



TEKNIikka JA LIIKENNE

Rakennustekniikka

Talonrakennustekniikka

INSINÖÖRITYÖ

**SEINÄRAKENTEEN LISÄERISTEEN VAIKUTUS RAKENTEEN LÄMPÖ- JA
KOSTEUSOMINAISUUKSIIN**

**Työn tekijä: Mikko Peltoniemi
Työn ohjaaja: Kari Suvanto**

Työ hyväksytty: ____ . ____ . 2011

**Kari Suvanto
Lehtori**



ALKULAUSE

Tämä insinööriyö tehtiin Metropolian yliopettaja Pekka Tommilan ehdotuksesta. Haluan kiittää perhettäni tuesta ja työrauhasta sekä Kari Suvantoa ja Eila Sammallahtea neuvoista ja ehdotuksista työn suoritusta varten.

Espoossa 26.3.2011

Mikko Peltoniemi

TIIVISTELMÄ

Työn tekijä: Mikko Peltoniemi	
Työn nimi: Seinärakenteen lisäeristeen vaikutus rakenteen lämpö- ja kosteusominaisuuksiin	
Päivämäärä: 26.3.2011	Sivumäärä: 36 s
Koulutusohjelma: Rakennustekniikka	Suuntautumisvaihtoehto: Talonrakennustekniikka
Työn ohjaaja: Lehtori Kari Suvanto	
<p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää ulkoseinärakenteiden eristepaksuudet uusien 1.1.2010 voimaan tulleiden vaatimusten mukaisesti muutamalle tyypilliselle seinärakenteelle. Tarkoitus oli tutkia, miten lämmönsiirtyminen ja kosteudensiirtyminen rakenteessa muuttuvat kun eristettä lisätään.</p> <p>Työssä tarkasteltiin myös, miten rakennusfysiikkaohjelmat toimivat nykyaikaisessa rakentamisessa, sekä pohdittiin, millaisissa tapauksissa sovelluksista on hyötyä.</p> <p>Työ toteutettiin selvittämällä, miten U-arvovaatimukset muuttuivat. Lisäksi tutkittiin neljää erilaista pientalon ulkoseinärakennetta ja simuloitiin ne kahdella rakennusfysiikkaohjelmalla. Simulaatiot suoritettiin lämmön ja kosteuden siirtymisen osalta. Simulaatioista saatiin tuloksia, joita tulkittiin työn lopussa.</p> <p>Tuloksista huomattiin, että lämmöneristepaksuuden kasvaessa eristeen lämpötila pienenee rakenteen ulkopuolella ja samoin suhteellinen kosteus kasvaa.</p>	
Avainsanat: Lämmöneristeet, kosteus, U-arvo, rakennusfysiikkaohjelmat	

ABSTRACT

Name: Mikko Peltoniemi

Title: Effect of Add-on insulation in Wall Structures on Heat and Humidity Attributes of the Structure

Date: 26 March 2011

Number of pages: 36

Department: Civil Engineering

Study Programme: Construction and Site Management

Instructor and Supervisor: Kari Suvanto, Senior Lecturer

The purpose of this thesis was to find out how much more insulation a few different wall structures require, so that requirements that came into effect January.2010 would be fulfilled. Plan was to research how the heat and moisture transfer will change in a wall structure when there is more insulation.

One objective in this thesis was to find out how important tool computer simulations are in modern construction and where they provide extra value.

This thesis was completed by exploring how U-value demands had changed. Then four different wall structures of maisonettes were examined and simulated with two computer simulation programs. Simulations were executed on heat transfer and humidity transfer.

Findings revealed that if insulation thickness increases, then temperature of insulations inside drops outside of the wall structure and relative humidity rises.

Keywords: Thermal insulation, Humidity, U-value, Simulation software

SISÄLLYS

ALKULAUSE

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KÄSITTEITÄ

1	JOHDANTO	1
1.1	VTT:n ja Tampereen teknillisen yliopiston selvitykset matalaenergiarakenteista	2
1.2	Tampereen Teknillisen yliopiston selvitys matalaenergiatalon toimivuudesta	2
1.3	VTT:n selvitys rakenteiden energiatehokkuuden parantamisen vaikutuksesta rakenteiden kosteustekniseen toimivuuteen	3
2	FYSIIKKASIMULAATIOIDEN KÄYTTÖ RAKENNUSTEKNIKASSA	4
2.1	Laskelmien luotettavuus ja lähtöarvot	5
2.2	Comsol Multiphysics	6
2.3	WUFI	7
3	U-ARVOVAATIMUKSET 2010	8
3.1	Lämmin ja erityisen lämmin tila	8
3.2	Lämmön talteenotto ja kompensatiolaskelmat	10
3.3	Rakennusmääräyskokoelma C4 ja Standardi SFS-EN ISO 6946	10
3.4	Lämmönläpäisykertoimen määrittäminen	10
3.5	Lämmönläpäisykertoimen laskeminen rakentamismääräyskokoelma C4 mukaan	11
4	TARKASTELTAVIEN SEINÄRAKENTEIDEN VERTAILU RAKENTAMISMÄÄRÄYSKOKOELMAN C3 2007 JA MÄÄRÄYSTEN 2010 MUKAAN	12
4.1	Seinärakenteet	12
4.2	Lämmöneristeitä	16
5	FYSIKAALINEN MALLI	18
5.1	Lämmön siirtyminen	18
5.1.1	Lämmön siirtymisen tarkastelu Comsolilla	19

5.2	Kosteuden siirtyminen	20
5.2.1	<i>Veden kapillaarinen siirtyminen</i>	20
5.2.2	<i>Diffuusio</i>	20
5.2.3	<i>Vesihöyryn konvektio</i>	21
5.2.4	<i>Kosteuden siirtymisen tarkastelu WUFI:lla</i>	21
5.3	Ulkoseinärakenteiden kosteustekninen toiminta	22
5.4	Kosteusvaurioriskejä matalaenergiataloissa	22
5.5	Kosteusvauriot	23
5.5.1	<i>Mikrobien kasvuedellytykset</i>	23
6	TULOKSET	24
6.1	Seinärakenteiden eristepaksuuden vertailun tulokset	24
6.1.1	<i>Täystiiliseinä</i>	24
6.1.2	<i>Betonielementtiseinä</i>	25
6.1.3	<i>Puurunkoseinä puukuitueristeellä</i>	26
6.1.4	<i>Siporexseinä</i>	28
6.2	Seinärakenteiden suhteellisen kosteuden tarkastelu WUFI:lla	29
6.3	Seinärakenteiden kosteuskuvaajat	30
7	JOHTOPÄÄTÖKSET	34
	VIITELUETTELO	35

Käsitteitä

Ilmansulku

Rakennusosassa oleva ainekerros, joka estää haitallisen ilmavirtauksen rakennusosan läpi puolelta toiselle.

Keskimääräinen lämmönjohtavuus (λ_{10}), W/(m * K)

Keskimääräinen lämmönjohtavuus ilmoittaa aineen lämmönjohtavuuden yksittäisten mittaustulosten aritmeettisen keskiarvon, kun mittaukset on suoritettu 10 °C keskilämpötilassa.

Kylmäsilta

Rakennusosassa oleva, viereisiin aineisiin verrattuna hyvin lämpöä johtavasta aineesta tehty rakenneosaa, jonka kohdalla lämpötilaeron vaikutuksesta rakennusosan pintojen läpi kulkevan lämpövirran tiheys on jatkuvuustilassa viereiseen alueeseen verrattuna suurempi. Esimerkiksi tiilisiteet aiheuttavat kylmäsilta-vaikutuksen.

Lämmöneriste

Rakennusaine, jota käytetään pääasiallisesti tai muun käyttötarkoituksen ohella rakenteen tai rakennusosan lämmöneristämiseen.

Lämmöneristys

Yhdestä tai useammasta lämmöneristeestä rakennusosaan tehty eristekokonaisuus.

Lämmönjohtavuus (λ), W/(m * K)

Lämmönjohtavuus ilmoittaa lämpövirran tiheyden jatkuvuustilassa pituusyksikön paksuisen tasa-aineisen ainekerroksen läpi, kun lämpötilaero ainekerroksen pintojen välillä on yksikön suuruinen.

Lämmönläpäisykerroin (U), W/(m² * K)

Lämmönläpäisykerroin ilmoittaa lämpövirran tiheyden, joka jatkuvuustilassa läpäisee rakennusosan, kun lämpötilaero rakennusosan ero puolilla olevien ympäristöjen välillä on yksikön suuruinen.

Lämmönvastus (R), (m² * K)/W

Termisessä jatkuvuustilassa olevan tasapaksun ainekerroksen tai kerroksellisen rakenteen lämmönvastus ilmoittaa rakenteen eri puolilla olevien isotermisten pintojen lämpötilaeron ja ainekerroksen läpi kulkevan lämpövirran tiheyden suhteen.

Normaalinen lämmönjohtavuus (λ_n), W/(m * K)

Normaalilla lämmönjohtavuudella tarkoitetaan rakennusmääräyskokoelman C4 mukaista lämmönjohtavuuden suunnitteluarvoa käytännön rakennustoiminnan laskelmia varten.

Sisä- ja ulkopuolinen pintavastus (R_{si} , R_{se}), (m² * K)/W

Ilmoittaa rakennusosan pinnan ja sisä- tai ulkopuolisen ympäristön välisen rajakerroksen lämmönvastuksen.

Suhteellinen kosteus (RH)

Suhteellinen kosteus (RH) määrittää vallitsevan vesihöyryn paineen (P_w) ja kylläisen vesihöyryn paineen (P_{ws}) välisenä suhteena tietyssä lämpötilassa.

- $RH = (P_w / P_{ws}) \times 100 \%$

Tuulensuoja

Rakennusosassa oleva ainekerros, jonka pääasiallinen tehtävä on estää haitallinen ilmavirtaus ulkopuolelta sisäpuoliseen rakenteen osaan ja takaisin.

1 JOHDANTO

Tässä insinööriyössä pyritään selvittämään pientalojen tavanomaisten ulkoseinien paksuudet uusien 1.1.2010 voimaan tulleiden U-arvomääräysten mukaisesti. Työssä tarkastellaan myös sitä, miten uudet määräykset vaikuttavat kosteuden siirtymiseen ulkoseinän läpi, kun seinä on paksumpi ja tiiviimpi. Määräykset koskevat uusia rakennuksia.

Tarkoitus on selvittää, minkä verran eristettä tarvitaan lisää ja miten tietyt materiaalit, kuten Siporex toimivat uusien määräysten mukaan. Rakennusten lämmöneristys- ja energiakulutusmääräysten kiristämisen aiheuttamien vaikutusten arvioiminen rakentamisessa on varsin haasteellinen ja monimutkainen ongelma. Kyse on kokonaisuudesta, joka sisältää rakennusfysikaalisia näkökulmia sekä rakennusteknisiä ja taloudellisia tekijöitä. U-arvon kiristäminen pienentää lämmityksen tarvetta, mutta sillä voi olla myös haitallisia vaikutuksia. Esimerkiksi kosteusvaurioriski voi kasvaa riippuen käytettävistä rakenteista, rakennusmateriaaleista, työmenetelmistä, rakennuksen sisä- ja ulkoilman olosuhteista ja rakennuspaikasta. Muutokset voivat olla paikoitellen niin suuria, että aikaisemmat tavat ja rutinit jäävät hyödyntämättä ja voivat hankaloittaa työn onnistumista [8, sivu 5.]

Työssä tarkastellaan Tampereen Teknillisen Yliopiston ja VTT:n selvityksiä uusien vaatimuksien esille tuovista vaikutuksista.

Työ suoritetaan tutkimalla seinärakenteita tietokonemallinnuksella. Samalla selvitetään, mitä rakennusfysiikkaohjelmilla voidaan tehdä ja miten niitä nykypäivinä käytetään. Ohjelmoina käytetään Comsol Multiphysics 3.5a:ta lämmönsiirtymisen tutkimiseen ja tarkastellaan seinärakennetta uuden U-arvon mukaan, sekä WUFI:a, jolla tutkitaan kosteuden siirtymistä rakenteen läpi. Kosteuden siirtymistä tarkastellaan mallinnuksella, joka simuloi usean vuosikymmenen ajanjakson.

Mielenkiintoista olisi selvittää, paljonko energiaa kuluu lisäeristykseen ja missä ajassa se maksaa itse itsensä takaisin. Ongelmaksi tulisi se, että täsmällistä tietoa ei ole saatavilla. Vaikka eristeen valmistukseen kuluva energia saataisiin selville, niin välilliset vaikutukset kuten kuljetukseen kuluva

energia olisi mahdotonta selvittää. Myös taloudellista vaikutusta on vaikea arvioida, koska eristeen hinta ja energian hinta vaihtelevat.

Määräykset tiukentuvat melko paljon noin 30 %. Ja varsinkin pientalojen rakenteista tulee entistä massiivisempia. Lämmitystarve pienenee huomattavasti, kun eristepaksuus kasvaa, ja samalla kodin laitteista ja koneista vapautuu lämpöä. Voi tulla jopa tilanteita, joissa rakennuksen sisälämpötila nousee niin korkeaksi ilman lämmitystä, että joudutaan harkitsemaan rakennuksen jäähdytystä. Tällöin säästetty lämmitysenergia meneekin jäähdytykseen.

