

# TOIMISTORAKENNUKSEN SISÄILMAN LAADUN PARANTAMINEN TIIVISTYSKORJAUKSILLA

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma Rakennustekniikan koulutusohjelma			
Työn tekijä(t) Joonas Passi			
Työn nimi Toimistorakennuksen sisäilman laadun parantaminen tiivistyskorjauksilla			
Päiväys	20.5.2017	Sivumäärä/Liitteet	40/5
Ohjaaja(t) Arto Puurula, rakennetekniikan yliopettaja, TkT; Matti Mikkonen, lehtori, DI			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Sirate Oy, Alpo Ilmarinen, vanhempi asiantuntija, Jyväskylä			
<p>Tiivistelmä</p> <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli Jyväskylässä sijaitsevan Gummerus-talon toimistotilojen sisäilman laadun parantaminen tiivistyskorjauksilla. Tiivistyskorjaukset tehtiin mittausten ja tutkimusten pohjalta. Opinnäytetyössä käsiteltiin, mitkä tekijät vaikuttavat sisäilmaan sekä miten kyseiset seikat tulee ottaa huomioon, kun suunnitellaan tiivistyskorjauksia.</p> <p>Kohteeseen tehtiin useita tutkimuksia, joiden tarkoituksina oli selvittää mahdollisen sisäilmaongelman laajuudesta sekä mahdollisista aiheuttajista. Tutkimukset teki Sirate Oy. Tutkimukset käsittivät paine-eromittaukset, merkkiainetutkimukset sekä mikrobi-, haitta-aine- ja hiukkaspitoisuusmittaukset. Tutkimusten avulla poissuljettiin mahdolliset kosteusvauriot ja homeongelmat ja varmistettiin tiivistyskorjausten soveltuvuus pääasiallisena korjaustoimenpiteenä kyseiseen kohteeseen. Opinnäytetyön aikana tehtiin lisäksi lämpökuvauus toimiston tutkimattomiin tiloihin, jonka tarkoituksena oli kartoittaa tilojen ilmavuotoja ja epätiiveyskohtia. Tutkimusten perusteella suunniteltiin tilojen korjaustyöselostus. Korjaustyöselostuksessa esitettyjä korjaustapoja sovellettiin mallihuoneessa. Mallihuoneen tiivistyskorjausten onnistuminen varmistettiin laadunvarmistuskokeella, joka tehtiin merkkiainekokeella.</p> <p>Lopputuloksena saatiin yhteenveto toimistorakennuksen sisäilman laadusta sekä tiivistyksiä varten korjaustyöselostus. Tutkimusten avulla havaittiin, että sisäilmaongelmat johtuivat puutteellisista ikkuna-seinä-liitoksen sekä yläpohjan tiivistyksistä, joiden kautta sisäilmaan oli päässyt haitallisia kuituja, pölyjä ja haitta-aineita. Tiivistyskorjauksilla ja ilmanvaihdon säädöllä voidaan näin ollen vaikuttaa toimiston sisäilman laatuun ja sitä kautta sisäilmastoon.</p>			
Avainsanat Tiivistyskorjaus, sisäilma			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Construction Engineering			
Author Joonas Passi			
Title of Thesis Improving the Indoor Air Quality in an Office by Using Airtightness Renovations			
Date	May 20th, 2017	Pages/Appendices	40/5
Supervisor(s) Mr Arto Puurula, Principal Lecturer PhD; Mr Matti Mikkonen, Senior Lecturer			
Client Organisation /Partners Sirate Oy, Jyväskylä, Mr Alpo Ilmarinen, Senior Specialist			
<p>Abstract</p> <p>The purpose of this final project was to improve the indoor air quality in the office of the Gummerus Real Estate Building by airtightness renovations. The thesis discusses which factors cause poor indoor air quality and air leakage and how these factors are taken noticed when designing airtightness renovation.</p> <p>A number of tests were carried out to identify the scale of possible problems and reasons for the indoor air quality. The indoor air quality tests included microbiological, VOC compound and hazardous substance tests. The air leakage measurements included thermography and tracer gas tests. The tests were carried out by Sirate Ltd and done to exclude the possibilities of the microbiological and hazardous substances coming from the structures and to ensure the suitability of the airtightness renovations as a primary remedy to improve the indoor air quality in the project. The airtightness renovation report was based on the results of these tests. The plans were applied in the model room. The success of the airtightness renovations in the model room was ensured by a quality assurance test, which was done by using a tracer gas test.</p> <p>As a result of this project there was a summary of the indoor air quality in the office building as well as an airtightness renovation report. The tests proved that the problems were primarily caused by the lack of the airtightness in window-wall-joints, partition-roof-floor-joints and air leakages of the roof, which had let harmful fibres and other hazardous substances access the indoor air. The airtightness renovation plans and ventilation adjustments can thus improve indoor air quality and thus the whole indoor climate significantly.</p>			
Keywords air tightness renovations, indoor air quality			

