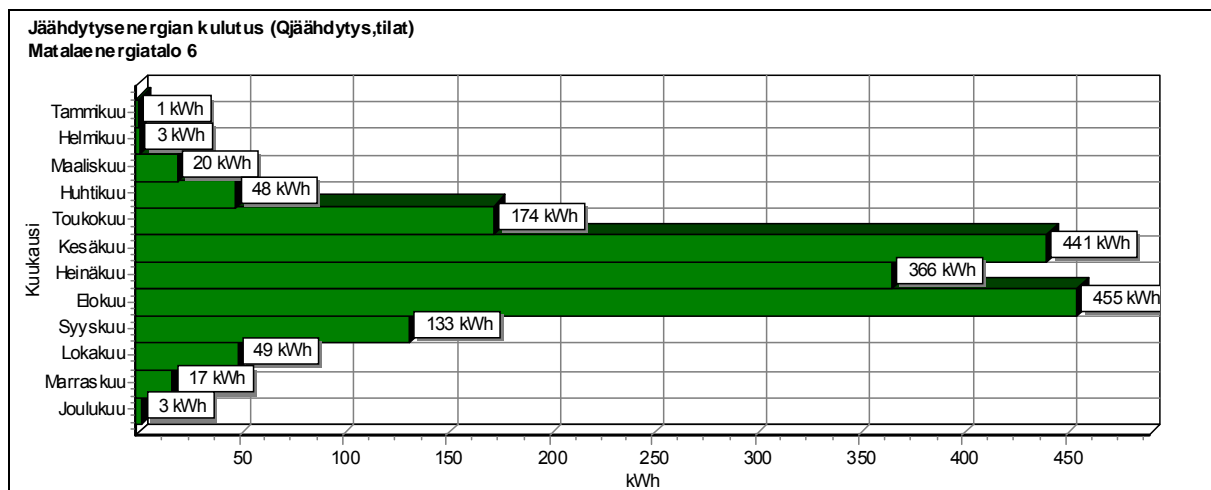
Pientaloissa viilennystarvetta syntyy tyypillisesti yläkerran makuuhuoneissa ainakin tilanteissa, joissa ulkolämpötila on lähellä sisälämpötilaa tai korkeampi ja auringonpaiste pääsee lämmittämään kattoa ja ullakkotilaa. Tyypillisesti ullakon lämpötila on tällöin selvästi korkeampi kuin sisälämpötila. Tällöin yläpohjan lisäeristäminen vähentää jäähdytystarvetta. Ullakon tehostettu tuuletus vähentää tällöin myös lämpökuormien sisääntuloa.

Omakotitaloihin on hankittu runsaasti ilmalämpöpumppuja, jotka vähentävät talvella lämmitysenergian kulutusta ja joilla voidaan sisäilmaa myös viilentää (kuva 12.1). Lämmitysenergian säästö on näissä kohteissa huomattavasti suurempi kuin lisääntynyt sähkönkäyttö jäähdytykseen. Jäähdytystarpeen lisääntyminen voi jonkin verran lisätä ilmalämpöpumppujen hankintaa, mikä lisää rakennuskustannuksia ja samalla vähentää kokonaisenergian kulutusta. Muissa rakennuksissa kuin pientaloissa ilmalämpöpumppujen ensisijainen hankintaperuste on todennäköisesti jäähdytyskäyttö.



Kuva 12.1 Pientaloihin hankittujen ilmalämpöpumppujen määrä on kasvanut voimakkaasti. Pientaloissa ensisijainen hankintaperuste on todennäköisesti lämmitysenergian säästö ja toissijaisesti jäähdytys. (Energiatilasto 2007)

Pientalojen jäähdytysenergian tarvetta pyrittiin arvioimaan karkeasti RakMK D5 (2007) laskentamenettelyä käyttävällä DOF-Energia 2.0 -ohjelmalla (kuva 12.2). Ohjelma saattaa antaa liian vähäisen jäähdytystarpeen, mutta toisaalta koko nettojäähdytystarvetta ei hoideta koneellisella jäähdytyksellä, vaan osittain tuuletuksella. Laskettu sähköenergian määrä voi siten olla myös suurempi kuin todellisuudessa.



Kuva 12.2 Pienen 120 m² matalaenergiatalon maksimaalinen jäähdytysenergian nettotarve laskettuna DOF-Energia 2.0 -ohjelmalla, joka perustuu RakMK D5 (2007):n mukaiseen laskentaan. Jäähdytyksen nettotarve on kokonaisuudessaan n. 1700 kWh/a, kun sisälämpötilaksi on valittu 21 °C. Ilmalämpöpumpulla jäähdytys veisi sähköä n. 700 kWh/a eli n. 6 kWh/m²,a. Suositeltava alin sisälämpötila kesäaikaan on kuitenkin 23 °C, joten keskimääräinen jäähdytystarve on todennäköisesti selvästi alhaisempi, kuin kuvassa esitetty.

Tutkimuslauseketta saa kopioida vain kokonaisuudessaan



12.5 Johtopäätökset

Suomessa on tähän asti siedetty melko hyvin kesäaikaista liian korkeita sisälämpötiloja. Tilanne on kuitenkin muuttumassa ilmaston lämmitessä, ihmisten vaatimustason noustessa ja jäähdytyslaitteiden tarjonnan lisääntyessä. Uusissa autoissa jäähdytys on jo melkein vakiovaruste. Rakennustenkin jäähdytys on lisääntymässä. Varsinkin vanhuksille korkeat sisälämpötilat ovat haitallisia. Ennustettavissa onkin, että rakennusten jäähdytys lisääntyy oleellisesti. Suomessa on kuitenkin melko vähän asuntojen viilennykseen ja koneelliseen jäähdytykseen liittyvää ymmärrystä ja osaamista. Lämmöneristemääräyksiä kiristettäessä pitääkin varmistaa, että samalla estetään turhien lämpökuormien syntyminen ja mahdollistetaan mahdollisimman pitkälle viilennys ilman koneellista jäähdytystä. Koneellinen jäähdytys ei koskaan ole kovin helppo ratkaisu. Se aiheuttaa varsinkin asunnoissa helposti äänihaittoja sisällä ja ulkona sekä vetohaittoja. Se lisää myös sähkön kulutusta, jota on tavoitteena vähentää.

Jäähdytystarve ja jäähdytykseen käytetyn sähkön määrä tulee kasvamaan. Lämmöneristyksen parantamisen vaikutusta jäähdytystarpeen kokonaiskasvuun on kuitenkin vaikea arvioida. Jäähdytysenergian käytön arviointia vaikeuttavat seuraavat tekijät:

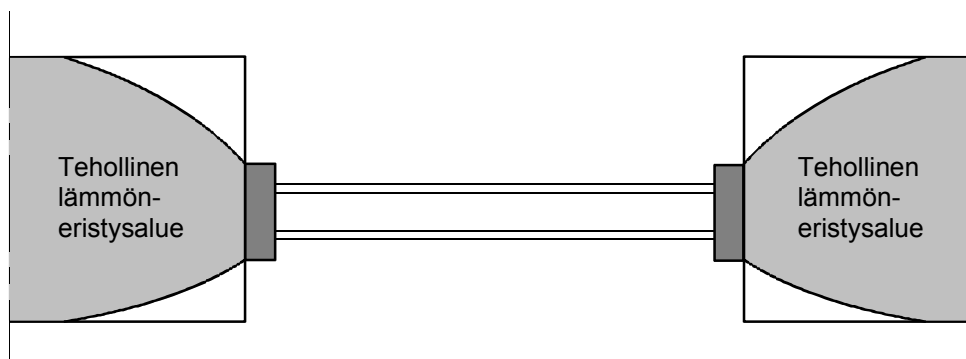
- Jäähdytystä tarvitaan usein vain rakennuksen joissakin tiloissa. Tarvetta syntyy myös lämmityskaudella, jolloin usein tapahtuu jopa yhtäaikaista lämmitystä ja jäähdytystä samoissa tiloissa.
- Jäähdytyksen säätö tapahtuu usein tilan käyttäjän mieltymyksen mukaan. Mieltymykset sisälämpötilan osalta vaihtelevat ainakin 21–25 °C välillä. Ilman koneellista jäähdytystä tullaan yleensä toimeen 23 °C lämpötilassa, mutta koneellinen jäähdytys voidaan kuitenkin helposti säätää 21 °C:een silloin, kun jäähdytys on käytössä.
- Jäähdytystä tarvitaan tyypillisesti vain paikallaoloaikoina. Jäähdytykset voivat kuitenkin jäädä päälle vaikka koko kesäloman ajaksi, jos säätöä ei ole kunnolla ohjeistettu.

Tässä selvityksessä ei ollut mahdollista eikä tavoitekaan tarkastella jäähdytyksen merkitystä ja sen muuttumista kovin tarkasti. Pääsanoma on, että nyt pitäisi viimeistään tutkia ja ohjeistaa rakennusten viilennyksen ja jäähdytyksen ratkaisuja. Tärkeintä on ohjeistaa, miten rakenneteknisiin keinoin ja sisäisiä lämpökuormia vähentämällä voitaisiin välttyä koneellisen jäähdytyksen rakentamiselta. Suurin tarve tällä hetkellä liittyy asuinrakennuksiin ja erityisesti pientaloihin, joiden suunnittelijat eivät ole jäähdytysalan asiantuntijoita. Lämmöneristysmääräysten huomattava kiristäminen saattaa johtaa kalliiden, toimimattomien, ympäristöön sopimattomien ja viihtyvyydeltään huonojen jäähdytysratkaisujen lisääntymiseen. Huonoin lopputulos on huonekohtaisten siirrettävien jäähdytyslaitteiden voimakas lisääntyminen. Niiden hyötysuhde on erittäin huono ja niitä voi käyttää vain jäähdytykseen.