1.1 VTT:n ja Tampereen teknillisen yliopiston selvitykset matalaenergiarakenteista

Ympäristöministeriö tilasi VTT:ltä ja Tampereen teknilliseltä yliopistolta (TTY) selvitykset uusien vaatimusten vaikutuksista rakennuksille. VTT:n selvitys keskittyy tutkimaan rakenteiden kosteusteknistä käyttäytymistä kiristyvien U-arvovaatimusten vaikutuksesta. TTY puolestaan selvittää, millaiset reunaehdot eri rakennusosien lämmöneristävyuden parantaminen ja ilmastonmuutos ja näistä johtuvien rakenteiden toimintaolosuhteiden muutos aiheuttaa.

1.2 Tampereen Teknillisen yliopiston selvitys matalaenergiatalon toimivuudesta

TTY:n asiantuntijaryhmä selvitti, miten uudet määräykset vaikuttavat talon rakenteiden eri osa-alueille ja vaipparakenteissa. Tarkempaan selvitykseen oli valittu sellaisia ratkaisuja, joille odotettiin olevan enemmän vaikutusta kiristyneistä määräyksistä. Selvityksessä esitetään eri rakenteita ja tuloksia monesta eri osa-alueesta, ja tarkastellaan, miten rakenteiden kosteustekninen käyttäytyminen muuttuu eristeen paksuuden kasvaessa.

TTY:n mukaan vaipparakenteen kosteustekninen toiminta heikkenee kiristyneiden vaatimusten myötä. Tämä johtuu siitä, että seinärakenne viilenee lisääntyneen eristeen vuoksi ja suhteellinen kosteus kasvaa rakenteen kylmällä puolella. Tämä mahdollistaa rakenteeseen suotuisat olosuhteet kosteuden kondensoitumiselle ja homeen kasvulle. Myös ilmastonmuutos heikentää rakenteiden kosteusteknistä toimintaa, koska viistosateet ja homeenkasvulle suotuisten olosuhteiden odotetaan lisääntyvän ja rakenteiden kuivumisajan kasvavan. Ulkoseinärakenteiden vaatimusten osalta rakennustekniikasta tulee haastavampaa, vaaditaan

enemmän materiaalia, mikä vaikuttaa merkittävästi kustannuksiin. Ikkunoiden valmistus vaikeutuu, ja varmasti tulee enemmän reklamaatioita tiivistyneestä kosteudesta johtuen. Mm. näistä johtuvista seikoista U-arvojen kiristämisen tulisi olla pienempi kuin mitä on kaavailtu. TTY:n asiantuntijaryhmä suosittelee vaatimusten kiristämistä n. 15 – 20 % vuoden 2007 vaatimuksista. Kiristäminen tulisi painottaa sellaisiin rakennusosiin, joissa se on turvallista ja kannattavaa.

1.3 VTT:n selvitys rakenteiden energiatehokkuuden parantamisen vaikutuksesta rakenteiden kosteustekniseen toimivuuteen

VTT:n selvityksessä on esimerkkinä tuuletetun rakenteen toimivuudesta rankarakenteinen ulkoseinä. Siinä tarkasteltiin laskennallisesti, miten 2007 määräysten mukainen rakenne ja matalaenergiatorakenteen ulkopinnan olosuhteet poikkeavat toisistaan kosteuden osalta. Tarkastelussa oli tuuletusraallinen puurunkoinen rakenne, jossa oli 9 mm kipsilevytuulensuoja, kipsinen sisäverhouslevy ja PE-höyrynsulku. Vesihöyrynvastus höyrynsulussa oletettiin suhteellisen alhaiseksi tasolle $5 \cdot 10^{10} \text{ m}^2 \text{ s Pa/Kg}$ ($S_d = 10 \text{ m}$, vastaten paikallaan olevan 10 m paksun ilmakerroksen vastusta). Lämmöneristeenä rakenteessa on mineraalivilla, jonka lämmönvastus 0,040 W/Km. Eristeen paksuus on vuoden 2007 määräysten mukaisessa rakenteessa 175 mm ja matalaenergiarakenteessa 345 mm. U-arvo vuoden 2007 määräysten mukaisella rakenteella on 0,24 W/Km² ja matalaenergiarakenteessa se on tasolla 0,12 – 0,13 W/Km². Parannus on siis huomattavasti suurempi kuin vuoden 2010 määräysten mukainen U-arvovaatimus.

Esimerkin mukaan matalaenergiarakenteen ulkopinnan kuivuminen on suhteellisen samanlaista kuin vuoden 2007 määräysten mukaisen rakenteen. Kuvattuja rakenteita tarkasteltiin WUFI:lla käyttäen tunneittain muuttuvia olosuhteita sisä- ja ulkopuolen ilmatiloissa. Ulkoilman sääolosuhteina käytettiin Jyväskylän mitoitusvuoden sääoloja. Seinä oli varjossa, tuuletusraossa vallitsi ulkoilman olosuhteet, eikä sinne päässyt sadetta. Sisäilman lämpötila oli vakio +20 °C. Tarkasteltiin ulkopinnan olosuhteiden homehtumisherkkyyttä. Saatujen tulosten perusteella matalaenergiarakenne ja 2007 määräysten mukainen rakenne edustivat täysin samanlaista homehtumisriskiä.

VTT:n esimerkin mukaan lämmöneristysmääräyksiä voidaan huoletta parantaa 30 % - 40 % 2007 määräysten tasosta paremmalle tasolle ilman merkittäviä riskejä rakenteiden kosteustekniseen toimintaan. Olosuhteet eivät muutu olennaisesti parannettaessa lämmöneristystä matalaenergiatasolle. Ulkopinnan kuivumiskyky ja riski homeen kasvulle on lähes samanlainen molemmissa tarkastelluissa tapauksissa.

VTT:n selvityksen tärkein yhteenveto on, että rakenteiden kosteustekninen toimivuus ei aseta rajoituksia lämmöneristystason parantamiselle 30 – 40 %:lla rakentamismääräyksiin (C3/2007) verrattuna. Täysin yksiselitteistä se ei kuitenkaan ole, koska selvityksessä myös mainitaan, että: ”Eräiden yksittäisten rakennetyyppien valinta ja mitoitus matalaenergiakohteeseen vaativat erityistä asiantuntemusta ja harkintaa” [10, sivu 17].

2 FYSIIKKASIMULAATIOIDEN KÄYTTÖ RAKENNUSTEKNIKASSA

Rakennusfysiikkaohjelmat ja niiden avulla laadittavat erilaiset lämpö-, kosteus- ja virtaustekniset laskelmat ovat nykyään keskeinen osa rakennusfysikaalista suunnittelua. Niiden avulla voidaan ymmärtää paremmin rakenteiden toimintaa. Aikaisemmin rakennusfysikaalinen suunnittelu on rajoittunut lämmön- ja kosteudensiirtymisen yleisperiaatteisiin turvautuen. Laskennat ovat keskittyneet lähinnä lämmöneristyksen ja höyrynsulun mitoittamiseen käsin laskennalla ja taulukkolaskentasovellusten avulla. Tavanomaisten ja vaativuustasoltaan vähäisten rakennusten ja rakennusosien suunnittelu on tehty ilman erikoisosaamista vaativia laskelmia. Uusissa rakennuksissa on paljon kosteusvaurioita ja osaamista tarvittaisiin kosteustekniseen suunnitteluun. Suomen rakentamismääräyskokoelman A2 mukaiset rakennusfysikaalisesti vaativimmat suunnittelu-tehtävät edellyttävät yleensä rakenteiden kosteusteknisen toiminnan simulointia ja samalla rakennusfysiikkaohjelmien käyttöä rakenteiden toimivuuden sekä pitkäaikaiskestävyyden osoittamiseksi. Tällaisia vaativampia AA-luokan suunnittelutehtäviä ovat mm. kosteutettujen, jäädytettyjen ja ylipaineisten tilojen ulkovaipparakenteiden suunnittelu sekä vaikeiden kosteusvaurioiden korjaussuunnittelu. Uimahallien ja kylpylöiden ulkovaipparakenteet ovat esimerkkejä rakenteista, jotka edellyttävät perinteisen rakennesuunnittelun lisäksi erityistä rakennusfysikaalista suunnittelua.

Rakenteiden lämpö- ja kosteustekniset tutkimukset voidaan jakaa ajasta riippuviin ja jatkuvuustilan tarkasteluihin. Jatkuvuustilan eli ajasta riippumattomissa tarkasteluissa rakennetta ympäröivät ulko- ja sisäilman olosuhteet oletetaan koko tarkasteluajan vakioiksi eikä oteta huomioon lämpö- ja kosteuskapasiteettia. Yleensä jatkuvuustilan tarkastelut kuvaavat rakenteen lämpö- ja kosteusteknisistä käyttäytymistä pitkäaikaisissa ääriolosuhteissa, jolloin laskentatulokset on rakenteen toimivuutta koskevien johtopäätösten kannalta yleensä varmallalla puolella. Jatkuvuustilan laskelmat soveltuvatkin parhaiten pienen lämpö- ja kosteuskapasiteetin omaavien rakenteiden tarkastukseen uudisrakennussuunnittelun yhteydessä, kylmäsiltojen tarkasteluun, ikkunarakenteiden lämpötekniseen detaljisuunnitteluun sekä U-arvojen laskentaan. Ajasta riippuvien lämpö- ja kosteusteknisien laskelmien tyypillisimpiä sovelluskohteita ovat erilaiset vaativat vaurioanalyysit, lisälämmöneristysten ja pinnoitekorjausten vaikutusten arviointi, ryömintätilojen kosteusolosuhteiden simulointi, rakenteisiin upotettujen lämmitysjärjestelmien ja routaeristysten suunnittelu sekä kuivumisaikojen laskenta. Rakennusfysiikkaohjelmat ovat merkittävä etu esimerkiksi rakenteiden kuivumiskyvyn tarkastelussa tilanteessa, jossa kosteusteknisesti toimivan rakenteen johonkin osaan oletetaan kertyneen ylimääräistä kosteutta esimerkiksi rakennusaikaisen puutteellisen sääsuojauksen seurauksena tai vesivahingon takia.

2.1 Laskelmien luotettavuus ja lähtöarvot

Jotta laskelmista saataisiin luotettavia tuloksia, on varmistettava, että lähtöarvot ovat tarkkoja ja ympäristöolosuhteita kuvaavat reunaehdot valitaan oikeilla perusteilla. Lähtöarvojen valinta edellyttää eri rakennusmateriaalien lämpö- ja kosteusteknisiin ominaisuuksiin liittyvää syvällistä erikoisosaamista. Pelkkä ohjelmien hallinta ei riitä. Markkinoilla olevien valmisohjelmien materiaalitietokannat sisältävät yleensä tavallisimmin käytettyjen rakennusmateriaalien lämpö- ja kosteustekniset laskenta-arvot, mutta niiden soveltuvuus tarkastelun kohteena olevaan rakenteeseen on varmistettava joka kerta tapauskohtaisesti. [6, sivu 68.]

Tarvittaessa puuttuvat tai epävarmat materiaaliominaisuudet on mahdollista määrittää riittävällä tarkkuudella suhteellisen yksinkertaisten laboratorikokeiden avulla. Laskentamallin reunaehtoina hyödynnetään yleensä Ilmatieteen laitoksen julkaisemia paikkakuntaakohtaisia säätietoja ja

tapauskohtaisesti arvioituja sisäilman olosuhteita. Esimerkiksi WUFI:ssa löytyy VTT:n mittaukset Espoon sääolosuhteista.

Laskentatulosten ei aina tarvitse vastata kovin tarkasti todellisen rakenteen käyttäytymistä. Rakenteiden analyysipohjaisessa suunnittelussa kiinnostavaa on yleensä jonkin rakenne- tai olosuhdemuutoksen vaikutussuunta sekä sen suuruusluokka. Vaurioselvityksissä tarkkuusvaatimus on suurempi, jolloin vanha rakenne ja sen ympäristöolosuhteet on pyrittävä mallintamaan mahdollisimman tarkasti todellisten olosuhteiden mukaan.

Laskentatulosten tulkinta ja niiden perusteella tehtävät johtopäätökset edellyttävät tekijältään syvällistä rakennusfysiikan osaamista. Teoreettiseen tietoon liitetty käytännön kokemus rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisestä käyttäytymisestä on edellytys johtopäätösten ja niiden perusteella tehtävien jatkotoimenpiteiden onnistumiselle. Rakennusfysiikkaohjelmat ovat hyvä apuväline paikallistamaan ongelmat rakenteissa ja simuloimaan eri rakennusfysikaalisia rakenteiden toimintaa. [6, sivu 69.]

Rakennusfysikaalinen suunnittelu jää monesti taka-alalle rakennesuunnittelussa. Rakennesuunnittelijan työmaan ohjaus liittyy yleensä ratkaisevasti rakennuksen kantavan rakenteen työpiirustusten ohjaamiseen ja kosteustekninen suunnittelu jää taka-alalle. Tällä tavalla saadaan kyllä viranomaismääräykset täyttäviä rakennuksia, mutta siitä on vielä pitkä matka kosteusteknisesti toimiviin, turvallisiin rakennuksiin ja hyvään sisäilmastoon.