## ESIPUHE

Opinnäytetyö on toteutettu Sirate Oy:n toimeksiannosta. Opinnäytetyö liittyy Gummerus-kiinteistöt Oy:n omistaman Gummerus-talon ja kiinteistön tiloissa vuokralla toimivan Jyväskylän Yrityskonsultit Oy:n sopimaan yhteiseen projektiin, jonka tarkoituksena on Gummerus-talon sisäilman laadun ja olosuhteiden parantaminen.

Osa tämän opinnäytetyön aineistosta on salattu. Opinnäytetyöstä salattuja aineistoja ovat osa kohdetiedoista ja kohteeseen tehdyt toimenpiteet, kuten mittaukset ja tutkimustulokset, sekä osa liitteistä. Salassa pidettävien aineistojen vuoksi julkaistu opinnäytetyö on tiivistelmä, joka sisältää pääasiassa teoretietoa sisäilmaan vaikuttavista tekijöistä, mittauksista ja tiivistyskorjauksista.

Haluan kiittää opinnäytetyön tekemisestä ohjaavia opettajiani Arto Puurulaa ja Matti Mikkosta sekä Sirate Oy:n Alpo Ilmarista, joilta sain ohjausta ja opastusta opinnäytetyön tekemisessä ja valmistelussa. Lisäksi haluan kiittää Sirate Oy:tä mielenkiintoisesta ja opettavaisesta opinnäytetyön aiheesta.

25.5.2017

Joonas Passi

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	6
1.1	Tausta ja tavoitteet.....	6
1.2	Lyhenteet ja määritelmät.....	8
2	SISÄILMA .....	10
2.1	Sisäilma ja sisäilmasto.....	10
2.2	Sisäilmaa heikentävät tekijät.....	11
2.2.1	Mikrobit.....	11
2.2.2	Orgaaniset kaasumaiset epäpuhtaudet, VOC-yhdisteet .....	12
2.2.3	Hiukkaset, kuidut ja pölyt .....	13
3	TIIVIYSTARKASTELUT JA -MITTAUKSET.....	14
3.1	Paine-ero.....	15
3.2	Paine-eromittaus.....	17
3.3	Ilmavuotokohdat ja niiden paikantaminen .....	17
3.3.1	Merkkiainekoe.....	17
3.3.2	Lämpökuvaus.....	19
4	TIIVISTYSKORJAUKSET .....	21
4.1	Tiivistyskorjauksessa käytettävät materiaalit.....	21
4.2	Kohteen tiivistyskorjausten toteutus ja mallihuone .....	23
4.3	Korjausten jälkeiset mittaukset ja laadunvarmistus .....	24
5	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINNAT.....	26
	LÄHTEET .....	27
	LIITE 1: MALLIHUONEEN ULKOSEINÄRAKENNE .....	29
	LIITE 2: TIIVISTYSKORJAUSTYÖSELOSTUS.....	30

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Tausta ja tavoitteet

Opinnäytetyö liittyy Gummerus-kiinteistöt Oy:n omistaman Gummerus-talon ja kiinteistön tiloissa vuokralla toimivan Jyväskylän Yrityskonsultit Oy:n sopimaan yhteiseen projektiin, jonka tarkoituksena on Gummerus-talon sisäilman laadun ja olosuhteiden parantaminen. Gummerus-talo on vuonna 1963 rakennettu kiinteistö, joka oli alun perin rakennettu kirjapaino Gummeruksen tiloiksi. Tilat sisälsivät alun perin sekä halliosan että toimistotilat. Myöhemmissä muutostöissä myös entinen kirjapainon hallitila on muutettu toimistotiloiksi. Lisäksi tiloihin on vuosien saatossa tehty mm. ilmanvaihtoteknisiä korjauksia.