13. KYLMÄSILLAT

Vaipan lämmöneristyksen paksuntaminen vaikuttaa vaipan kylmäsiltoihin kahdella tavalla. Niissä tapauksissa, joissa ulkopuolisia rakenteita tai ulkoerhosta joudutaan kannattamaan ulkoseinän sisäkuoresta, joudutaan käyttämään järeämpiä kannattimia ja tukirakenteita, koska matka seinän sisäkuoreen pitenee (esim. ulokkeet ja betonielementtien ansaat). Tämä lisää tukirakenteiden aiheuttamia kylmäsiltoja ulkoseinissä. Toisaalta paksumpi lämmöneristyskerros mahdollistaa esim. rankarakenteiden kylmäsilta vaikutuksen pienentämisen, koska rakenne voidaan suunnitella ristikoolauksien tai eriytetyn kaksoisrungon avulla siten, että tukirunko ei jatku yhtenäisenä lämmöneristekerroksen läpi. Tästä syystä myös rakennusosien välisten liitosten ja seinänurkkien aiheuttamia kylmäsiltoja voidaan usein pienentää, koska liitosalueelle mahtuu enemmän lämmöneristettä runkorakenteiden lisäksi.

Suurimmat rakennusosien välisten liitosalueiden lämpöhäviöt syntyvät ohuiden rakennusosien kuten ikkunoiden, ovien ja huolto-/tuuletusluukkujen liittyessä paksuihin ulkoseinä- ja yläpohjarakenteisiin. Tällöin paksujen rakennusosien tehollinen lämmöneristyspaksuus liitosalueella ei vastaa rakenteen todellista lämmöneristyspaksuutta (ks. kuva 13.1). Kiristettäessä rakennusosien lämmöneristysmääräyksiä nykyisestä tasosta nämä heikennykset tulee ottaa laskennallisesti huomioon. Lisäkonduktanssien laskenta eri paksuisille ulkoseinä- ja yläpohjarakenteille ja niihin liittyville karmiratkaisuille edellyttää kuitenkin laajempia laskentatarkasteluja, joten niitä ei ole mahdollista tehdä tämän tutkimuksen puitteissa.



Kuva 13.1 Periaatekuva tehollisesta lämmöneristysalueesta ohuen ja paksun rakennusosan välisessä liitoskohdassa. Mitä suurempi on rakennusosien välinen paksuusero sitä suurempi on tehottoman lämmöneristysalueen osuus liitosalueella.

Periaatteessa myös muiden rakennusosien välisten liitosten kylmäsiltoja tulisi ottaa rakennuksen kokonaislämpöhäviötä laskettaessa huomioon, koska nykyisessä RakMK D5 (2007):ssä rakennusosien pinta-alat lasketaan rakenteiden sisämittojen mukaan. Oikeamat pinta-alat saataisiin, jos ne laskettaisiin rakennusosien paksuuden puolivälistä otetusta leikkauksesta (Lindberg et al. 1998). Toisaalta, kuten edellä todettiin, paksumpien rakenteiden liitos- ja nurkkakohtien kylmäsilta vaikutusta voidaan usein pienentää, jolloin niiden huomioon ottaminen laskelmissa erikseen ei ole enää yhtä tarpeellista. Lisäksi rakennusosien U-arvojen laskennassa käytetään materiaalien lämmönjohtavuuksina jonkin verran



varmalla puolella olevia arvoja, jolloin tämänkin tekijän voidaan ajatella kompensoivan liitosalueen kylmäsilta vaikutusta. Edellä mainituista tekijöistä johtuen voidaan ajatella, että paksujen rakennusosien liitosalueilla syntyviä kylmäsiltoja ei tarvitsisi ottaa jatkossakaan erikseen huomioon.

Tämä menettely yksinkertaistaa oleellisesti rakennuksen lämpöhäviön ja energiankulutuksen laskentaa, koska erillisten lisäkonduktanssien määrittäminen erilaisille paksujen rakennusosien välisille liitoksille on erittäin työläs tehtävä ja saavutettavat hyödyt työmäärään nähden ovat vähäisiä. Eri liitosratkaisuja syntyy koko ajan myös lisää, jolloin listaa tulisi jatkuvasti päivittää.

RakMK C4 (2003):ää uudistettaessa tulee aikaisempaa selvemmin eritellä ne kylmäsilat, joita ei tarvitse ottaa huomioon laskettaessa rakenteiden lämmönläpäisykertoimia ja koko rakennuksen lämpöhäviötä.

Samassa yhteydessä tulisi myös epätasa-aineisessa rakennusosassa olevien kylmäsiltojen laskenta yhtenäistää SFS-EN ISO 6946 (2007) –standardin mukaiseksi siten, että rakenteen lämmönvastukselle lasketaan sekä ylä- että alalikiarvo. Jos RakMK C4 (2003):ää ei uudisteta samaan aikaan kuin nyt kaavailtuja RakMK osia, tulisi uudessa RakMK C3:ssa esittää mahdollisuus käyttää epätasa-aineisen rakennusosan U-arvon määrittämisessä myös SFS-EN ISO 6946 (2007) -standardin laskentamenetelmää, vaikka materiaalien lämmönjohtavuuksina käytettäisiinkin normaalian lämmönjohtavuuden arvoja.

Huolto- ja tuuletusluukulle tulee antaa määräyksissä myös U-arvovaatimus, koska niidenkin vaikutus energiankulutukseen korostuu jatkossa. RakMK C4 (2003):ssä on jo aiemmin puhuttu tuuletusluukun U-arvon määrittämisestä, mutta sille ei ole annettu U-arvovaatimusta RakMK C3 (2007):ssa. Tuuletusluukun osalta tulee harkita vähimmäispinta-alan antamista luukuille, joita määräys koskee.

14. ILMANVAIHTO

Energiankulutusmääräysten kiristämisen myötä on yhä tärkeämpää kiinnittää huomiota myös ilmanvaihdon tarkoituksenmukaiseen suunnitteluun turhan ilmanvaihdon vähentämiseksi rakennuksissa. Tätä asiaa on syytä erikseen korostaa uusissa ilmanvaihtomääräyksissä.

Pientaloissa voidaan hyväksyä ilmanvaihtokerroin 0,4 1/h koska tutkimusten mukaan pientaloissa asukastiheys on niin pieni, että tämäkin ilmanvaihtokerroin on riittävä (Vinha et al. 2005). Ilmanvaihtokerroimen ollessa puurunkoisissa pientaloissa yli 0,5 1/h asukkaiden vetovalitukset lisääntyivät (Vinha et al. 2005). Kerrostalojen osalta on kuitenkin syytä pitää edelleen ilmanvaihtokerroin 0,5 1/h voimassa (Vinha et al. 2008).



Julkisissa tiloissa tulee olla ilmanvaihdon jaksottainen säätömahdollisuus, jolla ilmanvaihtoa voidaan pienentää esim. yöaikaan, kun tilat ovat tyhjiään. Lisäksi ilmanvaihtoa tulisi voida ohjata automaattisesti niihin tiloihin, jotka ovat kulloinkin käytössä ja vähentää muista tiloista. Samanlaiset säätömahdollisuudet tulisi saada myös asuinrakennuksiin. Järjestelmää voitaisiin käyttää esim. siten, että ilmanvaihto tehostuu automaattisesti yöaikaan makuuhuoneissa ja vähenee taas muualla asunnossa. Tällaisen järjestelmän toteuttamiselle ei ole teknisiä esteitä ja lämmöneristysmääräysten kiristyessä sen tekeminen on myös taloudellisesti yhä kannattavampaa. Tilakohtaisesti automaattisesti muuttuva ilmanvaihto tulee voida hyödyntää täysimääräisesti myös energiankulutuslaskelmissa ja rakennuksen energiatehokkuusluokkaa määritettäessä.

Aiemmin jo luvussa 3 todettiin, että rakennuksen ilmatiiviyden paraneminen asettaa entistä suurempia vaatimuksia ilmanvaihdon säätämiseksi ja luotettavalle toiminnalle. Ilmanvaihdon säätäminen on tärkeää, jotta tiloihin ei synny suuria yli- tai alipaineita ulkoilmaan nähden. Luotettavan toiminnan varmistaminen edellyttää puolestaan asuintiloihin asennettavaa seuranta-/ hälytysjärjestelmää, jonka avulla käyttäjä voi huomata ilmanvaihdon toimintakatkokset. Samalla on kiinnitettävä entistä enemmän huomiota myös suodattimien säännölliseen vaihtamiseen, jotta ilmanvaihto toimii toivotulla tavalla.

15. YHTEENVETO JA SUOSITUKSET

15.1 Yleistä

Yleisesti ottaen vaipparakenteiden kosteustekninen toiminta heikkenee, kun rakenteiden lämmöneristystä lisätään. Tämä johtuu siitä, että rakenteiden ulko-osat viilenevät, jolloin kosteuden kondensoitumiselle ja homeen kasvulle on niissä suotuisimmat olosuhteet. Odotettavissa oleva ilmastonmuutos heikentää rakenteiden kosteusteknistä toimintaa entistään, koska viistosateiden ja homeen kasvulle suotuisien olosuhteiden ennustetaan lisääntyvän ja toisaalta kuivumisaikojen vähentyvän.

Joissakin vaipparakenteissa kosteustekninen toiminta heikkenee muita enemmän, jos niiden lämmöneristystä lisätään. Näitä ovat mm. tuuletetut yläpohjat ja varsinkin ryömintätillaiset alapohjat. Puurakenteinen tuuletettu alapohja on jo nyt kosteusteknisen toiminnan suhteen riskirakenne Suomen ilmastossa.

Ulkoseinärakenteissa U-arvojen kiristäminen aiheuttaa merkittäviä teknisiä ongelmia ja kustannustason nousua. Massiiviseinärakenteissa myös rakenteiden kosteustekninen toiminta heikkenee oleellisesti, kun siirrytään käyttämään sisäpuolista lisäeristystä. Maanvastaisissa alapohjissa taas U-arvojen kirittämisestä saatava hyöty on todellisuudessa selvästi pienempi kuin nykyiset laskentamallit osoittavat. Ikkunoiden osalta valmistusteknisten ongelmien lisäksi haasteena ovat lisääntyvät reklamaatiot ikkunoihin tiivistyvästä kosteudesta.

Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan



Näistä tekijöistä johtuen U-arvojen kiristysten tulisi olla pienempiä kuin nyt on kaavailtu. TTY:n asiantuntijaryhmän suosittelema kokonaiskiristysten maksimitaso on n. 15–20 % nykyisiin U-arvovaatimuksiin verrattuna. U-arvojen kiristykset tulee lisäksi painottaa niihin rakennusosiin, joissa määräysten kiristäminen on rakennusfysikaalisesti turvallisinta ja taloudellisesti kannattavinta.

Oikean suunnittelun merkitys korostuu entisestään, jotta rakenteisiin kohdistuvia kosteusra-situksia voidaan tulevaisuudessa vähentää. Tämä edellyttää myös suunnitteluohjeiden pa-rantamista ja ohjeistuksen levittämistä kentälle. On kuitenkin huomattava, että esim. tuulete-tuissa yläpohjarakenteissa ja ryömintätilaisissa alapohjarakenteissa riski kosteusvaurioille kasvaa hyvästä suunnittelusta huolimatta, kun lämmöneristystä lisätään.

Jotta rakenteiden suunnitteluohjeita voidaan parantaa yksityiskohtaisesti, tarvitaan myös tarkempaa tutkimusta siitä, miten lämmöneristykseen lisääminen ja ilmastonmuutos muutta-vat rakenteiden käyttäytymistä. Rakenteiden rakennusfysikaalisen analysoinnin työkalut ja laskennalliset menetelmät ovat kehittyneet viime vuosina merkittävästi, joten tällaisen tutki-muksen tekemiselle on hyvät toteutusmahdollisuudet. Rakenteiden kosteusteknisestä toi-minnasta on olemassa jo hyvät pohjatiedot nykyisillä eristevahvuuksilla, jotka auttavat ana-lysoinnissa.

Mikäli näiden kiristysten jälkeen suunnitellaan vielä rakenteiden U-arvojen tai rakennusten energiankulutuksen lisäkirstämistä, on rakennusfysikaalisten tarkastelujen lisäksi tehtävä myös perusteelliset rakennustekniset ja taloudelliset selvitykset sekä ympäristövaikutusten tarkastelut, jotta voidaan arvioida onko näitä kiristyksiä mahdollista tai järkevää toteuttaa.

15.2 Rakennetyyppien ja tuotantotekniikoiden muuttuminen

Rakennusvaipan U-arvovaatimusten suunniteltu kiristäminen aiheuttaa laajoja muutoksia mm. käytettäviin rakennetyyppeihin ja niiden liitos- ja muihin yksityiskohtiin sekä valmistus- ja tuotantotekniikoihin. Muutokset ovat niin suuria, että monien tavanomaisten rakenteiden nykyinen toteutustapa voi muuttua epämielekkääksi (esim. kaikki harkkorakenteet, puuran-kaseinät, puurankarakenteiset ryömintätilaiset alapohjat, vinot puurankarakenteiset yläpoh-jat jne.). Nämä yhdessä aiheuttavat rakennusteollisuudelle suuren paineen tehdä erittäin nopealla aikataululla merkittäviä teknisiä muutoksia mm. rakennustarvikkeisiin, rakenne-tyyppeihin ja tuotantotekniikoihin.

Nopealla aikataululla toteutettuna nämä muutokset tulevat olemaan suurelta osin hallitse-mattomia. On selkeästi ennakoitavissa, että tämän seurauksena rakentamisessa otetaan käyttöön epäkelvoja rakenneratkaisuja ja yksityiskohtia. Tähän on syynä se, että suurimmal-la osalla rakennusalan toimijoista on käytännössä puutteellinen kyky arvioida uusien raken-neratkaisujen toimivuutta edes kaikkein keskeisimmistä näkökulmista.



Rakenteiden paksunemista voidaan periaatteessa hillitä ottamalla alhaisen lämmönjohtavuuden omaavia eristeitä nykyistä laajempaan käyttöön. Näiden materiaalien mekaaniset, kosteustekniset, akustiset ja palotekniset ominaisuudet poikkeavat kuitenkin niin merkittävästi nykyisin yleisessä käytössä olevista mineraalivillaeristeistä, että myös tällainen muutos on laajalla rintamalla toteutettuna rakennusalalle äärimmäisen haastava.

15.3 Vaipan ilmanpitävyys

Vaipan ilmanpitävyyden parantaminen on tekijä, jolla on lähes pelkästään positiivisia vaikutuksia rakennuksen ja rakenteiden toimintaan:

- 1) rakennuksen energiankulutus vähenee ilmanvaihdon tapahtuessa lämmöntalteenotto-laitteiston kautta
- 2) kosteuden virtaus vaipparakenteisiin vähenee
- 3) erilaisten epäpuhtauksien, homeiden ja radonin virtaus sisäilmaan vähenee
- 4) vaipparakenteiden sisäpinnat eivät jäähdy ulkoa tulevien ilmavirtausten seurauksena
- 5) asukkaiden kokema vedon tunne vähenee
- 6) ilmanvaihdon säätäminen ja tavoiteltujen painesuhteiden ylläpitäminen helpottuu

Edellä mainituista syistä johtuen ilmanpitävyyden parantaminen on suositeltava ja myös kustannustehokas toimenpide. Ilmatiivyyden parantamisella vähennetään myös niitä kosteusriskejä, jotka vaipan lisäeristyksen myötä kasvavat. Homeen kasvun lisääntyessä vaipan ulko-osissa on entistä tärkeämpää, että homeet ja niiden aineenvaihduntatuotteet eivät pääse sisäilmaan ilmavirtausten mukana. Tämä voidaan estää ainoastaan hyvin ilmatiiviillä vaipalla.

Vaipan ilmanpitävyydestä annettavien ohjeiden tulee olla sellaisia, että ne kannustavat urakoitsijoita ja talovalmistajia vaipan toteutusratkaisujen kehittämiseen ja parantamiseen. Tämä on joustavampi ja parempi tapa kuin ehdottomien määräyksien antaminen. Määräysten kontrolloiminen on hankalaa ja ne lisäävät rakennusten mittaustarvetta voimakkaasti. Tässä mielessä nykyisissä ohjeissa oleva ilmavuotoluvun vertailuarvon 4,0 1/h käyttö, jos tarkempia mittauksia ei tehdä, on hyvä toimintaperiaate.

Nykyinen ilmavuotoluvun vertailuarvo ei kuitenkaan kannusta kaikissa tapauksissa riittävästi vaipan ilmanpitävyyden parantamiseen, koska se on jo suhteellisen alhainen arvo. Todellisuudessa esim. lähes puolessa pientaloista on tätä heikompi ilmavuotoluvun arvo. Tätä voidaan korjata menettelyllä, jossa ilmavuotoluvulle annetaan kaksi vertailuarvoa esim. 6,0 1/h ja 4,0 1/h. Vertailuarvoa 6,0 1/h käytetään, jos rakennesuunnittelun yhteydessä ei ole tehty erillisiä suunnitelmia ja toteutusohjeita vaipan ilmanpitävyyden varmistamiseksi. Vertailuarvoa 4,0 1/h voidaan käyttää, jos suunnitelmat on tehty. Tätä paremman ilmavuotoluvun käyttö edellyttää joko erillistä mittausta tai laadunvalvontamenettelyyn siirtymistä nykyisen



käytännön mukaisesti. Rakennusvalvonta arvioi onko riittävät suunnitelmat tehty, jotta ilmapuotolukuna voidaan käyttää alempaa vertailuarvoa.

Monessa tapauksessa jo pelkkien rakennesuunnitelmien ja toteutusohjeiden tekeminen parantaa rakennuksen ilmanpitävyyttä merkittävästi, jolloin hatarien talojen määrä vähenee jakauman heikommasta päästä. Tämä menettelytapa ei lisää myöskään rakennusten ilmanpitävyyssmittauksia nykyisestä tasosta.

On myös huomattava, että alhainen ilmapuotoluku ei takaa yksistään rakennusvaipan moitteetonta toimintaa ilmapuotojen osalta. Tämä johtuu siitä, että rakenteiden läpi tapahtuvat pienetkin ilmapuodot voivat aiheuttaa ongelmia asukkaille (esim. maapohjasta tuleva radon tai homeen haju) ja rakenteille (esim. sisäilmasta rakenteisiin siirtyvä kosteus), vaikka rakennuksen ilmapuotoluku olisikin alhainen. Siksi ulkovaipan kaikkien saumojen ja liitoskohtien tiivistäminen on tärkeää.

Rakennuksen ilmanpitävyyden parantuessa on kiinnitettävä entistä enemmän huomiota myös ilmanvaihdon toimintaan ja säätämiseen sekä sisäilman laatuun, koska vaipan läpi ei ole enää merkittäviä korvausilmareittejä, jotka kompensoisivat ilmanvaihdon puutteita. Ilmanvaihdon säätämättä jättäminen voi aiheuttaa rakennukseen suuria ali- tai ylipaineita, jotka aiheuttavat ongelmia paikallisissa ilmapuotokohdissa. Yhä enemmän tulee korostaa myös sitä, että tuloilmasuodattimet vaihdetaan riittävän usein. Lisäksi on suositeltavaa, että ilmanvaihtolaitteisto varustetaan esim. sisätiloihin asennettavalla merkkivalolla tai näyttötaululla, josta käy ilmi onko ilmanvaihtolaitteisto toiminnassa.

Ehdotukset kosteusmääräyksiin ja -ohjeisiin RakMK C2:

- Määräyksissä todetaan, että vaipan ilmanpitävyyden tulee olla niin hyvä, että vaipparakenteista, ulkoilmasta tai maasta ei pääse kulkeutumaan rakennuksen käyttäjien terveyden tai viihtyvyyden kannalta haitallisia aineita tai mikrobeja liian suurina määrinä rakennuksen sisäilmaan.