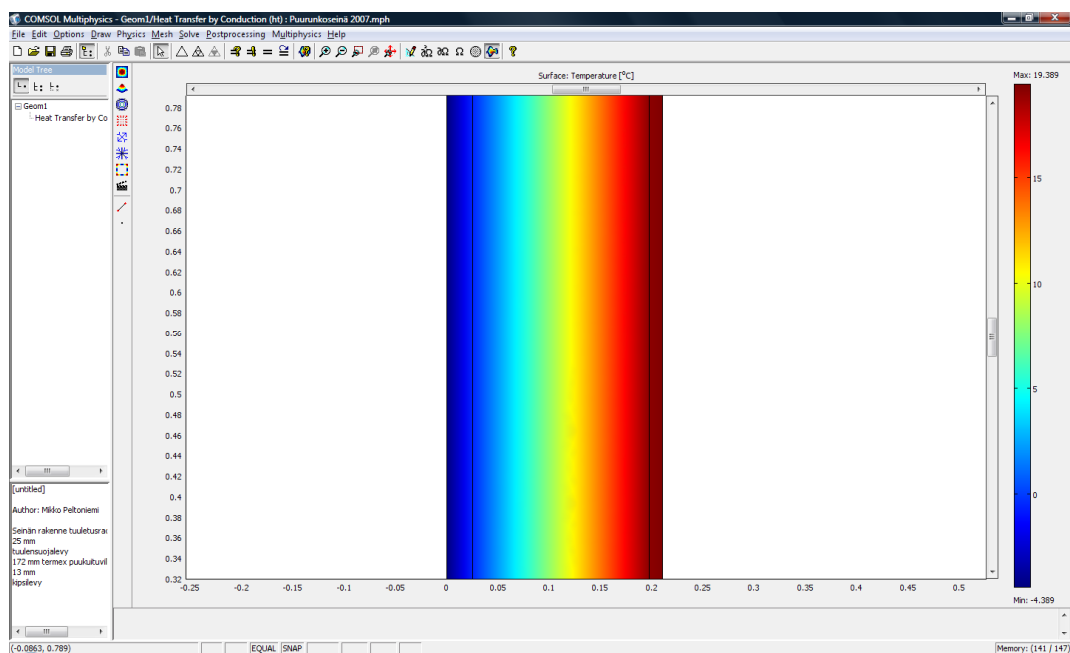
2.2 Comsol Multiphysics

Comsol Multiphysics on fysikaalinen mallinnusohjelma erilaisten fysikaalisten prosessien simuloimista varten. Sillä voi helposti mallintaa eri fysikaalisia ilmiöitä ennalta määriteltyjen mallien avulla. Näiden muokkaaminen yksityiskohtaisiksi ohjelmiksi mahdollistavat yhtälöperusteiset mallinnusmahdollisuudet. Ohjelmassa on valmiiksi määriteltyjä mallinnustyökaluja nesteiden virtauksista ja lämmönsiirtymisestä rakennusmekaniikkaan ja sähkömagneettisiin analyyseihin. Comsol Multiphysics tarjoaa käyttäjäystävällisen, nopean ja monipuolisen työkalun monenlaiseseen fysikaaliseen mallinnukseen. Mallintaminen on nopeaa ja se voidaan suorittaa muutamassa minuutissa. Valmiiden sovellusten avulla

voidaan ratkaista tyypillisiä ongelmia tai käyttäjä voi valita erilaisia fysiikan sovelluksia itsenäisesti [2].

Ohjelma toimii moduuleina tuoden termit, materiaalikirjaston, ratkaisut ja elementit sekä visuaaliset työkalut sopivasti kyseiselle tarkasteltavan sovelluksen alueelle. Lisäksi jokainen lisämoduuli tuo runsaasti valmiita ja dokumentoituja esimerkkimalleja. Mallinnukset saadaan dokumentoitua ohjelmasta ja liitettyä raportteihin tarvittavat kuvaajat ja laskelmat.

Kuvassa 1 on esimerkki seinärakenteesta. Kyseessä on puurunkoinen seinä, jossa rakenne on ulkoa sisälle päin: pintarakenne, tuuletusväli, tuulensuojalevy, pystyrunko ja lämmöneriste, höyrönsulku ja kipsilevy. Simulaatio on tehty tuuletusraosta eteenpäin. Väreinä nähdään lämpötila jokaisessa kohdassa rakennetta.



Kuva 1. Seinärakenne Comsol Multiphysics-ohjelmalla.

2.3 WUFI

WUFI (*Wärme und Feuchte instationär – Transient Heat and Moisture*) -ohjelmalla voidaan simuloida rakenneleikkauksen lämmön- ja kosteudensiirtoa. Se sisältää täydennettävän materiaalitietokannan, 97 kaupungin säätiedot (Euroopasta, Pohjois-Amerikasta ja Japanista) ja online-dokumentoinnin.

Rakennusosien lämpöominaisuuksien lisäksi niiden vaikutus lämpöhäviöihin sekä kosteustekninen vaikutus on otettava huomioon. Kasvanut kosteuspitoisuus voi aiheuttaa kosteusvaurion, hygieenisiä ongelmia ja homeen kasvua sekä näistä johtuvia terveysriskejä. Lämpö- ja kosteustekninen käyttäytyminen rakennuksen osissa liittyvät läheisesti toisiinsa: lisääntynyt kosteus lisää lämpöhäviöitä; lämpötilaero vaikuttaa kosteuden siirtymiseen. Siksi täytyy tutkia myös lämmön ja kosteuden siirtymisen keskinäinen riippuvuus. WUFI keskittyy tutkimaan höyryn diffuusion ja nesteen kulkeutumista rakennusmateriaaleissa [7.]

3 U-ARVOVAATIMUKSET 2010

Ympäristöministeriö on antanut uudet rakennusten energiakulutusta koskevat vaatimukset. Rakennusten energiatehokkuuden taustalla on Kioton ilmastopöytäkirja ja Suomen ilmastostrategia, jonka tavoitteena on kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen. Suomen rakentamismääräyskokoelma C3 antaa lämmöneristysvaatimuksille tarkat ohjeet. Siinä määritellään maksimi- ja minimirajat lämmönläpäisykertoimelle riippuen siitä, rajoittuuko lämmin tila ulkoilmaan vai puolilämpimään tilaan, puolilämmin tila ulkoilmaan, lämmittämättömään tilaan vai maahan.

3.1 Lämmin ja erityisen lämmin tila

Suomen rakentamismääräyskokoelman C3 mukaan lämpimällä tilalla tarkoitetaan seuraavaa:

Lämmin tila on sellainen tila, jonka mitoitettavaksi huonelämpötilaksi lämmityskaudella oleskelu- tai muista syistä valitaan +17 °C tai sitä korkeampi lämpötila [11, sivu 3].

Siinä määritellään myös erityisen lämmin tila, joka voi olla esimerkiksi saunatila. Sen määritelmä on C3:n mukaan seuraavanlainen:

Erityisen lämpimällä tilalla tarkoitetaan sellaista tilaa, jossa käyttötarkoituksesta johtuen huonelämpötila on jatkuvasti tai ajoittain korkea verrattuna tavanomaiseen lämpötilaan. Tällainen tila voi olla esimerkiksi saunan löylyhuone. [11, sivu 3.]

C3:n mukaan rakennusosien, jotka erottavat lämpimän tai puolilämpimän tilan ulkoilmasta, tulee olla lämpö- ja kosteusteknisiltä ominaisuuksiltaan

sellaisia, että tilan käyttötarkoituksen edellyttämät sisäilmasto-olot voidaan saavuttaa energiatehokkaasti [11, sivu 5].

Kun lämmin tai erityisen lämmin tila rajoittuu ulkoilmaan, lämmittämättömään tilaan tai maahan, U-arvot eivät saa ylittää taulukossa (1) esitettyjä vuoden 2010 voimaan tulevia arvoja.

Taulukko 1. Eri rakennusosien U-arvovaatimukset vuoden 2010 mukaan

Rakennusosa	U-arvo
Seinä	0,17 W / m ² K
Hirsiseinä (hirsirakenteen keskimääräinen paksuus vähintään 180 mm)	0,40 W / m ² K
Yläpohja, ulkoilmaan rajoittuva alapohja	0,09 W / m ² K
Ryömintätilaan rajoittuva alapohja	0,17 W / m ² K
Maata vasten oleva rakennusosa	0,16 W / m ² K
Ikkuna, kattoikkuna, ovi	1,00 W / m ² K

1.1.2010 tulivat voimaan uudet määräykset rakennusten lämmöneristykseen ja lämmönläpäisykykyyn. Lämmönläpäisykertoimien enimmäisarvot pienenivät ja rakennuksen vaipan paksuus kasvoi. Määräykset koskevat uusia rakennuksia, joissa käytetään energiaa lämmitykseen ja sen lisäksi mahdollisesti jäähdytykseen tarkoituksenmukaisen sisälämpötilan saavuttamiseksi.

Taulukko2. Vertailu eri rakennusosien U-arvot eri vuosina

U-arvot	U-arvovaatimus 2007-2009	Normitalo, tyypillinen 2005	Matalaenergiatalo, 2007 arvio	U-arvovaatimus 2010 alkaen
Ulkoseinä	0,24	0,21	0,18	0,17
Yläpohja	0,15	0,15	0,12	0,09
Alapohja	0,24	0,2	0,15	0,16
Ikkunat	1,4	1,5	1	1
Ovet	1,4	1,5	0,8	1

3.2 Lämmön talteenotto ja kompensatiolaskelmat

Vuoden 2010 alusta alkaen tuli muutoksia myös ilmanvaihtoon. Rakennusten ilmanvaihdon poistoilmasta on otettava talteen lämpöä 45 %. Jos lämmöntalteenottolaitteina käytetään hyvän hyötysuhteen omaavia laitteita, voidaan rakennusosien lämmöneristystä vastaavasti heikentää tai lisätä ikkunapinta-alaa kompensatiolaskelmia käyttäen. [14, sivu 2.]

3.3 Rakennusmääräyskokoelma C4 ja Standardi SFS-EN ISO 6946

Tässä työssä tarkastellaan U-arvon määrittämistä rakennusmääräyskokoelma C4:n mukaisesti, sekä millä tavalla U-arvo saadaan laskettua simulaation avulla käyttämällä ohjelmaa Comsol Multiphysics 3.5a.

C4 sisältää verraten kattavan ohjeiston rakennusosien ja komponenttien lämmönläpäisykerroimen määrittämiseen. Tarkoituksena on ollut esittää yksissä kansissa oleva, toimiva ja helppokäyttöinen ohjeisto, jonka noudattaminen riittää osoitettaessa rakennusosien ja komponenttien määräystenmukaisuus lämmönläpäisykerroimen suhteen.

Standardi SFS-EN ISO 6946 on kattavuudeltaan olennaisesti suppeampi kuin C4. Sen lämmönläpäisykerroimen laskentaohje poikkeaa joiltakin osin C4:n vastaavista ohjeista. Standardi ei ole kattavuudeltaan riittävä osoitettaessa tavanomaisen suunnittelukohteen rakennusosien ja komponenttien määräystenmukaisuus. Normaalisti suunnittelija tarvitsee standardin lisäksi useita muita EN-suunnittelustandardeja kyetäkseen osoittamaan suunnittelukohteen kaikkien rakennusosien ja komponenttien lämmönläpäisykerroimet vaatimustenmukaisiksi. [3, sivu 36.]

3.4 Lämmönläpäisykerroimen määrittäminen

Rakentamismääräyskokoelma C4 määrittelee eri lämmönjohtavuusarvojen käyttämisestä seuraavaa:

Rakennusosan lämmönläpäisykerroin (U) lasketaan käyttäen CE-merkinnällä varustetuille rakennusaineille EN-standardien mukaan määritettyjä lämmönjohtavuuden suunnitteluarvoja, EN-standardeissa esitettyjä taulukoituja lämmönjohtavuuden suunnitteluarvoja, normaalisen lämmönjohtavuuden (α_n) tai muita hyväksyttävällä tavalla määritettyjä, rakennusosalle

soveltuvia lämmönjohtavuuden suunnitteluarvoja. Jos samalle aineelle on annettu useita α_n -arvoja, valitaan alaviitehuomautusten perusteella kohteeseen soveltuva arvo. [1, sivu 4.]

3.5 Lämmönläpäisykerroimen laskeminen rakentamismääräyskokoelma C4 mukaan

Lämmönläpäisykerroin lasketaan kaavalla (1)

$$U = 1 / R_T \quad (1)$$

Kun rakennusosan ainekerrokset ovat tasapaksuja ja tasa-aineisia, lasketaan kokonaislämmönvastus R_T kaavalla (2)

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_m + R_g + R_b + R_{q1} + R_{q2} + \dots + R_{qn} + R_{se} \quad (2)$$

jossa

$$R_1 = d_1 / \lambda_1, R_2 = d_2 / \lambda_2 \dots R_m = d_m / \lambda_m$$

d_1, d_2, \dots, d_m ainekerroksen 1,2, ... m paksuus

$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ ainekerroksen 1,2, ... m lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo, esim. normaalin lämmönjohtavuus.

R_g rakennusosassa olevan ilmakerroksen lämmönvastus

R_b maan lämmönvastus

$R_{q1}, R_{q2}, \dots, R_{qn}$ ohuen ainekerroksen 1, 2, ... n lämmönvastus

$R_{si} + R_{se}$ sisä- ja ulkopuolisen pintavastuksen summa

Kun rakennusosa on epätasa-aineinen niin, että siinä on pintojen suuntaisia ainekerroksia, joissa on rinnakkain lämmönvastukseltaan erilaisia osaluueita, lasketaan epätasa-aineisen ainekerroksen j lämmönvastus R_j kaavalla (3)

$$1 / R_j = f_a / R_{aj} + f_b / R_{bj} + \dots + f_n / R_{nj} \quad (3)$$

$f_a, f_b, \dots f_n$	epätasa-aineisessa ainekerroksessa j olevan tasa-aineisen osa-alueen $a, b, \dots n$ suhteellinen osuus ainekerroksen kokonaispinta-alasta
$R_{aj}, R_{bj}, \dots R_{nj}$	epätasa-aineisessa kerroksessa j olevan tasa-aineisen osa-alueen $a, b, \dots n$ lämmönvastus, jossa $R_{aj} = d_j / \alpha_{aj}$, $R_{bj} = d_j / \alpha_{bj}$, $\dots R_{nj} = d_j / \alpha_{nj}$
$\lambda_{aj}, \lambda_{bj}, \dots \lambda_{nj}$	ainekerroksen $a, b, \dots n$ lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo, esim. normaalin lämmönjohtavuus.

Jos suunnitteluarvot poikkeavat enemmän kuin viisinkertaisesti epätasa-aineisessa ainekerroksessa vierekkäisten aineiden osalta, ei kaava (3) sovellu käyttöön. Tällöin valitaan suuremman lämmönjohtavuuden omaava aine ja osa-alue käsitellään kylmäsiirtana [1, sivu 5.]

4 TARKASTELTAVIEN SEINÄRAKENTEIDEN VERTAILU RAKENTAMISMÄÄRÄYSKOKOELMAN C3 2007 JA MÄÄRÄYSTEN 2010 MUKAAN

Tässä luvussa vertaillaan seinärakenteita vuosien 2007 ja 2010 vaatimusten mukaisesti ja tutkitaan minkä verran seinien paksuudet muuttuvat. Lisäksi tarkastellaan, miten kosteus siirtyy seinien läpi kun eristettä lisätään.

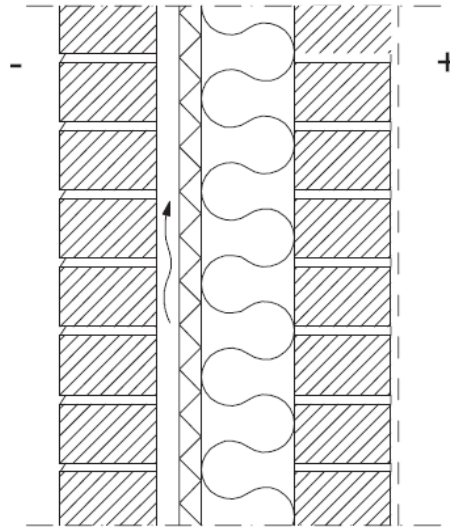
4.1 Seinärakenteet

Seinärakenteiksi valittiin tavanomaisia pientalojen seinärakenteita. Tarkoitus oli tarkastella mahdollisimman erilaisia rakenteita ja eristeitä, jotta nähdään miten muutos vaikuttaa eri rakennetyypeissä. Rakenteina käytettiin seuraavia ratkaisuja. Lähtötiedot 2007 U-arvovaatimusten mukaan:

- täystiiliseinä, eristeenä pehmeä kivivilla
- betonielementtiseinä, eristeenä kova lasivilla
- siporexharkko 500 mm + rappaus
- puurunkoseinä, eristeenä puukuitueriste

Täystiiliseinän rakenne:

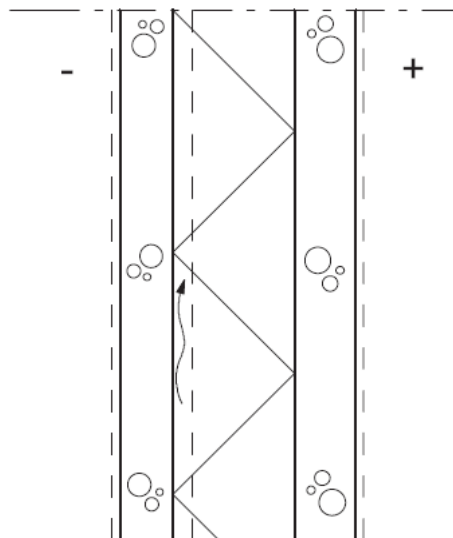
130 mm Tiili
 30 mm Tuuletusrako
 25 mm Tuulensuojalevy
 125 mm Pehmeä kivivilla
 130 mm Tiili
 Pintakäsittely



Kuva 2. Täystiiliseinä

Betonielementtiseinän rakenne:

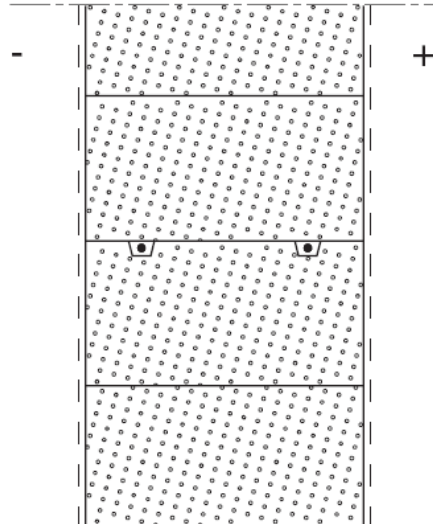
70 mm betoni
 235 mm kova lasivilla, uritettu tuuletusrako
 150 mm betoni
 Pintakäsittely



Kuva 3. Betonielementtiseinä

Siporexseinä:

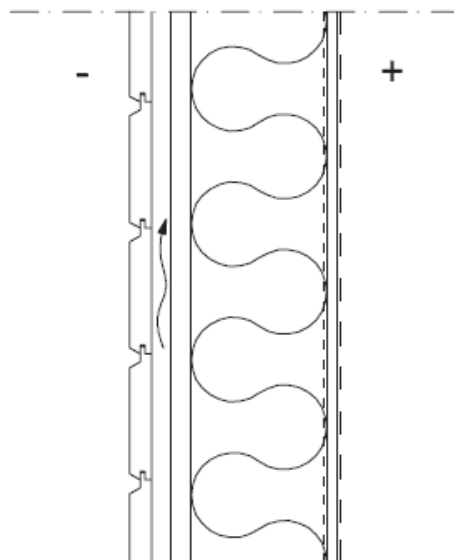
Rappaus
500 mm Siporexharkko
Pintakäsittely



Kuva 4. Siporex-seinä

Puurunkoinen seinä:

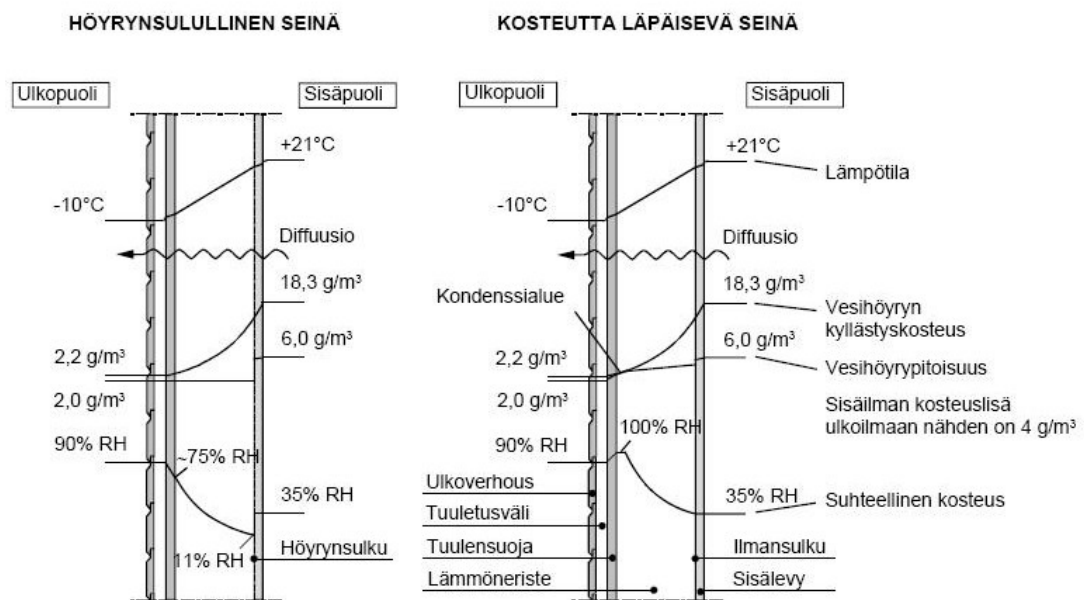
Julkisivulaudoitus
25 mm Tuuletusväli ja pystylaudat
25 mm Tuulensuojalevy
172 mm Puukuitueriste Termex ja kantava rakenne
Höyrynsulku
13 mm kipsilevy



Kuva 5. Puurunkoinen seinä.

TTY:n esimerkki puurunkoisen seinärakenteen kosteusteknisestä toiminnasta ja miten tärkeä höyrynsulku on:

”Puurunkoisessa ulkoseinärakenteessa tarvitaan aina riittävän vesihöyrynvastuksen omaava höyrynsulku rakenteen sisäpinnassa, jotta rakenteeseen ei pääse diffuusiolla liikaa kosteutta sisäilmasta. Seinärakenteen kosteusteknisestä toiminnasta kannalta kriittisin kohta on tuulensuojan sisäpinnassa, johon sisältä tuleva kosteus ensimmäisenä tiivistyy tai aiheuttaa homeen kasvun kannalta otolliset olosuhteet. Kuvasta 6 nähdään, että kosteutta läpäisevässä seinässä kondensoituminen alkaa ilman vesihöyrypitoisuuden saavuttaessa tuulen-suojan sisäpinnassa vesihöyrynvastuksen kyllästyskosteuspitoisuuden.” [8, sivu 45.]



Kuva 6. Periaatekuva höyrynsulullisen ja kosteutta läpäisevän puurunkoisen ulkoseinärakenteen kosteusteknisestä toiminnasta talviolosuhteissa.

Ulkoseinät suunnitellaan ilma- ja höyrytiiviksi, ja kaikkien läpivientien tiiviydestä huolehditaan. Avohuokoisen lämmöneristyksen lämpimällä puolella olevan kerroksen vesihöyrynvastuksen tulee olla vähintään viisinkertainen eristyksen ulkopuolisen kerroksen vesihöyrynvastukseen verrattuna.

4.2 Lämmöneristeitä

Eristeitä jaotellaan seuraaviin pääryhmiin:

1. Puuaineiset
 - sahanpuru + kutterinlastu
 - puukuitulevyt
 - selluvilla
2. Mineraalivillat
 - vuorivillatuotteet
 - lasivillatuotteet
3. Muovit
 - polystyreeni
 - polyuretaani
4. Muut eristeet
 - kevytsora
 - kevytbetoni

Sahanpuru ja kutterinlastu

Sahanpuru- ja kutterilastuseos, jonka suhde on 1:2, antaa parhaan lämmöneristävyiden. Lämmöneristävyys perustuu siihen, että niissä on paikallaan pysyvää ilmaa. Purutäyte on herkkä lahoamaan ja palamaan. Eristeen lämmönjohtavuus on 0,08...0,14 W/(mK) tiivistyksen mukaan.

Puukuitulevyt

Puukuitulevy valmistetaan jätetuun kuiduista. Eri käsittelyvaiheiden jälkeen siitä voidaan puristaa huokoisia, puolikovia tai kovia kuitulevyjä. Eristeen lämmönjohtavuus vaihtelee huokoisesta kovaan 0,055...0,130 W/(mK).

Selluvilla

Selluvilla on karstattua puuhioketta tai jätepaperia. Valmistuksessa siihen lisätään kemikaaleja, joilla saadaan parannettua palonkestävyyttä ja estettyä sienikasvuston kehittymistä. Lämmöneristävyys perustuu paikallaan pysyvään ilmaan. Lämmönjohtavuus $0,041 \dots 0,055 \text{ W/(mK)}$.

Mineraalivillat

Mineraalivilloja ovat vuorivilla ja lasivilla. Vuorivilla valmistetaan vulkaanisesta diabaasikiviaineesta, johon valmistuksen yhteydessä lisätään vettä hylkivää muovia ja sideaineeksi fenolihartseja. Lasivilla valmistetaan kalkkikiven, kvartsihiekkan ja soodan seoksesta, johon lisätään myös maasälpää, kaliumia ja rosoriittia. Niiden avulla säädetään seoksen sulamis- ja linkoamisominaisuuksia. Mineraalivillan lämmönjohtavuus on $0,034 \dots 0,050 \text{ W/(mK)}$ ja ovat vettä hylkiviä materiaaleja.

Muoviset lämmöneristeet

Lämmöneristykseen käytettävät muovit ovat solumuoveja. Ne perustuvat siihen, että muoveja vaahdottamalla saadaan aikaan suljettu solurakenne, joka sisältää jopa 95 % ilmaa tai täytekaasua ja samalla estää ilman kierron sekä kosteuden pääsyn eristeeseen. Paikallaan pysyvä kaasu toimii tehokkaana lämmöneristeenä eikä siihen vaikuta ilmavirrat niin herkästi kuin selluvilla-, puukuituvilla-, mineraalivilla- ja purueristeisiin. Tavallisimmat muovit, jotka soveltuvat eristeeksi ovat paisutettu polystyreenimuovi, EPS-eriste. polyuretaani ja styrofoam-eriste. Muovieristeiden lämmönjohtavuus vaihtelee $0,024 \dots 0,041 \text{ W/(mK)}$. Ne ovat ilmaa läpäisemättömiä ja vettä hylkiviä eristeitä.