Ehdotukset sisäilmaston ja ilmanvaihdon määräyksiin ja ohjeisiin RakMK D2:

- Ohjeissa todetaan, että rakennuksen ilmanpitävyyden parantuessa on kiinnitettävä entistä enemmän huomiota ilmanvaihdon toiminnan varmistamiseen, säätämiseen ja sisäilman laatuun. Tilojen käyttäjän tulee nähdä onko ilmanvaihto toiminnassa vai ei. Lisäksi korostetaan ilmanvaihtolaitteiston tuloilmasuodattimien säännöllisen vaihtamisen merkitystä.

Ehdotukset energiankulutusmääräyksiin RakMK D3:

- Ilmapuotoluvulle annetaan kaksi vertailuarvoa esim. 6,0 1/h ja 4,0 1/h, joista alempaa voidaan käyttää, jos rakennesuunnittelun yhteydessä on tehty erilliset suunnitelmat ja to-



teutusohjeet vaipan ilmanpitävyyden varmistamiseksi. Alemman vertailuarvon tulee olla sama kuin nykyinen arvo 4,0 1/h.

- Selitysosiossa todetaan, että alhainen ilmapuotoluku ei takaa yksistään rakennusvaipan moitteetonta toimintaa ilmapuotojen osalta.

15.4 Rakenteiden sisäinen konvektio

Avohuokoisissa lämmöneristeissä tapahtuva sisäinen konvektio heikentää rakenteen lämmöneristyskykyä suhteellisesti enemmän eristepaksuuden kasvaessa. Kirjallisuuden perusteella heikennyksen vaikutus ulkoseinärakenteen U-arvoon voi olla jopa useita kymmeniä prosentteja, jos lämmöneriste on asennettu siten, että eristeen ja eristetilan seinämien väliin jää koloja ja rakoja. Sisäisestä konvektiosta on myös kosteusteknisesti haittaa, joten sitä tulee pyrkiä eliminoimaan rakenteellisilla toimenpiteillä kuten esim. jakamalla lämmöneristerkerros paksuussuunnassa eri osiin ilmanpitävien ja hyvin vesihöyryä läpäisevien kalvojen avulla.

Eurooppalaisilla λ_{design} -arvoilla tehtävässä U-arvolaskelmassa sisäistä konvektiota ei oteta huomioon lainkaan. Tästä syystä RIL 225 (2004):ssä on esitetty erillinen menettely tätä varten, mutta menettelyä ei käytännössä kuitenkaan aina käytetä. Käytännön tilanteissa tämä on aiheuttanut epäselvyyksiä U-arvojen laskennan osalta.

RakMK C4 (2003):ssä sisäinen konvektio otetaan huomioon normaalin lämmönjohtavuuden λ_n -arvoissa. Näillä arvoilla lasketuissa rakenteiden U-arvoissa on sisäisen konvektion suhteen varmuutta enemmän kuin RIL 225 (2004) mukaisella menetelmällä lasketuissa U-arvoissa.

Nyt suunnitellut U-arvojen kiristykset edellyttävät sisäisen konvektion tarkempaa huomioon ottamista ulkoseinärakenteissa, mutta yläpohjarakenteiden osalta nykyisissä laskentamenetelmissä on riittävä varmuus.

Ehdotukset lämmöneristysmääräyksiin RakMK C3:

- Määräyksiin lisätään teksti, jossa sisäinen konvektio veloitetaan ottamaan huomioon vaipparakenteiden U-arvoja laskettaessa.

Ehdotukset lämmöneristysohjeisiin RakMK C4:

- Ohjeissa todetaan, että sisäistä konvektiota tulee pyrkiä eliminoimaan rakenteellisilla toimenpiteillä, koska se aiheuttaa U-arvon heikkenemisen lisäksi myös kosteusongelmia rakenteissa.



15.5 Ikkunat

Ikkunoiden osalta U-arvoja voidaan kiristää nykyisestä tasosta jonkin verran ilman merkittäviä lisäongelmia. Ikkunoiden U-arvot ovat itse asiassa jo nykyisin tyypillisesti pienempiä kuin määräysten nykytaso edellyttää. Kirjallisuuden perusteella ikkunan U-arvon pienentäminen alkaa olla valmistusteknisistä syistä haasteellista, jos U-arvo pyritään laskemaan alle 0,9–1,0 W/(m²·K). Näin ollen tätä U-arvotasoa voitaneen pitää järkevästi saavutettavana alarajana. Tämä U-arvotaso tarkoittaisi n. 29–36 % kiristystä nykyisiin U-arvoihin.

Ikkunan lasiosan U-arvon pienentämiseen liittyy myös haittoja, sillä se lisää kosteuden kondensoitumista ulkolasin ulkopintaan. Kondensoitumisherkkyden on todettu kasvavan oleellisesti, jos ikkunan lasiosan U-arvo pienenee alle 0,6–0,7 W/(m²·K). Lisäksi kirjallisuudessa on todettu, että lasien rikkoutumisriski lisääntyy merkittävästi erityisesti sälekaihtimilla ja rullaverhoilla varustetuissa ikkunoissa.

Ehdotukset lämmöneristysmääräyksiin RakMK C3:

- Ikkunoiden U-arvovaatimukseksi ehdotetaan arvoa 1,0 W/m²K lämpimän tilan rajoituksessa ulkoilmaan ja arvoa 1,4 W/m²K puoliämpimän tilan rajoituksessa ulkoilmaan.

Ehdotukset lämmöneristysohjeisiin RakMK C4:

- Ohjeissa todetaan, että hyvin lämpöä eristävässä ikkunoissa ilmenee ajoittain kosteuden kondensoitumista ulkolasin ulkopinnassa, mutta se ei ole merkki siitä, että ikkuna olisi viallinen tai toimisi virheellisesti.

15.6 Tuuletettu yläpohja

Lämmöneristysten lisääminen heikentää tuuletetun yläpohjan kosteusteknistä toimintaa, koska lisäeristäminen viilentää tuuletustilaa ja lisää siellä homeen kasvulle suotuisia olosuhteita. Jo nykyisissä kattorakenteissa esiintyy usein homeenkasvua. Toistaiseksi yläpohjassa tapahtuvaa lievää homeenkasvua on pidetty hyväksyttävänä osittain siksi, että sisätiloissa rakennuksen yläosassa on yleensä ylipaine, joka estää homeiden ja niiden aineenvaihduntatuotteiden kulkeutumista ilmapirtausten mukana sisäilmaan. Oleellista kuitenkin on, että yläpohja on mahdollisimman ilmatiivis, jotta kosteutta ei pääse virtaamaan myöskään sisältä tuuletustilaan.

Yläpohjan lisälämmöneristäminen puhallettavilla eristeillä on yleensä kohtuullisen helppoa, mutta eristämisestä saatavaa hyötyä heikentää se, että yläpohjan lämmöneristys on jo nyt hyvä. Toisaalta samasta syystä lisälämmöneristysten vaikutus tuuletetun yläpohjan lämpötiloihin ei ole enää niin merkittävä kuin aiemmin.



Jos ulkoilman lämpötilat ja suhteelliset kosteudet nousevat ilmastonmuutoksen seurauksena, yläpohjan olosuhteet muuttuvat entistä suotuisammiksi homeen kasvulle. Tällöin myös höyrynsulkumuovin yläpinnassa voi esiintyä homeen kasvun kannalta suotuisia olosuhteita kesäaikaan jäädytetyissä rakennuksissa.

Edellä kerrotuista syistä johtuen ehdotettu lämmöneristysmääräysten kiristys 30–40 %:lla nykyisiin U-arvoihin verrattuna ei ole suositeltavaa myöskään yläpohjan osalta. U-arvojen kiristämällä on ehkä yläpohjissa hieman vähemmän haittavaikutuksia kuin alapohjissa ja ulkoseinissä, kun otetaan huomioon rakennusfysikaaliset, tekniset ja taloudelliset tekijät. Siksi yläpohjan U-arvovaatimusta voitaneen kiristää jonkin verran enemmän kuin muissa rakenneosissa, jotta välttyttäisiin mittavilta alapohjan ja ulkoseinien U-arvojen kiristyksiltä.

Kaiken kaikkiaan tuuletettujen yläpohjien suunnitteluohjeita tulee parantaa, jotta yläpohjissa voidaan eliminoida kosteuden haittavaikutukset aiempaa paremmin.

15.7 Ryömintätilainen alapohja

Lämmöneristyksen lisääminen viilentää myös ryömintätilaista alapohjaa ja heikentää sen kosteusteknistä toimintaa. Ryömintätilaisessa alapohjassa riski homeongelmille on kuitenkin vielä suurempi kuin tuulettuvassa yläpohjassa, koska siellä esiintyy jo nykyisin merkittävästi enemmän homeen kasvulle suotuisia olosuhteita maaperän vaikutuksesta. Alapohjassa olosuhteet ovat ajoittain otolliset myös lahottajasienille. Ilmastonmuutos heikentää myös ryömintätilaisen alapohjan toimintaa entisestään.

Puurakenteinen ryömintätilainen alapohja on kosteustekniseltä toiminnaltaan jo nyt riskirakente. Jos alapohja on tehty kivirakenteisena ja eloperäinen rakennusjäte on poistettu ryömintätilasta, on rakenteen kosteudensietokyky oleellisesti parempi kuin puurakenteisella alapohjalla. Ylipäättään ryömintätilan pintojen materiaalien valinnassa tulee kiinnittää entistä enemmän huomiota kosteudenkestävyyteen.

Rakennuksen alaosassa esiintyy tyypillisesti alipainetta, jonka seurauksena homeet ja niiden aineenvaihduntatuotteet kulkeutuvat herkemmin alapohjan läpi huoneilmaan. Ryömintätilaisen alapohjan hyvä ilmatiiviys onkin rakenteen toiminnan kannalta ensiarvoisen tärkeä asia.