Kevytsora

Kevytsora on savesta polttamalla paisutettu rakeinen, pyöreä, raekooltaan 4-16 mm oleva rakennusmateriaali. Valmistus tapahtuu paisuttamalla savea pyörivässä polttouunissa ja polttamalla rakeet muotoonsa. Kevytsoran lämmönjohtavuus on $0,10 \dots 0,17 \text{ W/(mK)}$. Se on selvästi suurempi kuin puuaineisilla eristeillä, mineraalivillalla ja muovieristeillä. Se imee kosteutta, joten tuote on suojattava hyvin.

Kevytbetoni

Kevytbetoni on aine, jossa tavallisen betonin tiheyttä on pienennetty paremman lämmöneristävyyden saavuttamiseksi. Samalla myös betonin lujuus heikkenee. Tiheyttä voidaan pienentää eri tavoin. Suomessa käytetään vain kaasua muodostavaa valmistusmenetelmää. Kevytbetonin valmistukseen käytetään sementtiä, hienoksi jauhattua hiekkaa, vettä, masuunikuonaa ja alumiinijauhetta. Alumiini reagoi yhdessä masuunikuonan ja sementin kanssa muodostaen kaasua, joka saa kuulamylyssä betonimassan hienoksi jauhetut aineosat paisumaan kuusinkertaisiksi alkuperäisestä tilavuudestaan. Valmistettaessa höyrykarkaistua kevytbetonia elementit kovettuvat höyrykarkaisu-uunissa, jossa on noin 180 °C lämpötila ja 1100 kPa ylipaine. Ilman höyrykarkaisua kevytbetonia kutistuu ja halkeilee kovettuessaan. Kevytbetonin lämmöneristävyys perustuu pienissä suljetuissa ilmarakkuloissa olevaan liikkumattomaan ilmaan. Lämmönjohtavuus on 0,095...0,12 W/(mK). Tuote kestää pakkasta ja sään rasituksia, mutta on vettä imevä, joten se on suojattava kosteutta vastaan hyvin.

[15, sivu 67 – 85.]

5 FYSIKAALINEN MALLI

5.1 Lämmön siirtyminen

Tyypillisen pientalon rakenteissa tapahtuu lämpövuotoa usealla eri tavalla:

- seinistä 18 %
- yläpohjista 12 %
- ikkunoista ja ovista 17 %
- alapohjasta 17 %
- Ilmanvaihdon kautta 36 %

Lämpö siirtyy rakenteessa tai ilmassa kolmella eri tavalla: johtumalla, säteilemällä ja konvektion avulla. Johtumisessa molekyylien liike-energiaa siirtyy molekyylistä toiseen eli tapahtuu lämmön virtaamista. Lämpö pyrkii

tasoittumaan väliaineessa eli virtaamaan lämpimästä kylmempään päin. Lämmön johtumista esiintyy kiinteissä aineissa ja nesteissä sekä kaasuissa.

Säteilyssä energia siirtyy sähkömagneettisen aaltoliikkeen välityksellä valon nopeudella. Kaikki kappaleet, joiden lämpötila on absoluuttisen nollopisteen yläpuolella, lähettävät säteilyä. Eniten säteilyä emittoi ns. musta kappale. Kun säteily osuu johonkin pintaan, se osittain heijastuu ja osittain absorboituu. Läpäisevissä pinnoissa kuten lasi osa säteilystä menee pinnan läpi. [5, sivu 12.]

Konvektiossa lämpö siirtyy kaasun tai nesteen virtauksen mukana. Konvektio voi olla pakotettua tai luonnollista. Pakotetussa konvektiossa kaasu tai neste liikkuu jonkin ulkopuolisen voiman vaikutuksesta, luonnollisessa konvektiossa taas lämpötilaerojen aiheuttamista tiheyseroista. Puhtaasti luonnollista konvektiota esiintyy rakenteissa harvoin. Yleensä on kyse molempien yhdistelmästä. Pakotettuja virtauksia saavat sisätiloissa aikaan mm. ilmanvaihdon puhaltimet ja ihmisten liikkeet. Rakennuksen ulkopuolella on tuuli ensisijainen pakotetun konvektion aikaansaaja. Suuria lämpömääriä voi siirtyä ilmavirtausten avulla hataran yläpohjan läpi ulos. Vastaava ilmamäärä korvataan ulkoilmalla, joka on lämmitettävä ja johon kuluu energiaa. [5, sivu 13.]

5.1.1 Lämmön siirtymisen tarkastelu Comsolilla

Työssä tutkittiin lämmönsiirtymistä vaakasuoraan seinärakenteen läpi. Fysikaaliseen simulaatioon käytettiin ohjelmaa Comsol Multiphysics 3.5a. Mallinnus suoritettiin modulilla "Heat Transfer" ja "Conduction". Kaikissa rakenteissa määriteltiin ulkolämpötilaksi -5°C ja sisälämpötilaksi $+20^{\circ}\text{C}$. Jos rakenteessa oli hyvin tuulettuva ilmarako, suoritettiin seinän tarkastelu tuuletusraosta sisäänpäin.

Materiaalit ja niiden lämmönjohtavuudet:

- **tiili** **$\lambda = 0,6 \text{ W/mK}$**
- **pehmeä kivivilla Paroc** **$\lambda = 0,036 \text{ W/mK}$**
- **betoni** **$\lambda = 1,2 \text{ W/mK}$**
- **kova lasivilla ISOVER** **$\lambda = 0,037 \text{ W/mK}$**

- tuulensuojalevy ISOVER RKL $\lambda = 0,031 \text{ W/mK}$
- siporexharkko 500 mm $\lambda = 0,12 \text{ W/mK}$
- puukuituvilla TERMEX $\lambda = 0,041 \text{ W/mK}$

5.2 Kosteuden siirtyminen

5.2.1 Veden kapillaarinen siirtyminen

Kapillaarisella vedenliikkeellä tarkoitetaan kosteuden siirtymistä rakenteen huokosissa nesteenä. Kapillaarisen liikkeen aiheuttaa rakenteen ja sen eri ainekerrosten pyrkimys kapillaariseen tasapainokosteuteen. Puu, tiilet harkot, yms huokoiset rakennusmateriaalit kuljettavat vettä huokosissaan eli niillä on ns. kapillaarinen imu. Valmiissa rakenteissa kapillaari-imu saa aikaan veden kulkeutumista muista materiaaleista huokosiin materiaaleihin ja kosteuden liikkumista huokosissa materiaaleissa. Huokosalipaine vaikuttaa materiaalissa kaikkiin suuntiin, joten vesi voi siirtyä kapillaarisesti kaikkiin suuntiin. Kapillaarinen kosteustasapaino on saavutettu, kun kosteus on noussut korkeudelle, jossa huokosalipaine ja maan vetovoima ovat tasapainossa. [4, sivu 53.]

Rakenteellisessa suunnittelussa tulee kosteuden kapillaarinen siirtyminen huokoiseen aineeseen yleensä estää kapillaarisuuden katkaisevalla kermillä, muovilla, bitumisivelyillä, riittävän tiiviillä pintakerroksella, puun päätysulkemisella tms. Eri materiaaleilla on erilainen kyky siirtää kosteutta kapillaarisesti. Esimerkiksi tiilen kapillaarinen vedentunkeutumiskerroin on n. 10 kertaa suurempi kuin betonilla jonka vesisementtisuhte on 0.3.

5.2.2 Diffuusio

Diffuusiolla tarkoitetaan rakennusfysiikassa yleensä kosteuden liikkumista vesihöyrynä rakenteen läpi. Melkein kaikki rakenteet vesihöyryä. Kosteus pyrkii diffuntoitumaan erottavan rakenteen läpi tilaan, jonka ilman vesihöyryn osapaine on pienempi.

Nykyaikaisissa seinärakenteissa diffuusio on yleensä hidasta eikä se kuivissa tiloissa aiheuta kosteushaittoja, vaikka höyrynsulkumuoveja ei käytettäisikään, jos rakenteet ovat näin suunniteltu. Pienet sisäpuolisessa höyrynsulussa olevat reiät eivät lisää sanottavasti diffuusiota, mutta kylläkin konvektiota.

Huokoisten rakennusmateriaalien kohdalla on harvoin kyse pelkästä diffuusiosta, kun vesihöyry kulkeutuu materiaaliin ja poistuu toiselta puolelta. Materiaalin sisällä osa kosteuden liikettä saattaa olla myös kapillaarista. Jotta estettäisiin vesihöyryn liiallinen tunkeutuminen seinämärakenteisiin ja samalla mahdolliset kosteusvauriot, seinämä tulee suunnitella siten, että lämmöneristeen ja lämpimän sisätilan väliin tulee riittävän vesihöyrytiivis kerros ja seinämärakenteen vesihöyrynvastus pienenee kylmään tilaan päin mentäessä.

[4, sivu 56.]

5.2.3 Vesihöyryn konvektio

Vesihöyryn konvektiolla tarkoitetaan ilmavirtausten mukana tapahtuvaa vesihöyryn siirtymistä. Ilmavirtaukset aiheutuvat paine-eroista. Kosteutta mukanaan kuljettavaa konvektiovirtausta saattaa esiintyä seinänsisäisenä eli ilman tiheuseroista johtuvana ns. luonnollisena konvektiona tai rakenteessa olevien reikien tai rakojen kautta ilmanpaine-erojen vaikutuksesta tapahtuvana pakotettuna konvektiona. Rakenteiden toiminnan kannalta suurin merkitys on kylmänä vuodenaikana rakojen, halkeamien, reikien yms. läpi sisältä ulos ilmanpaine-erojen vaikutuksesta tapahtuvilla ilmavirtauksilla, jotka voivat kuljettaa mukanaan moninkertaisia kosteusmääriä diffuusioon verrattuna. [4, sivu 56.]

5.2.4 Kosteuden siirtymisen tarkastelu WUFI:lla

Kosteudensiirtymisen tarkasteluun käytettiin ohjelmaa WUFI PRO 4.2. Ohjelmalla analysoitiin samat rakenteet kuin lämmönsiirtymisen tarkastelussa. Kaikista materiaaleista ei löytynyt täysin samaa vastinetta WUFI:n tietokannoista, joten niissä tapauksissa käytettiin mahdollisimman lähellä olevaa materiaalia. Esimerkiksi kovan lasivillan tilalla käytettiin mineraalivillaa, joka on myös vettä imemätön materiaali.

Jokainen tapaus käsiteltiin erikseen. Määriteltiin materiaalit ja niiden paksuudet, sekä valittiin ulkotilan ilmastoksi Espoo VTT ilmasto sekä sisätilan ilmastoksi EN 15026, joka on ohjelman valmis sisäilmastokäyrä.

5.3 Ulkoseinärakenteiden kosteustekninen toiminta

Seinärakenteiden kosteustekninen toiminta tutkittiin WUFI:lla. Rakenteet simuloitiin käyttämällä lähes samoja materiaaliarvoja ja lämmönvastuksia, kuin lämmönläpäisykertoimen määrittämisessä. Kaikkien rakennusmateriaalien osalta täysin vastaavaa ei löytynyt, joten jouduttiin käyttämään mahdollisimman lähellä olevia arvoja. Ohjelmassa on materiaalitietokanta, josta valittiin vastaavat materiaalit. Tuloksia voidaan pitää vain suuntaa antavina. Kokemusta matalaenergiataloista on ajallisesti melko vähän. Simulaatiossa saatiin selville rakenteen kosteusteknisen käyttäytymisen tilanteissa ja rajoissa, jotka ovat ennalta määriteltä, mutta poikkeukselliset olosuhteet ja esimerkiksi vesivahingot voivat aiheuttaa tilanteita, joita etukäteen ei pystytä ennakoimaan. Näiden tutkiminen etukäteen on haastavaa, mutta ongelmatilanteessa fysiikkaohjelmalla saadaan simuloitua, miten rakenne kuivuu ja tehdä korjaussuunnitelma sekä simuloida, miten korjaus auttaa rakenteen kuivumista.

5.4 Kosteusvaurioriskejä matalaenergiataloissa

Lämmöneristyksen lisäämisellä säästetään energiaa koska rakennus ei tarvitse lämmitysenergiaa niin paljon kuin pienemmällä lämmöneristyksen määrällä. Se sisältää kuitenkin riskin kosteuden hallinnasta. Lisälämmöneristyksen seurauksena rakenteen ulkopuoli viilenee. Samalla suhteellinen kosteus kasvaa ja se aiheuttaa suotuisimmat olosuhteet homeen kasvustolle ja kosteuden kondensoitumiselle. Samasta syystä heikkenee rakenteen vikasietokyky. Joissakin rakenteissa kosteustekninen toiminta heikkenee, vaikka rakenteita parannetaan. Lämmöneristyksen lisääminen pienentää rakenteen ulkopuolen lämpötilaa ja suhteellinen kosteus kasvaa. Kriittisen eristepaksuuden löytäminen on vaikeaa. Eristepaksuuden kasvaessa tilanne muuttuu pikku hiljaa huonommaksi. Kääntöpuolena voi olla myös energiatarpeen kasvaminen, jos jäähdystystarve rakennuksessa lisääntyy.