Ryömintätilaisen alapohjan läpi tapahtuvat lämpöhäviöt ovat pienempiä kuin ulkoilmaan rajoittuvissa rakennusosissa, koska maaperä lämmittää ryömintätilan ilmaa. Tästä syystä alapohjan lisäeristämisestä saatava taloudellinen hyöty on vähäisempi. Toisaalta maapohjan lämpöeristäminen muuttaa ryömintätilan olosuhteita lähemmäksi ulkoilman olosuhteita. Talviolosuhteissa ryömintätilan lämpötila voi laskea myös pakkasen puolelle, mistä seuraa, että ryömintätilassa kulkevat putket tulee lämpöeristää huolellisesti.

Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan



Edellä kuvatuista syistä johtuen ryömintätilaisen alapohjarakenteen U-arvovaatimusta ei tule merkittävästi kiristää. Myös ryömintätilaisten alapohjien suunnitteluohjeita tulee parantaa, jotta alapohjissa voidaan eliminoida kosteuden haittavaikutukset aiempaa paremmin.

Ehdotukset kosteusmääräyksiin ja -ohjeisiin RakMK C2:

- Ohjeissa korostetaan sitä, että ryömintätilaiseen alapohjaan tehtävät läpiviennit sekä alapohjan ja ulkoseinän liitokset tulee tehdä ilmatiiviiksi.

Ehdotukset lämmöneristysmääräyksiin RakMK C3:

- Ryömintätilaisen alapohjan U-arvovaatimukseksi ehdotetaan arvoa 0,17 W/m²K lämpimän tilan rajoituksessa ulkoilmaan ja arvoa 0,26 W/m²K puoliämpimän tilan rajoituksessa ulkoilmaan.
- Määräyksiin lisätään teksti, että ryömintätilaista alapohjaa ei saa käyttää lämpöhäviöiden kompensointiin tasauslaskennassa.

Ehdotukset lämmöneristys- ja energiankulutusmääräyksiin RakMK C3 ja RakMK D3:

- Siirretään energiankulutusmääräyksistä lämmöneristysmääräyksiin kohta, jossa todetaan, että ryömintätilaisen alapohjan ominaislämpöhäviötä laskettaessa se kerrotaan luvulla 0,8, koska tämä asia olisi luontevampaa esittää rakennuksen lämpöhäviöitä käsittelevässä kohdassa RakMK C3:ssa.

Ehdotukset lämmöneristysohjeisiin RakMK C4:

- Esitetään mahdollisuus määritellä ryömintätilaisen alapohjan U-arvo myös tarkemmin standardin ISO 13370 (2007) mukaan.

Ehdotukset energiankulutusohjeisiin RakMK D5:

- Esitetään mahdollisuus määritellä ryömintätilaisen alapohjan lämpöhäviöt tarkemmin standardin ISO 13370 (2007) mukaan.

15.8 Maanvastainen alapohja

Maanvastaisen alapohjan U-arvo lasketaan nykyisin eri tavalla lämpöhäviöiden tasauslaskelmassa ja energiankulutuslaskelmassa. Laskettaessa alapohjan lämpöhäviöitä tasauslaskelmassa (RakMK C4 2003) maan lämmönvastus on mukana alapohjan U-arvossa. Toisaalta laskettaessa alapohjan lämpöhäviöenergioita (RakMK D5 2007), maan lämmönvastus ei ole mukana alapohjan U-arvossa ja ulkolämpötilan sijaan käytetään RakMK D5 (2007):ssä annettuja alapohjan alapuolisen maan lämpötiloja. Kaksi eri laskentamenetelmää aiheuttaa käytännössä epäselvyyksiä maanvastaisen alapohjan lämpöhäviöiden laskennassa.



Nykyisessä RakMK C4 (2003):ssä annetut maan lämmönvastukset ja RakMK D5 (2007):ssä annetut maanvastaisen alapohjan alapuolisen maan lämpötilat ovat varmalla puolella olevia arvoja, jolloin maan lämmönvastuksen osuus jää laskelmissa merkittävästi pienemmäksi kuin todellisuudessa. Tämän seurauksena maanvastaisen alapohjan lämmöneristyksen lisääminen antaa laskennallisesti selvästi enemmän hyötyä kuin todellisuudessa. ISO 13370 (2007) -standardilla laskettu maanvastaisen alapohjan lämmönvastus on tutkimusten mukaan lähimpänä todellista alapohjan lämmönvastusta.

Koska kansainvälisissä ISO 13370 (2007) ja EN ISO 13790 (2004) -standardeissa otetaan huomioon maan lämmönvastus sekä alapohjan U-arvoa että energiankulutusta laskettaessa, on suositeltavaa, että maan lämmönvastus on mukana kummassakin laskennassa myös Suomen määräyksissä. Tällöin lämpöhäviöiden ja energiankulutuksen laskennassa voidaan käyttää samaa U-arvoa ja laskenta selkeytyisi tältä osin oleellisesti. Tämä edellyttää kuitenkin samalla sitä, että maan lämmönvastuksia korjataan suuremmiksi RakMK C4 (2003) olevassa taulukossa (ks. taulukko 8.1).

Lämpimissä rakennuksissa käytetään nykyisin maanvastaisen alapohjan lämmöneristykseenä yleisesti 150 mm EPS -eristystä. Jos tämän alapohjarakenteen U-arvo lasketaan nykyisen RakMK C4 (2003) laskentamenetelmällä ja maan lämmönvastuksilla, saadaan alapohjan U-arvoksi n. 0,14–0,19 W/m²K riippuen maalajista sekä rakennuksen koosta ja muodosta. Tämä merkitsisi alapohjarakenteen U-arvoon siis n. 20–40 % kiristystä nykytilanteeseen verrattuna. Todellisilla maan lämmönvastuksilla laskettuna U-arvo olisi vielä huomattavasti pienempi. Tätä paksumman lämmöneristyksen käyttö maassa on tarpeetonta.

Lämmöneristepaksuuden lisääminen aiheuttaa myös betonilaatan painumisen lisääntymistä, koska lämmöneristeet joustavat enemmän. Myöskään tästä syystä maanvastaisen alapohjan U-arvoa ei ole syytä kiristää edellä ehdotettua tasoa enemmän.

Koska lämmöneristyksen lisääminen alapohjaan ei tuota todellisuudessa läheskään sitä hyötyä, mitä nykyisten määräysten mukaan saadaan laskennallisesti, ei ole myöskään perusteltua ottaa maanvastaista alapohjarakennetta mukaan lämpöhäviöiden kompensointilaskelmiin. Sama koskee myös maanvastaisia seinärakenteita.

Rakennuksen reuna-alueella lämpövuoto alapohjasta riippuu suurelta osin perusmuurin lämmöneristävyydestä, joten perusmuurin U-arvolle tulisi määrittellä vähimmäisarvo, esimerkiksi 0,25–0,3 W/m²K.

Kosteusteknisesti lämmöneristeen lisääminen maanvastaiseen alapohjaan on hyvä asia, koska maapohja jäähtyy ja riski alapohjan läpi alhaalta ylöspäin tapahtuvan vesihöyryn diffuusion aiheuttamille kosteusongelmille alapohjassa vähenee. Toisaalta nykyisten määräysten mukainen alapohjan lämmöneristävyyden on riittävä rakenteen kosteustekninen toimivuus.



den kannalta ja lämmöneristyksen lisääminen ei paranna rakenteen kosteusteknistä toimintaa tässä suhteessa enää merkittävästi.

Ehdotukset kosteusmääräyksiin ja -ohjeisiin RakMK C2:

- Ohjeissa korostetaan sitä, että maanvastaiseen alapohjaan tehtävät läpiviennit sekä alapohjan ja ulkoseinän liitokset tulee tehdä ilmatiiviiksi.

Ehdotukset lämmöneristysmääräyksiin RakMK C3:

- Maanvastaisen alapohjan ja maanvastaisten seinien U-arvovaatimukseksi ehdotetaan arvoa 0,16 W/m²K lämpimän tilan rajoituksessa ulkoilmaan ja arvoa 0,24 W/m²K puolilämpimän tilan rajoituksessa ulkoilmaan.
- Määräyksiin lisätään teksti, että maanvastaista alapohjaa ja maanvastaisten seinärakenteita ei saa käyttää lämpöhäviöiden kompensointiin tasauslaskennassa.
- Määräyksissä annetaan myös perusmuurille U-arvovaatimus. Lämpimän tilan rajoituksessa ulkoilmaan ehdotettava arvo on 0,25 W/m²K ja puolilämpimän tilan rajoituksessa ulkoilmaan vastaavasti 0,3 W/m²K.

Ehdotukset lämmöneristysohjeisiin RakMK C4:

- Korjataan maan lämmönvastukset suuremmiksi taulukkoon 6.
- Esitetään mahdollisuus määrittellä maanvastaisen alapohjan ja maanvastaisten seinien U-arvot myös tarkemmin standardin ISO 13370 (2007) mukaan.

Ehdotukset energiankulutusohjeisiin RakMK D5:

- Poistetaan ohjeista kaavat, tekstiosuudet ja taulukot, jotka käsittelevät maanvastaisen laatan energiankulutuksen laskentaa perusmaan lämpötilojen avulla. Energiankulutuslaskennassa käytetään samaa maanvastaisen alapohjan U-arvoa, joka on määritetty RakMK C4:n perusteella ottamalla huomioon myös salaojituskerroksen ja perusmaan lämmönvastukset.
- Esitetään mahdollisuus määrittellä maanvastaisen alapohjan ja maanvastaisten seinien lämpöhäviöt tarkemmin standardin ISO 13370 (2007) mukaan.

15.9 Rakennusten routasuojaus

Lämpimien rakennuksen routasuojaus perustuu siihen, että lämpövuot alapohjan läpi pitävät osaltaan perustukset lämpiminä. Mitä enemmän alapohjan lämmöneristystä parannetaan sitä enemmän tarvitaan routasuojausta anturoiden pohjan sulana pitämiseksi talvella. Tässä mielessä alapohjan lämpöeristyksen lisääminen lisää eristyskustannuksia myös routasuojauksen osalta.



Uusissa Talonrakennuksen routasuojausohjeissa (2007) on annettu ohjeet rakennusten routasuojauksen mitoituksesta silloin, jos ryömintätalaisen alapohjan U-arvo on $\geq 0,16$ W/m²K ja maanvastaisen alapohjan U-arvo perusmaan lämmönvastuksen kanssa laskettuna $\geq 0,10$ W/m²K. Mikäli alapohjien U-arvovaatimuksia kiristetään näitä tasoja alemmaksi, routasuojauksen mitoitusohjeet tulee päivittää uudestaan tai mitoitus on tehtävä kylmän rakennuksen routasuojausohjeiden mukaisesti. Kylmän rakennuksen mitoitukseen siirtyminen lisääi routasuojauksen määrää merkittävästi nykyiseen tilanteeseen verrattuna, joten tässä mielessä U-arvojen tarpeeton kiristäminen alapohjarakenteissa ei ole järkevää.

15.10 Rankarakenteiset ulkoseinät

Puurunkoisten ulkoseinärakenteiden nykyiset kosteustekniset suunnitteluohjeet ovat RakMK C2 (1998):ssa puutteelliset eivätkä ne takaa nykyisillä lämmöneristysmääräyksillä toteutettujen seinärakenteiden luotettavaa kosteusteknistä toimintaa kaikissa tilanteissa. Suurimassa osassa ulkoseinärakenteita sisäpinnan höyrynsulun vesihöyrynvastus tulee olla suurempi kuin nykyisissä ohjeissa annettu sisä- ja ulkopinnan välinen vesihöyrynvastussuhde 5:1. Tämä asia korostuu edelleen, kun rakenteiden lämmöneristyspaksuutta kasvatetaan, koska rakenteen ulkopinta viilenee. Lämmöneristeen lisäämisen vaikutukset voidaan kuitenkin eliminoida esim. lisäämällä tuulensuojalevyn lämmönvastusta ja vesihöyrynläpäisevyyttä tai höyrynsulun vesihöyrynvastusta.

Lämmöneristeen lisäämisen vaikutukset ja vaadittavat höyrynsulun vesihöyrynvastuksen minimiarvot voidaan selvittää samalla tarkastelumenetelmällä, jolla ulkoseinärakenteiden toimintaa on tarkasteltu nykyisillä eristepaksuuksilla (Vinha 2007). Tätä menetelmää ja siihen liittyviä periaatteita voidaan käyttää soveltuvin osin myös ylä- ja alapohjarakenteiden kosteusteknisen toiminnan tarkastelussa. Uusissa tarkasteluissa tulee ottaa huomioon myös ilmastonmuutoksen aiheuttamat vaikutukset rakenteiden toimintaan.

RakMK C2 (1998) muutettaessa on mietittävä millä tavalla uudet ohjeet annetaan, koska seinän sisäpinnalta vaadittava vesihöyrynvastus riippuu oleellisesti sekä tuulensuojan että lämmöneristeen rakennusfysikaalisista ominaisuuksista. Eräs mahdollisuus on antaa vaadittut minimiarvot taulukossa.

Höyrynsulkumuovia voidaan käyttää n. 50 mm syvyydellä seinän sisäpinnasta, jos vähintään 75 % lämmöneristeestä on höyrynsulun ulkopuolella. Lisäksi höyrynsulun sisäpuolelle tulee laittaa pystykoolaus tai vaihtoehtoisesti pystyrungon ulkopintaan hyvin lämpöä eristävä tuulensuoja tai vaakakoolaus.

Jos ulkoilman lämpötilat ja suhteelliset kosteudet nousevat ilmastonmuutoksen seurauksena, olosuhteet muuttuvat ulkoseinän ulko-osissa entistä suotuisammiksi homeen kasvulle. Tällöin myös höyrynsulkumuovin ulkopinnassa voi esiintyä homeen kasvun kannalta suotuisia olosuhteita kesäaikaan jäähdytetyissä rakennuksissa.



Ehdotukset kosteusmääräyksiin ja -ohjeisiin RakMK C2:

- Ohjeissa korostetaan sitä, että ulkoseiniin tehtävät läpiviennit sekä ulkoseinän liitokset muihin rakennusosiin tulee tehdä ilmatiiviiksi.
- Höyrynsulun vesihöyrynvastukselle annettu minimiarvo on liian alhainen rakenteiden turvallisen kosteusteknisen toiminnan takaamiseksi. Ohjetta tulee muuttaa ja siinä tulee samalla ottaa huomioon lisäeristyksen ja ilmastonmuutoksen aiheuttamat vaikutukset.
- Ohjeissa todetaan, että vähintään 75 % lämmöneristyksestä tulee olla höyrynsulku-muovin ulkopuolella.
- Ohjeissa todetaan, että lämpöä eristävä tuulensuoja parantaa puurunkoisen seinäraken-teen kosteusteknistä toimintaa.

Ehdotukset lämmöneristysmääräyksiin RakMK C3:

- Ulkoseinän U-arvovaatimukseksi ehdotetaan arvoa 0,17 W/m²K lämpimän tilan rajoittu-essa ulkoilmaan ja arvoa 0,26 W/m²K puolilämpimän tilan rajoittuessa ulkoilmaan.

15.11 Massiivirakenteet

Massiivirakenteiset ulkoseinät ja yläpohjat toimivat kosteusteknisesti turvallisesti, koska niissä ei ole rakennekerrosten välisiä rajapintoja, joihin kosteus voi tiivistyä tai joissa voi syntyä homeen kasvua.

Massiivirakenteen sisäpuolinen lämmöneristys heikentää rakenteen kosteusteknistä toimintaa käytettävästä lämmöneristeestä riippumatta, koska massiivirakenne viilenee. Tällöin massiivirakenteen sisäpinnassa voi esiintyä paljon herkemmin kosteuden kondenssia tai homeen kasvun kannalta otollisia olosuhteita. Pahin tilanne syntyy silloin, jos sisältä pääsee virtaamaan kosteaa ilmaa lämmöneristeen taakse massiivirakenteen sisäpintaan.

Lisättäessä lämmöneristystä rakenteen sisäpuolelle sen kosteustekninen toiminta heikenee entisestään, vaikka rakenteen sisäpinnassa olisi tiivis höyrynsulku. Kosteutta läpäiseviä ilmansulkukalvoja ei tule käyttää tällaisten rakenteiden sisäpinnassa. Rakenne myös kuivuu hitaammin kuin lisäeristämätön rakenne ja sen kosteuspiitoisuus jää korkeammalle tasolle. Sisäpuolinen lämmöneriste estää myös ikkunoista tulevan lämpösäteilyn varautumista vaipparakenteisiin.

Sisäpuolelta eristettyjen massiivirakenteiden kosteusteknistä toimintaa tulee kartoittaa laajempien laskentatarkastelujen avulla, jotta voidaan määrittää kriittiset lämmöneristyspak-suudet rakenteiden suunnittelua ja toteuttamista varten. Näissäkin laskelmissa tulee ottaa huomioon myös ilmastonmuutoksen aiheuttamat vaikutukset. Massiivirakenteisten seinien



toimintaa voidaan tutkia saman tarkastelumenetelmän avulla, jota on käytetty puurunkoisten ulkoseinärakenteiden toiminnan arvioinnissa (Vinha 2007).

Mikäli vanhoille rakennuksille asetetaan tulevaisuudessa lämmöneristysmääräyksiä korjauksen yhteydessä, joudutaan korjauksissa turvautumaan monissa tapauksissa sisäpuoliseen lämmöneristämiseen, koska rakenteita ei voida tai haluta lisäeristää ulkopuolelta. Tämä lisää merkittävästi riskiä rakenteiden kosteusvaurioille. Sisäpuolisen lämmöneristämisen aiheuttamat riskit onkin arvioitava huolellisesti korjausrakentamiseen kohdistuvia määräyksiä suunniteltaessa.

Jos massiivirakenteeseen tehdään lisäeristys ulkopuolelle avohuokoista lämmöneristettä käyttäen, rakenteen kosteustekninen toiminta yleensä paranee, mutta samalla menetetään merkittävä osa rakenteen lämmönvarauskyvystä, koska auringonsäteily ei pääse lämmittämään enää massiivirakenteen pintaa ulkoa päin. Joissakin tapauksissa, kuten esim. kevyt-betonikatoissa, kyse on merkittävästä ilmaisen lämpöenergian vähenemisestä vuositasolla.

Rakennuksen lämmönkulutuksen vähentyminen riippuu mm. sen maantieteellisestä sijainnista, rakennuksen ympärillä olevasta varjostuksesta, pintojen värityksestä ja vaipassa mahdollisesti olevan lämmöneristekerroksen paksuudesta. Näistä syistä johtuen lämmönkulutuksen vähenemisen arviointi eri tilanteissa on hankalaa ja ilmiön mukaan ottaminen energiankulutuslaskelmiin on haasteellista. TTY:ssä tehtyjen tutkimusten perusteella lämmönkulutus voi vähentyä massiivirakenteisilla ulkoseinillä toteutetuissa rakennuksissa vuositasolla n. 5–10 % seinän ulko-osan lämmönvarauskyvyn vaikutuksesta. Jos myös katto on massiivirakenteinen, voi lämmönkulutus vähentyä merkittävästi enemmänkin.

Rakenteiden massiivisuutta voidaan hyödyntää etenkin jäähdytysenergian kulutuksen alentamisessa sekä kesäajan viihtyisyyden parantamisessa esim. yötuuletuksen avulla, kuten RakMK D3 (2007):ssa on todettu. Tämä mahdollisuus tulisi ottaa huomioon uusien rakennusten energiasuunnittelussa.