Lämmöneristyksen lisääminen muuttaa vaipparakennetta monessa tapauksessa niin paljon, että rakenteiden toteutustavat ja tuotantotekniikat muuttuvat. Rakenteista tulevat massiivisempia ja liittymäkohdista monimutkaisempia. Suuret muutokset ja nopea aikataulu lisäävät virheitä ja siten myös kosteusongelmat lisääntyvät. Rakennusaikaisen kosteushallinnan merkitys korostuu, koska kuivumisajat pitenevät. Rakenteiden

mitoittamisessakin voi tulla ongelmia. Esimerkiksi betoni-sandwich-ulkoseinärakenteessa ulkoseinän käyristyminen lisääntyy ja nurkkadetaljien toteutus vaikeutuu. Lisäksi ulkokuoren kannatus voi vaatia järeämmän tuennan esimerkiksi teräskonsolin. Toisena esimerkkinä tuuletetussa yläpohjassa lämmöneristeen parantaminen alentaa tuuletustilan lämpötilaa. Tästä seuraa, että kosteuden tiivistyminen ja homeen kasvu lisääntyy ja vikasietokyky heikkenee. Tuuletustilan toimintaa voidaan parantaa lämmityksellä tai koneellisen ilmanvaihdon avulla, mutta lisäeristeen tarve kyseenalaistuu, jos se tarvitsee energiaa tuuletustilan lämmittämiseen. [12.]

5.5 Kosteusvauriot

5.5.1 Mikrobien kasvuedellytykset

Vesi on mikrobien kasvulle välttämätön. Täysin kuivassa ympäristössä ei mikään mikrobi kasva, mutta itiöt säilyvät elinkykyisinä. Jos ilman suhteellinen kosteus on yli 70 %, mikrobikasvu on todennäköinen. Paikallisella kosteudella rakennusmateriaalissa tai pintamateriaalissa on huomattavasti suurempi merkitys kuin tilan yleisilman suhteellisella kosteudella. Kosteusvaatimukset ovat mikrobikohtaisia. Homesienillä ja hiivoilla alin kasvun mahdollistava rakenteen huokosilman suhteellinen kosteus $RH_{min} = 85 \%$, bakteereilla, mm. aktinobakteereilla $RH_{min} = 95 \%$ ja sinistäjä- ja lahottajasienillä $RH > 95 \%$. Suotuisissa olosuhteissa mikrobikasvusto voi kehittyä muutamassa päivässä ja vaihtelevissa olosuhteissa mikrobikasvu hidastuu.

Suomalaisissa rakennuksissa käytetään usein puuta, kipsilevyä, tapetteja ja muita selluloosapitoisia materiaaleja. Nämä kelpaavat mikrobeille ravinnoksi. Myös lämpötila-alue on erittäin laaja mikrobien elinkyvylle. Jotkut voivat kasvaa korkeissa n. $+50 \text{ °C}$:n tai matalissa -5 °C :n lämpötiloissa. Jos muut olosuhteet ovat kohdallaan niin rakennusten ja rakenteiden lämpötilat eivät rajoita mikrobikasvua. Useimmat homesienet kasvavat lämpötila-alueella $+5...35 \text{ °C}$, optimilämpötilan ollessa $+20...25 \text{ °C}$. [13.]

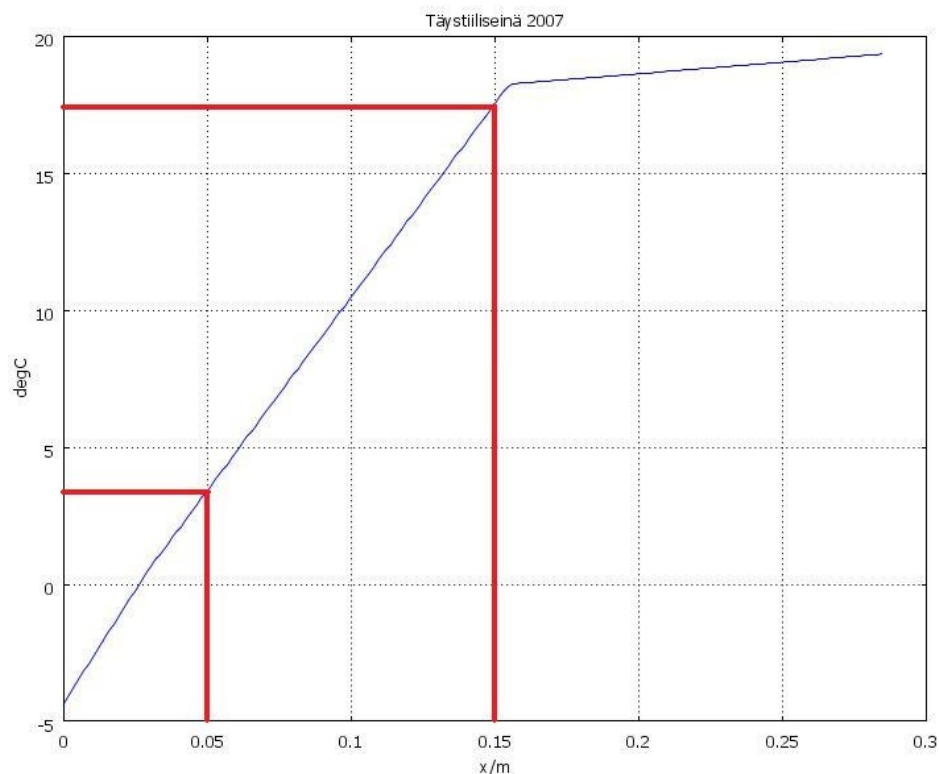
6 TULOKSET

6.1 Seinärakenteiden eristepaksuuden vertailun tulokset

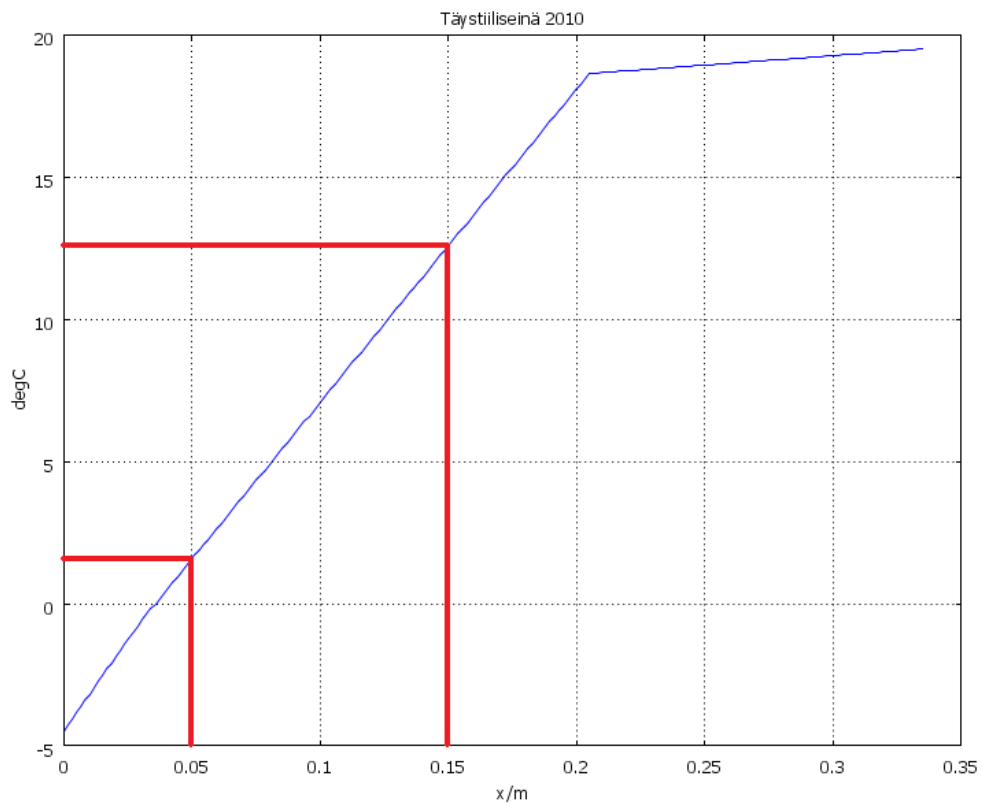
6.1.1 Täystiiliseinä

Verrataan eristepaksuuksia vuoden 2007 ja vuoden 2010 U-arvovaatimuksilla. Lasketaan myös tarvittava lisäeristemäärä, jotta päästään 2010-vaatimukseen. Lisäeristeeksi tarvitaan 50 mm niin päästään 0,174 W/m²K arvoon, jos otetaan huomioon RT-kortin määrittelemän kiinnikkeiden kylmäsilta vaikutus 0,016 W/m²K. Ilman tätä vaikutusta U-arvoksi tulee 0,158 W/m²K. Jos U-arvoa tarvitsee vielä pienentää, on se helpointa käyttämällä paksumpaa tuulensuojalevyä. Tarkasteltavaan rakenteeseen lisättiin eristepaksuutta 40 %.

Taulukko 3. Tuulensuojalevy 25 mm ja eristeen paksuus 125 mm. Täystiiliseinä 2007



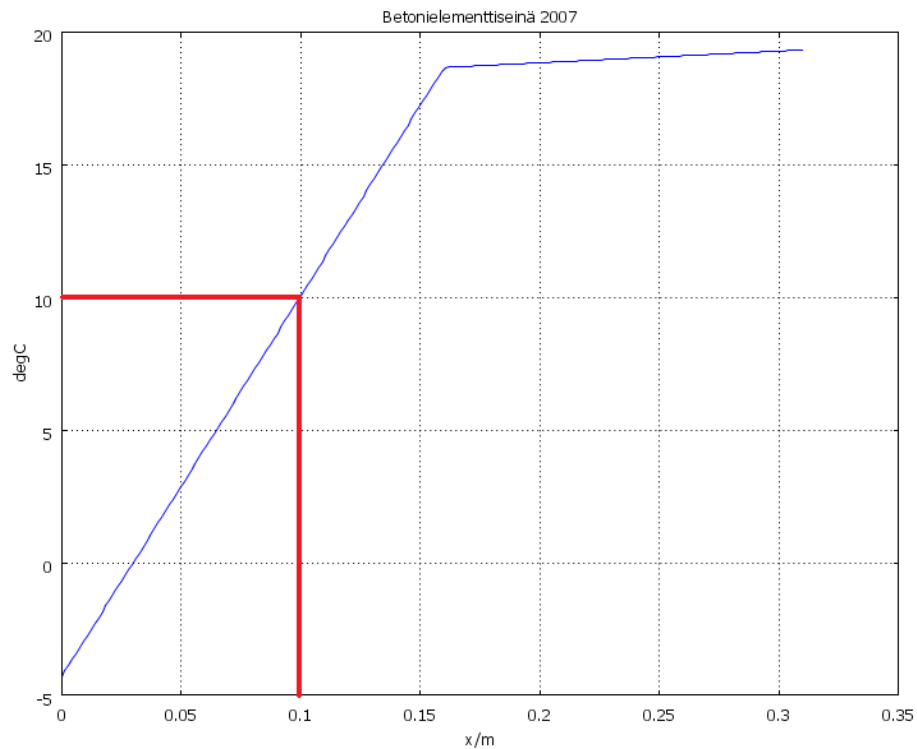
Taulukko 4. Tuulensuojalevy 25 mm ja eristeen paksuus 175 mm. Täystiiliseinä 2010



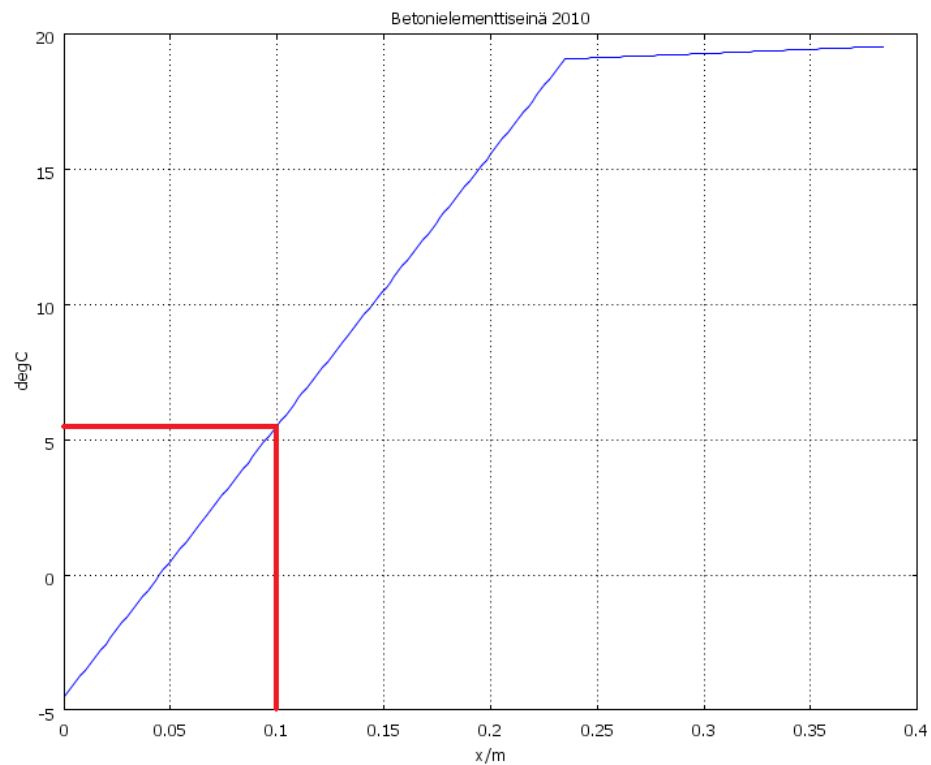
6.1.2 Betonielementtiseinä

Betonielementtiseinän rakenne on 70 mm ulkokuori, 160 mm lämmön eriste ja 150 mm sisäkuori. Sisäkuori on kantava rakenne. Eristeen paksuus oli 2007 U-arvovaatimuksilla 160 mm. Laskemalla 2010 vaatimusten mukaan, eristeen paksuudeksi tulee 235 mm. U-arvo 2007 kyseisellä rakennetyypillä oli 0,23 W/m²K. Lisäeristeellä päästään arvoon 0,168 W/m²K. Molemmat rakennetyypit sisältävät RT-kortin määrittelemän kylmäsilta vaikutuksen 0,02 W/m²K. Eristepaksuutta lisättiin 47 %