Ehdotukset lämmöneristysmääräyksiin RakMK C3:

- Vaikka massiivirakenteiden lämmönvarauskyky voi vähentää rakennuksien lämmönkulutusta jonkin verran, ei hirsiseinän näin paljon muista ulkoseinärakenteista poikkeavalle U-arvovaatimukselle ole olemassa fyysisiä perusteita. Muista rakenteista poikkeavia arvoja tulee harkita tarkkaan, koska muille massiivirakenteille, kuten kevytbetonirakenteille, ei ole ehdotettu erillisiä arvoja.

15.12 Rakennusten jäähdytys

Toimisto- ja asuinrakennusten jäähdytystarve tulee lisääntymään jo nyt kaavaillun 30–40 % U-arvojen kiristymisen seurauksena, mutta varsinkin siinä vaiheessa, jos tästä tasosta aio-



taan määräyksiä kiristää vielä lisää. Jäähdytystarve lisääntyy myös ilmastonmuutoksen seurauksena kesälämpötilojen noustessa. Jo nykyisin jäähdytystarve on selvästi olemassa mm. toimistorakennuksissa ja kerrostalojen ylimmissä kerroksissa. Tämä ongelma ei poistu pelkästään sillä, että sisätiloja suojataan auringonsäteilyltä, koska sisäistä lämpöä syntyy merkittävässä määrin myös rakennuksen käyttäjistä, laitteista ja valaistuksesta.

Vaipan lisäeristys lisää tarvetta erilaisille rakenneteknisille ym. ratkaisuille, kun yritetään estää koneellisen jäähdytyksen tarve RakMK D3 (2007) mukaisesti. Nämä ratkaisut tulevat lisäämään rakennuskustannuksia ja vähentävät siten lisäeristämisen kannattavuutta.

Kesäaikainen jäähdytys ei aiheuta vielä nykyisissä Suomen ilmasto-olosuhteissa vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa merkittäviä riskejä, mutta kesälämpötilojen ja ulkoilman vesihöyrypitoisuuden noustessa tilanne voi muuttua, kosteusvirran suunnan ollessa pitkiä aikoja ulkoa sisälle päin.

Lämmöneristysmääräysten kiristyessä rakennusten viilennyksen ja jäähdytyksen ratkaisuja on tutkittava ja ohjeistettava tarkemmin, koska näistä puuttuu tällä hetkellä tietoa. Tärkeintä on ohjeistaa, miten rakenneteknisin keinoin ja sisäisiä lämpökuormia vähentämällä voitaisiin välttää koneellisen jäähdytyksen rakentamiselta.

15.13 Kylmäsilat

Vaipan lämmöneristykseen paksuntaminen vaikuttaa vaipan kylmäsiltoihin kahdella tavalla. Niissä tapauksissa, joissa ulkopuolisia rakenteita tai ulkoverhousta joudutaan kannattamaan ulkoseinän sisäkuoresta, joudutaan käyttämään järeämpiä kannattimia ja tukirakenteita, koska matka seinän sisäkuoreen pitenee (esim. ulokkeet ja betonielementtien ansaat). Tämä lisää tukirakenteiden aiheuttamia kylmäsiltoja ulkoseinissä. Toisaalta paksumpi lämmöneristyskerros mahdollistaa esim. rankarakenteiden kylmäsilta vaikutuksen pienentämisen, koska rakenne voidaan suunnitella ristikoolauksien tai eriytetyn kaksoisrungon avulla siten, että tukirunko ei jatku yhtenäisenä lämmöneristekerroksen läpi. Tästä syystä myös rakennusosien välisten liitosten ja seinänurkkien aiheuttamia kylmäsiltoja voidaan usein pienentää, koska liitosalueelle mahtuu enemmän lämmöneristettä runkorakenteiden lisäksi.

Nykyisessä RakMK D5 (2007):ssä vaipparakenteiden pinta-alat lasketaan vaipan sisäpintojen mukaan, mikä aliarvoi vaipan läpi tapahtuvia lämpöhäviöitä, jos liitos- ja nurkkakohtien kylmäsilat jätetään laskelmissa ottamatta huomioon. Toisaalta, kuten edellä todettiin, paksumpien rakenteiden liitos- ja nurkkakohtien kylmäsilta vaikutusta voidaan usein pienentää, jolloin niiden huomioon ottaminen laskelmissa erikseen ei ole enää yhtä tarpeellista. Lisäksi rakennusosien U-arvojen laskennassa käytetään materiaalien lämmönjohtavuuksina jonkin verran varmallia puolella olevia arvoja, jolloin tämänkin tekijän voidaan ajatella kompensoivan liitosalueen kylmäsilta vaikutusta. Edellä mainituista tekijöistä johtuen voidaan ajatella,



että paksujen rakennusosien liitosalueilla syntyviä kylmäsiltoja ei tarvitsisi ottaa jatkossakaan erikseen huomioon.

Suurimmat rakennusosien välisten liitosalueiden lämpöhäviöt syntyvät ohuiden rakennusosien kuten ikkunoiden, ovien ja huolto-/tuuletusluukkujen liittyessä paksuihin ulkoseinä- ja yläpohjarakenteisiin. Tällöin paksujen rakennusosien tehollinen lämmöneristyspaksuus liitosalueella ei vastaa rakenteen todellista lämmöneristyspaksuutta. Kiristettäessä rakennusosien lämmöneristysmääräyksiä nykyisestä tasosta nämä heikennykset tulee ottaa laskennallisesti huomioon.

RakMK C4 (2003):ää uudistettaessa tulee aikaisempaa selvemmin eritellä ne kylmäsiltoja, joita ei tarvitse ottaa huomioon laskettaessa rakenteiden lämmönläpäisykertoimia ja koko rakennuksen lämpöhäviötä.

Samassa yhteydessä tulisi myös epätasa-aineisessa rakennusosassa olevien kylmäsiltojen laskenta yhtenäistää SFS-EN ISO 6946 (2007) –standardin mukaiseksi siten, että rakenteen lämmönvastukselle lasketaan sekä ylä- että alalikiarvo. Jos RakMK C4 (2003):ää ei uudisteta samaan aikaan kuin nyt kaavailtuja RakMK osia, tulisi uudessa RakMK C3:ssa esittää mahdollisuus käyttää epätasa-aineisen rakennusosan U-arvon määrittämisessä myös SFS-EN ISO 6946 (2007) -standardin laskentamenetelmää, vaikka materiaalien lämmönjohtavuuksina käytettäisiinkin normaalin lämmönjohtavuuden arvoja.

Huolto- ja tuuletusluukulle tulee antaa määräyksissä myös U-arvovaatimus, koska niidenkin vaikutus energiankulutukseen korostuu jatkossa. RakMK C4 (2003):ssä on jo aiemmin puhuttu tuuletusluukun U-arvon määrittämisestä, mutta sille ei ole annettu U-arvovaatimusta RakMK C3 (2007):ssa. Tuuletusluukun osalta tulee harkita vähimmäispinta-alan antamista luukuille, joita määräys koskee.

Ehdotukset lämmöneristysmääräyksiin RakMK C3:

- Esitetään mahdollisuus määrittellä epätasa-aineisen rakenteen U-arvo myös tarkemmin standardin SFS-EN ISO 6946 (2007) mukaan.
- Määräyksissä annetaan myös huolto-/tuuletusluukulle U-arvovaatimus. Ehdotettava U-arvovaatimus on sama kuin ovilla eli $0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Ehdotukset lämmöneristysohjeisiin RakMK C4:

- Muutetaan epätasa-aineisen rakennusosan U-arvon laskentamenetelmä vastaamaan standardin SFS-EN ISO 6946 (2007) laskentamenetelmää siten, että rakenteen lämmönvastukselle lasketaan sekä ylä- että alalikiarvo.



- Ohuen rakennusosan (ikkuna, ovi, huolto-/tuuletusluukku) liittyessä paksuun rakennusosaan tulee liitosalueen tehoton lämmöneristepaksuus ottaa huomioon lisäkonduktanssin avulla. Eri tyypisille liitoksien lisäkonduktanssit voidaan antaa esim. taulukossa.
- Ohjeissa tulee luetella aiempaa tarkemmin ne paksujen vaipparakenteiden liitokset ja muut kylmäsiilat, joita ei tarvitse ottaa rakenteiden U-arvoja ja vaipan lämpöhäviötä laskettaessa huomioon.

15.14 Ilmanvaihto

Energiankulutusmääräysten kiristämisen myötä on yhä tärkeämpää kiinnittää huomiota myös ilmanvaihdon tarkoituksenmukaiseen suunnitteluun turhan ilmanvaihdon vähentämiseksi rakennuksissa. Tätä asiaa on syytä erikseen korostaa uusissa ilmanvaihtomääräyksissä.

Pientaloissa voidaan hyväksyä ilmanvaihtokerroin 0,4 1/h koska tutkimusten mukaan pientaloissa asukastiheys on niin pieni, että tämäkin ilmanvaihtokerroin on riittävä (Vinha et al. 2005). Ilmanvaihtokertoimen ollessa puurunkoisissa pientaloissa yli 0,5 1/h asukkaiden vetovalitukset lisääntyivät (Vinha et al. 2005). Kerrostalojen osalta on kuitenkin syytä pitää edelleen ilmanvaihtokerroin 0,5 1/h voimassa (Vinha et al. 2008).

Julkisissa tiloissa tulee olla ilmanvaihdon jaksottainen säätömahdollisuus, jolla ilmanvaihtoa voidaan pienentää esim. yöaikaan, kun tilat ovat tyhjillään. Lisäksi ilmanvaihtoa tulisi voida ohjata automaattisesti niihin tiloihin, jotka ovat kulloinkin käytössä ja vähentää muista tiloista. Samanlaiset säätömahdollisuudet tulisi saada myös asuinrakennuksiin. Järjestelmää voitaisiin käyttää esim. siten, että ilmanvaihto tehostuu automaattisesti yöaikaan makuuhuoneissa ja vähenee taas muualla asunnossa. Tällaisen järjestelmän toteuttamiselle ei ole teknisiä esteitä ja lämmöneristysmääräysten kiristyessä sen tekeminen on myös taloudellisesti yhä kannattavampaa. Tilakohtaisesti automaattisesti muuttuva ilmanvaihto tulee voida hyödyntää täysimääräisesti myös energiankulutuslaskelmissa ja rakennuksen energiatehokkuusluokkaa määritettäessä.

Aiemmin jo luvussa 3 todettiin, että rakennuksen ilmatiiviyden paraneminen asettaa entistä suurempia vaatimuksia ilmanvaihdon säätämiseksi ja luotettavalle toiminnalle. Ilmanvaihdon säätäminen on tärkeää, jotta tiloihin ei synny suuria yli- tai alipaineita ulkoilmaan nähden. Luotettavan toiminnan varmistaminen edellyttää puolestaan asuintiloihin asennettavia seuranta-/ hälytysjärjestelmää, jonka avulla käyttäjä voi huomata ilmanvaihdon toimintakatkokset. Samalla on kiinnitettävä entistä enemmän huomiota myös suodattimien säännölliseen vaihtamiseen, jotta ilmanvaihto toimii toivotulla tavalla.

Ehdotukset ilmanvaihtomääräyksiin ja -ohjeisiin RakMK D2:

- Pientalojen ilmanvaihtokerroin voidaan muuttaa arvoon 0,4 1/h.

Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan



- Julkisissa tiloissa tulee olla ilmanvaihdon jaksottainen säätömahdollisuus. Vastaava säätömahdollisuus tulisi olla myös asuintaloissa.
- Ilmanvaihdossa tulee pyrkiä myös tilakohtaiseen säätöön. Vastaava säätömahdollisuus tulisi olla myös asuintaloissa.

Tampereella 31.10.2008

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Rakennustekniikan laitos
Talonrakennustekniikka

Juha Vinha
Yliassistentti, tekn. toht.

Ralf Lindberg
Professori, tekn. toht.



LÄHDELUETTELO

- Ahrnens, C. & Borglund, E. 2007. Fukt på kallvindar- en kartläggning av småhus i Västra Götalands län. Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och vattenbyggnad, Chalmers Reproservice. Göteborg.
- Arfvidsson, J. & Harderup, L-E. 2005. Moisture Safety in Attics Ventilated by Outdoor Air. Proceedings of the 7th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries.
- Forsaeus, N. & Thorin, M. 2007. Styrd ventilations av kallvindar – praktiska erfarenheter. Bygg & teknik 4/07.
- EN ISO 13790:2004. Thermal performance of buildings. Calculation of energy use for space heating.
- Energiatilasto, Vuosikirja 2007. 2008. Tilastokeskus. Helsinki.
- Hagentoft, C-E. 2001. Introduction to Building Physics. Studentlitteratur. Lund.
- Hagentoft, C-E., Sasic Kalagasidis, A., Ahrnens, C. & Borglund, E. 2007. Effekter på funktion och kostnad ac styrd ventilation av kallvindrar. Bygg & teknik 4/07.
- Hemmilä, K. & Heimonen, I. VTT Rakennustekniikka. 1997. Kondenssi ikkunoiden ulkopintaan. Artikkel. Lasirakentaja 1/97.
- Hemmilä, K. VTT Rakennustekniikka. 2008. Mahdollisuudet parantaa ikkunoiden lämmöneristävyyttä. Artikkel. Lasirakentaja 1/08.
- Hietämäki, T., Kuoppala, J.-M., Kalema, T. & Taivalantti, K. 2003. Rakennusten massiivisuus: keskeiset tutkimukset ja tulokset. Tampereen teknillinen yliopisto, Energia- ja prosessitekniikan laitos. Raportti 174,
- ISO 13370:2007. Thermal performance of buildings. Heat transfer via the ground. Calculation methods.
- Kalamees, T., Kurnitski, J., Jokisalo, J. & Vinha, J. 2007. Painesuhteet Pientalossa. Sisäilmastoseminaari 2007, SIY raportti 25. s. 259–264.
- Kalema, T., Pylsy, P., Hagengran, P., Jóhannesson, G., Airaksinen, M., Dokka, T.H., Öberg, M., Pöysti, M., Rapp, K. & Keski-Opas, J. 2006. Nordic Thermal Mass – Effect on Energy and Indoor Climate. Tampere University of Technology, Institute of Energy and Process Engineering. Report 184. 105 p.
- Kokko, E., Ojanen, T. & Salonvaara, M. 1997. Uudet vaipparakenteet. Energian säästö ja kosteustekniikka. VTT tiedotteita 1869. Espoo.
- Leivo, V. & Rantala, J. 2003. Maanvastaisten alapohjarakenteiden kosteustekninen toimivuus. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennetekniikan laitos. Tutkimusraportti 120. 106 s + 13 liites.
- Leivo, V. & Rantala, J. 2005. Lattialämmitetyn alapohjarakenteen rakennusfysikaalinen toimivuus. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennetekniikan laitos. Tutkimusraportti 126. 140 s.
- Leivo, V. & Rantala, J. 2006. Maanvastaisten rakenteiden mikrobiologinen toimivuus. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennetekniikan laitos. Tutkimusraportti 139. 57 s + 55 liites.

Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan



- Lindberg, R.; Keränen, H. & Teikari, M. 1998. Ulkoseinärakenteen vaikutus rakennuksen energiankulutukseen. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Rakennustekniikan osasto, Talonrakennustekniikka. Julkaisu 90. 33 s. + 25 liites.
- OlosuhdeVahti™-esite. http://www.hedtec.fi/files/hedtec/teollisuus_esitteet/Olosuhdevahti_esite_low_res.pdf. Viitattu 29.9.2008.
- Padt, M., Tolstoy, N. & Deling J. 2004. Fukttekniska lösningar för kryppgrunden med problem. Bygg & teknik 8/04, ss. 29-34.
- RakMK C2. 1998. Kosteus, määräykset ja ohjeet 1998. Ympäristöministeriö.
- RakMK C3. 2007. Rakennuksen lämmöneristys, määräykset 2007. Ympäristöministeriö.
- RakMK C4. 2003. Lämmöneristys, ohjeet 2003. Ympäristöministeriö.
- RakMK D2. 2003. Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto, määräykset ja ohjeet 2007. Ympäristöministeriö.
- RakMK D3. 2007. Rakennusten energiatehokkuus, määräykset ja ohjeet 2007. Ympäristöministeriö.
- RakMK D5. 1985. Rakennusten lämmityksen tehon- ja energiantarpeen laskenta, ohjeet 1985. Ympäristöministeriö.
- RakMK D5. 2007. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta, ohjeet 2007. Ympäristöministeriö.
- Rantala, J. 2003. On thermal interaction between slab-on-ground structures and subsoil in Finland. Doctoral Thesis. Tampere University of Technology. Publication 542. 129 p. + app. 22 p.
- RIL 225-2004. 2004. Rakennusosien lämmönläpäisykertoimien laskenta. Ohje standardien SFS-EN ISO 10456 ja SFS-EN ISO 6946 soveltamiseen. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry. Helsinki.
- Samuelson, I. 1996. Moisture Balance in Unheated Roof Spaces – the Importance of Ventilation and Choice of Insulation Materials. Proceedings of the 4th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries: Building Physics '96.
- Samuelson, I. & Hägerhels Engman, L. 2006. Kalla Vindar – problem och förbättringar. Bygg & Teknik 4/06.
- Sasic Kalagasidis, A. 2007. Simulations as the way of bridging the gaps between desired and actual building performance. 10th International Building Performance Simulation (IBPSA) Conference, Beijing, China.
- SBUF Informerar nro 07:17. 2007. Fuktdimensionering av kryppgrund. SBUF Informerar nro 07:17. Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond.
- SFS-EN ISO 6946:2007. Building components and building elements. Thermal resistance and thermal transmittance. Calculation method.
- Sisäilmastoluokitus 2008 – lausuntoversio 6.5.2008. Sisäilmayhdistys ry.
- Talonrakennuksen routasuojausohjeet. 2007. VTT ja Rakennustieto Oy. 96 s.
- Uvsløkk, S. 2005. Moisture and temperature conditions in cold lofts and risk of mould growth. Proceedings of the 7th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries: Building Physics '2005. volume 1.

Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan



- Vinha, J. 2007. Hygrothermal Performance of Timber-Framed External Walls in Finnish Climatic Conditions. A Method for Determining the Sufficient Water Vapour Resistance of the Interior Lining of a Wall Assembly. Doctoral Thesis. Tampere University of Technology, Publication 658. 338 p. + app. 10 p.
- Vinha, J., Korpi, M., Kalamees, T., Eskola, L., Palonen, J., Kurnitski, J., Valovirta, I., Mikkilä, A. & Jokisalo, J. 2005. Puurunkoisten pientalojen kosteus- ja lämpötilaolosuhteet, ilmanvaihto ja ilmatiiviys. Tampereen Teknillinen Yliopisto, Talonrakennustekniikan laboratorio. Tutkimusraportti 131.
- Vinha, J., Korpi, M., Kalamees, T., Jokisalo, J., Eskola, L., Palonen, J., Kurnitski, J., Aho, H., Salminen, M., Salminen, K. & Keto, M. 2008. Asuinrakennusten ilmanpitävyys, sisäilmasto ja energiatalous. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Talonrakennustekniikka, Tutkimusraportti 140. Julkaistaan vuonna 2008.
- Vinha, J. & Lähdesmäki, K. 2008. MS2E- ja MSE-ikkunan lämpötila- ja kosteusolosuhteiden seurantamittaus kerrostalohuoneistossa. Tampereen teknillinen yliopisto, Talonrakennustekniikka. Tutkimusselostus 1684/2008.
- Werner, A. 2007. External water condensation and angular solar absorptance. Theoretical analysis and practical experiences of modern windows. Doctoral Thesis, Uppsala universitet, Faculty of Science and Technology. Publication 283. 132 p.
- Ympäristöministeriön asetus rakennuksen energiatodistuksesta 765/2007.