Taulukko 5. Eristeen paksuus 160 mm. Betonielementtiseinä 2007



Taulukko 6. Eristeen paksuus 235 mm. Betonielementtiseinä 2010

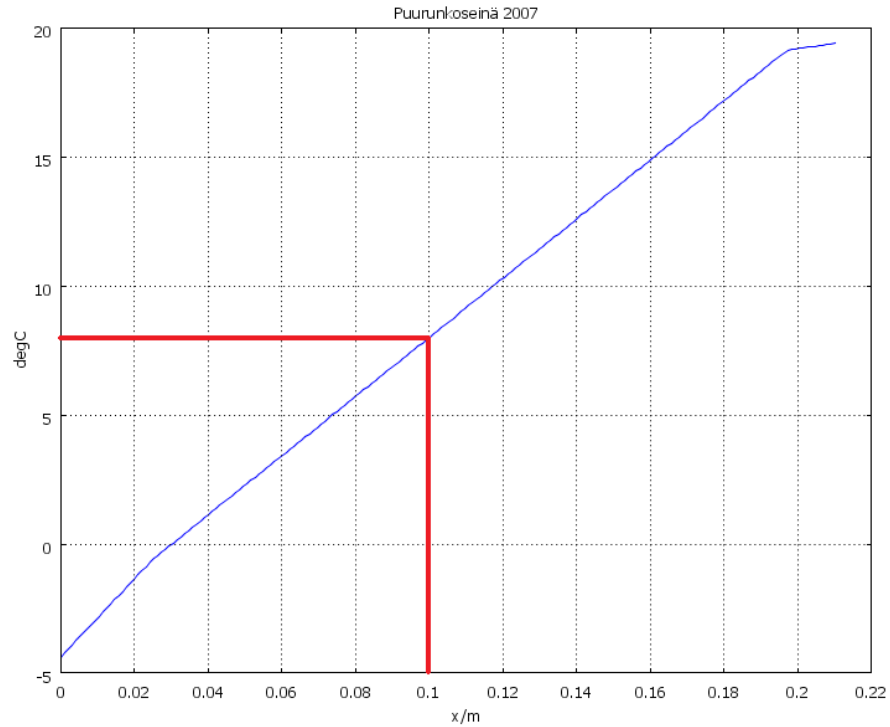


6.1.3 Puurunkoseinä puukuitueristeellä

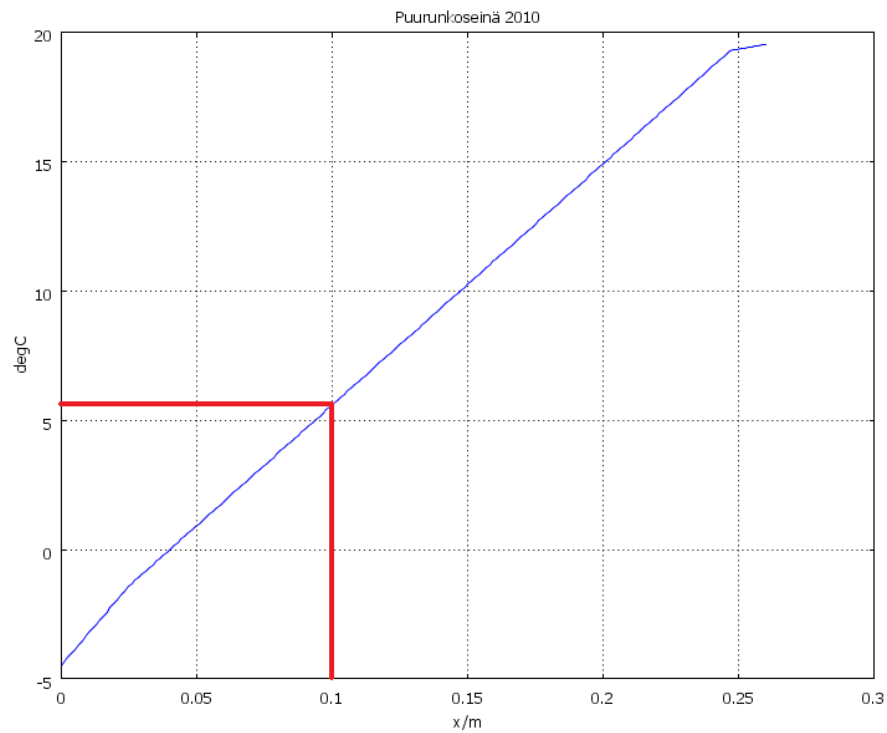
Vuoden 2007 vaatimuksilla seinän U-arvoksi tuli 0,19 W/m²K. Eristeen paksuus on 172 mm. Tarkasteltava rakenne on tuuletusraosta eteenpäin: 25 mm tuulensuojalevy, 172 mm puukuitueriste ja puurunko, höyrünsulkumuovi

ja 13 mm kipsilevy. Laskemalla tarvittavan lisäeristeen määrän uuden U-arvon mukaan, saadaan eristepaksuudeksi 225 mm. Tällöin U-arvoksi saadaan: 0,15 W/m²K. Eristepaksuutta lisättiin 31 %.

Taulukko 7. 172 mm eristeellä. Puurunkoseinä 2007



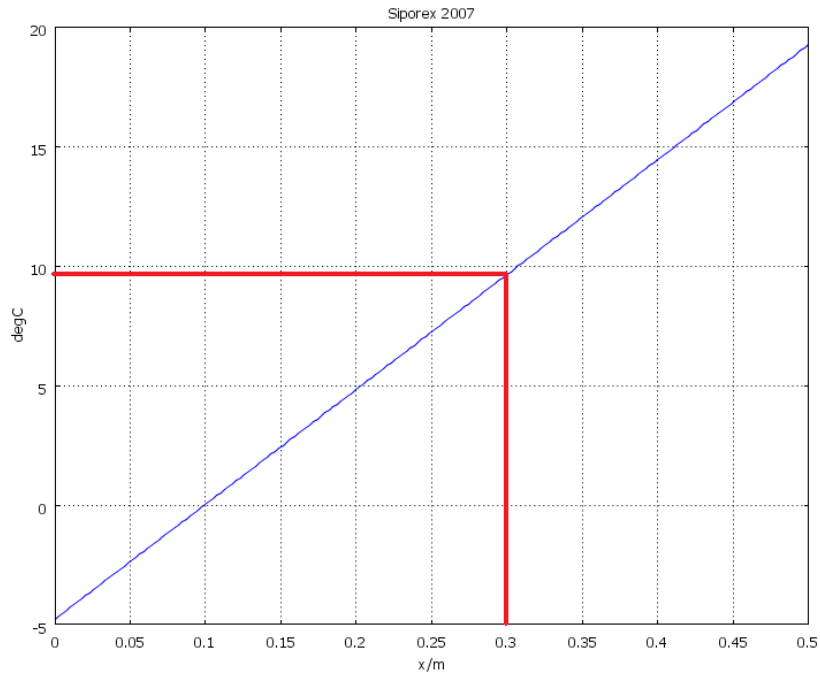
Taulukko 8. 225 mm eristeellä. Puurunkoseinä 2010



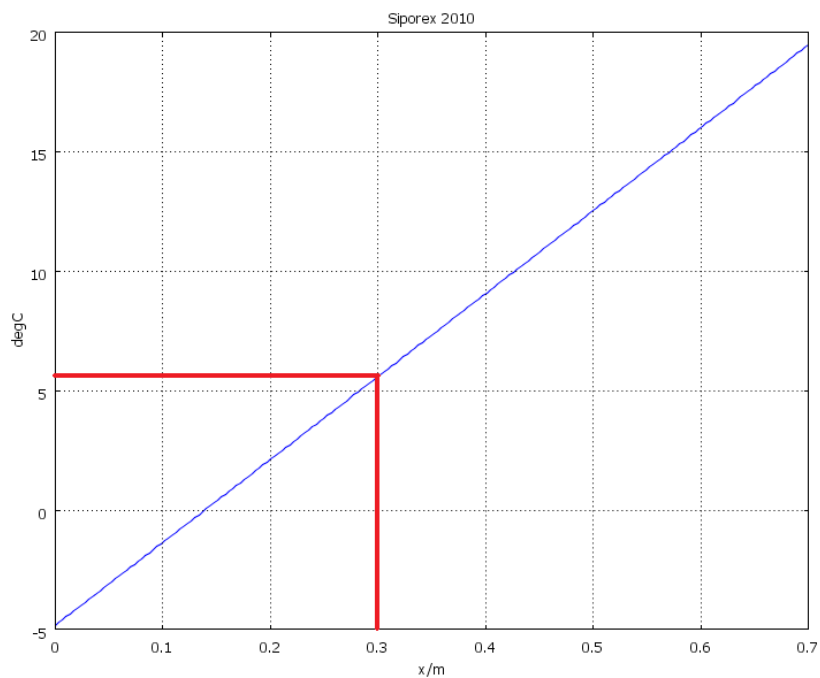
6.1.4 Siporexseinä

Tarkasteltiin Siporexharkon lämmönvastuutta. 2007 normeilla 500 mm paksu harkko saa U-arvoksi 0,23 W/m²K. Laskemalla tarvittavan paksuuden, jotta päästään 0,17 W/m²K U-arvoon, päädytään 685 mm. Valittiin 700 mm paksuudeksi ja tarkastelemalla Comsol-Multiphysics ohjelmalla saatiin tulokseksi 0,167 W/m²K. Materiaalin paksuutta lisättiin 40 %.

Taulukko 9. Siporex 500 mm. Siporex-seinä 2007



Taulukko 10. Siporex 700 mm. Siporex-seinä 2010



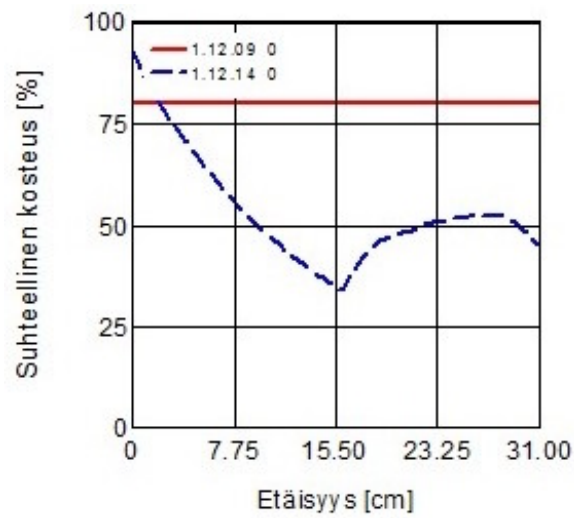
Kuvaajista 3-10 voidaan havaita, että lämpötila laskee hieman rakenteen ulko-osassa. Esimerkiksi täystiiliseinässä 50 mm ulkopinnasta katsottuna lämpötila on 2 °C pienempi rakenteessa, jossa on enemmän eristettä. 150 mm kohdalla lämpötilaero on jo 5 °C. Kun lämpötila laskee, suhteellinen kosteus kasvaa.

6.2 Seinärakenteiden suhteellisen kosteuden tarkastelu WUFI:lla

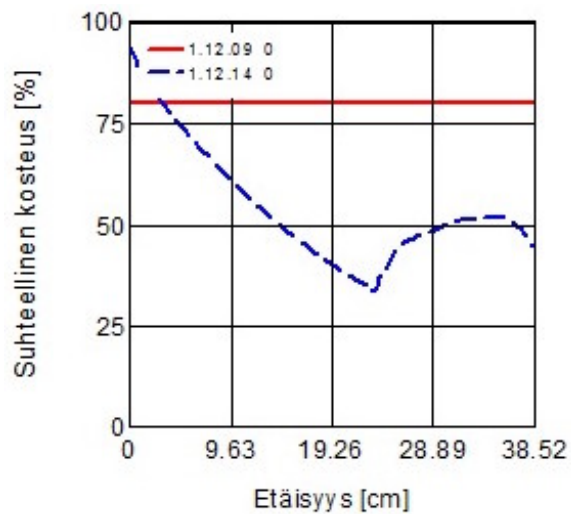
Jokainen seinärakenne simuloitiin WUFI:lla. Tarkastelupisteet merkittiin jokaiseen väliin, jossa materiaali vaihtuu, sekä joissain materiaaleissa eristeen keskeltä. Ohjelmasta saatiin kuvaaja, jossa on lämpötila ja suhteellinen kosteus. Näitä vertailemalla voidaan todeta, että suhteellinen kosteus kasvoi mitatuissa kohdissa, mutta ero ei ole kovin suuri. Esimerkiksi puurunkoisen seinän tuulensuojalevyn sisäpinnassa suhteellinen kosteus kasvoi noin yhden prosenttiyksikön lisäeristeellä. Suhteellisen kosteuden kasvu on niin pieni, että se tuskin vaikuttaa paljoa rakenteen toimivuuteen. Ero johtuu siitä, että lämpötila pienenee rakenteen ulko-osassa lämmöneristeen lisäämisen johdosta. Kun suhteellinen kosteus kasvaa, lisääntyy myös kosteusvaurion riski. Yli 70 % suhteellinen kosteus luo sopivat olosuhteet joillekin mikrobeille jos lämpötilaolosuhteet ovat otolliset.

Kun rakenteen ulkopinnassa suhteellinen kosteus kasvaa ja lämpötila pienenee, rakenne myös välillä jäätyy. Kun eriste jäätyy ja sulaa monta kertaa, sen eristyskyky heikkenee ajan mittaan. Kun eristettä on enemmän, se jäätyy suuremmalta matkalta kuin aikaisemmin, koska eristeen ulkopinnassa lämpötila on pienempi. Eristeen ulkopinnan jäätymisestä ei ole mitään haittaa.

6.3 Seinärakenteiden kosteuskuvaajat

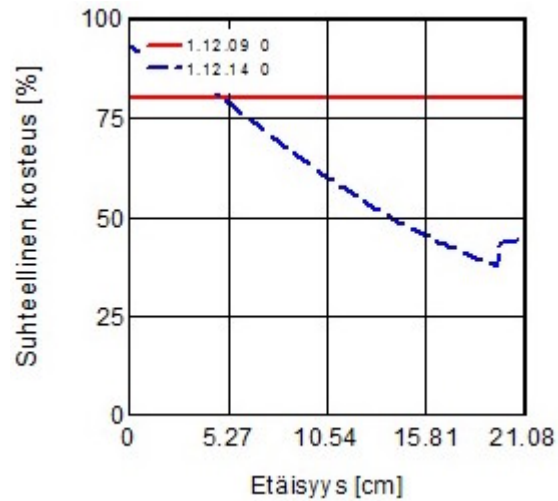


Kuvaaja 1. Betoniseinä 2007

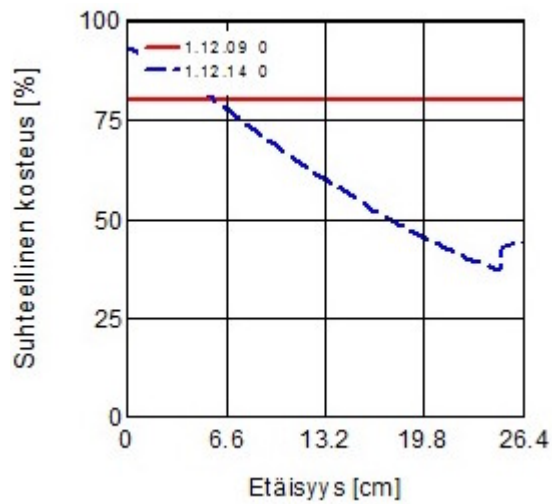


Kuvaaja 2. Betoniseinä 2010

Betoniseinän kosteusprofiilikäyrästä voidaan tulkita, että ulkoseinästä sisäseinään päin etäisyydellä 9,5 cm pienemmällä eristepaksuudella suhteellinen kosteus on 50 % ja suuremmalla eristepaksuudella se on noin 63 %.

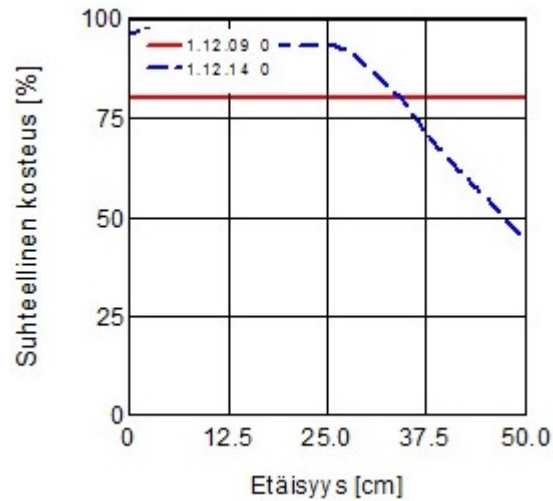


Kuvaaja 3. Puuseinä 2007

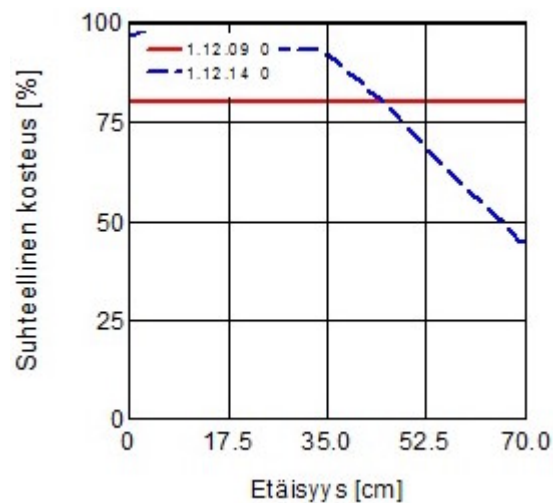


Kuvaaja 4. Puuseinä 2010

Puurunkoisessa seinässä ulkoseinän tuuletusraosta sisäseinään päin 9,5 cm kohdalla suhteellinen kosteus on 2007 rakenteen mukaan noin 63 %. 2010 rakenteen mukaan se on 67 %. Ero on 4 prosenttiyksikköä.

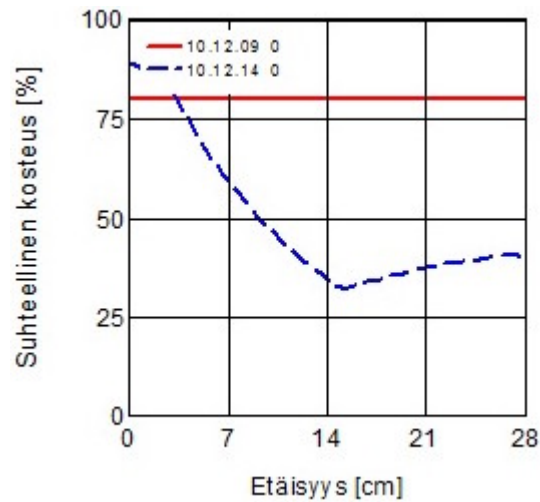


Kuvaaja 5. Siporex-seinä 2007

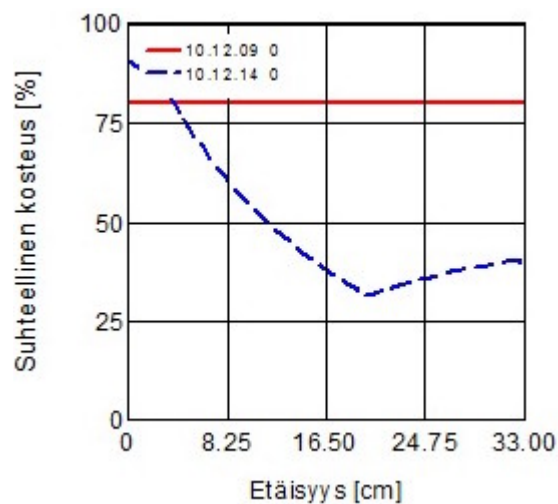


Kuvaaja 6. Siporex-seinä 2010

Siporex-seinässä kosteusprofilia voidaan tarkastella kohdassa jossa suhteellinen kosteus on 75 %. 2007 rakenteilla se on noin 345 mm ulkoseinästä sisäseinään päin. Vuoden 2010 rakenteilla se on noin 455 mm ulkoseinästä sisäseinään päin. Rakenne on siis pidemmältä matkalta kostea kun rakennepaksuus on suurempi. Seinien pinnoittamiseen on kiinnitettävä huomiota, jotta kosteus pääsee pois ja lisää kosteutta ei pääse rakenteeseen.



Kuvaaja 7. Täystiiliseinä 2007



Kuvaaja 8. Täystiiliseinä 2010

WUFI:sta saatua täystiiliseinän kosteusprofiilia voidaan tulkita niin, että noin 80 mm päässä ulkoseinän ilmaraosta sisäseinään päin 2007 rakenteilla suhteellinen kosteus on noin 51,5 %. Vuoden 2010 rakenteilla suhteellinen kosteus samassa kohdassa on noin 55 %. Ero ei ole suuri ja suhteellinen kosteus on alhainen, joten rakenne on varmasti toimiva myös suuremmilla eristepaksuuksilla.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Lämmöneristyksen lisääminen rakenteeseen parantaa rakenteen energiatehokkuutta huomattavasti. Suurella osalla eri rakenteista ei lisäeristyksestä ole haittaa, mutta ongelmallisia rakenteita tulee varmasti jos ei kiinnitetä huomiota rakennusfysiikaliseen suunnitteluun ja rakennusaikaiseen kosteudenhallintaan. Eristyksen kylmeneminen pidemmältä matkalta voi aiheuttaa rakenteeseen kosteuden tiivistymistä, koska suhteellinen kosteus kasvaa. Esimerkiksi WUFI:lla tarkastellussa Siporex-seinässä rakenne on kostea pidemmältä matkalta kun rakenne on massiivisempi. Tällöin ulkopuolen pinnoittamiseen on kiinnitettävä huomiota, jotta rakenne pysyy kuivana. Rakenteiden tuuletukseen pitää kiinnittää huomiota, jotta kosteus pääsee pois. Rakenteista tulee monimutkaisempia ja massiivisempia, ja kosteuden hallintaan on kiinnitettävä enemmän huomiota. Uusien rakennetyyppien tutkiminen esimerkiksi fysiikkaohjelmilla simuloimalla auttaa varmasti ymmärtämään, miten rakenne käyttäytyy, kun ilmasto muuttuu. Näin voidaan vähentää suunnitteluvirheitä ja varautua säärasituksiin ja vaativaan ilmastoon.

Rakennusfysiikkaohjelmat soveltuvat uudisrakennuksen suunnittelun apuvälineeksi, mutta erittäin hyödyllisiä ne ovat korjausrakentamisessa. Kun parannetaan vanhaa rakennusta, ohjelmilla voidaan etukäteen simuloida suunniteltu rakenne ja katsoa miten se käyttäytyy esimerkiksi kosteusteknisesti ja lämmönsiirtymisen osalta. Tutustuin ohjelmiin vain pienellä osa-alueella, mutta olen vakuuttunut, että niistä saatava informaatio auttaa selvittämään haastavankin rakenteen ja tilanteen.

Kun eristettä lisätään rakenteeseen, ei talvella tarvita niin paljon lämmitysenergiaa, mutta rakennuksista tulee niin tiiviitä ja eristettyjä, että kesällä tarvitaan energiaa jäähdyttämiseen. Pitäisi löytää optimaalinen rakenne, joka säilyttää talvella lämmön rakennuksen sisäpuolella ja on kesällä sopivan viileä.

VIITELUETTELO

- [1] Suomen rakentamismääräyskokoelma C4, rakennuksen lämmöneristys. Ohjeet. Helsinki: 2003.
- [2] Stanford yliopiston esittely ohjelmasta Comsol Multiphysics.
- [3] Lämmöneristysmääräysten 2003 täyttäminen, Lämpöhäviöiden tasaus ja U-arvon laskenta, Rakennustieto Oy.
- [4] Siikanen Unto, RAKENNUSFYSIIKKA Perusteet ja sovellukset, Rakennustieto Oy, Helsinki 1996.
- [5] Björkholtz Dick, Lämpö ja Kosteus rakennusfysiikka., Rakennustieto Oy, Helsinki 1997
- [6] Rakennusfysiikkaohjelmat, Artikkelit Rakennustekniikka-lehdessä 5/2003, sivu 67 - 70
- [7] WUFI-ohjelman esittely, http://www.hoki.ibp.fhg.de/wufi/wufi_frame_e.html luettu 11.4.2010
- [8] TTY Tutkimusselostus nro trt/1706/2008 MATALAENERGIARAKENTEIDEN TOIMIVUUS
- [9] Suomen rakentamismääräyskokoelma C2,
- [10] VTT:n lausunto rakenteiden energiatehokkuuden parantamisen vaikutuksista rakenteiden kosteustekniseen toimivuuteen.
- [11] Suomen rakennusmääräyskokoelma C3, 2010
- [12] Vinha Juha, Kosteusriskejä matalaenergiarakentamisessa – onko niitä / miten hallitaan? 29.4.2010, TTY, Rakennustekniikan laitos
- [13] Sisäilmayhdistys
www.sisailmayhdistys.fi/portal/terveelliset_tilat/kosteusvauriot/mikrobit/mikrobikasvun_edellytykset/ (luettu 30.9.2010 klo 17:00)
- [14] RT 21422 Rakentamismääräysten muistilista energiamääräysten aiheuttamista muutoksista rakennusurakoitsijoille ja rakennuttajille
- [15] Kyyrönen Keijo, Talonrakennus 2., 2008 Otava, Helsinki