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimii Sirate Oy, joka toimii kyseisessä projektissa sisäilma-asiantuntijana. Opinnäytetyön ja siihen liittyvien toimenpiteiden kohteena on Gummerus-talossa vuokralla toimivan Yrityskonsultit Oy:n toimistotilat. Osa Yrityskonsultit Oy:n työntekijöistä on kokenut saavansa kiinteistön tiloissa erilaisia oireita, kuten huimausta, astmaa, hengitysvaikeuksia ja päänsärkyä. Jyväskylän Yrityskonsultit Oy on tullut vuokralle kiinteistöön vuonna 2014 ja henkilökunnan kokemat oireilut ovat alkaneet vuoden 2015 aikana. Oireilujen lisäksi henkilökunta on tuntenut ilmanvaihdon olevan osassa tiloja riittämätön ja ilmanlaadun ajoittain tunkkaiseksi.

Opinnäytetyön tavoitteena on toimistotilojen sisäilman laadun parantaminen tiivistyskorjauksilla. Tiivistyskorjauksia varten suunnitellaan korjaustyöselostus, jota sovelletaan ns. mallihuoneeseen. Lähtökohtana korjaustyöselostukselle ja tiivistyskorjauksille toimivat Siraten tekemät sisäilmatutkimukset ja opinnäytetyön aikana tehtävät mittaukset, kuten lämpökuvaukset ja merkkiainekokeet. Tutkimuksissa perehdytään tiivistyskorjausten kannalta merkittäviin tutkimuksiin, kuten paine-eromittauksiin, lämpökuvauksiin ja merkkiainekokeisiin ja käsitellään tiivistyksien puutteellisuudesta ja ilmavuo-doista aiheutuviin sisäilman ongelmiin, aiheuttajiin ja vaikutuksiin. Koska Gummerus-talo on kaksikerroksinen toimistorakennus, joka sisältää lisäksi kellarin, on opinnäytetyö rajattu käsittelemään pääasiassa Yrityskonsulttien toisen kerroksen tiloja. Tutkimusten pohjalta valitaan tiivistyskorjausten toteutuksen mallihuoneeksi tila, jossa ongelmien on todettu olevan pahimmillaan. Tiivistyskorjausten onnistuminen mallihuoneeseen varmistetaan merkkiainekokeella tehdyllä laadunvarmistuskokeella.

Opinnäytetyön tilaana toimii Sirate. Sirate on organisaatio, jonka alaisuudessa toimii kaksi yritystä Sirate Oy ja Sirate Group Oy. Sirate Oy on vuonna 2009 perustettu sisäympäristöpalveluihin keskittynyt yritys, joka toimii Jyväskylässä. Sirate Group Oy on vuonna 2012 perustettu yhtiö, joka toimii Tampereella, Kuopiossa ja Turussa. Siraten toimialaan kuuluvat toimisto-, liike- ja palvelurakennusten sisäympäristötutkimukset, rakennushankkeiden sisäympäristökonsultointi, kosteusmittaukset ja kuivatuspalvelut, tekniset asiantuntijaselvitykset, rakennustekniset kuntoarviot ja -tutkimukset sekä asumisterveyteen ja työympäristöön liittyvät arviointi- ja mittauspalvelut.

Sirate on mukana useissa eri kehitys- ja tutkimushankkeissa ja yrityksen tavoitteena on kehittää uusia ja parempia terveyttä tukevia ratkaisuja paremman sisäilmaston puolesta. Sirate on ollut mukana useissa TEKES:in ja Työsuojelurahaston tukemissa tutkimus ja kehitys hankkeissa.

(sirate.fi.)

## 1.2 Lyhenteet ja määritelmät

Diffuusio	Kaasumolekyylien liikettä, jossa molekyylit pyrkivät tasoittumaan. Kulkuuntana on suuremmasta pitoisuudesta pienempään.
Ilmatiiveys	Ilmatiiveys kuvaa rakennusten eri rakennusosien ja rakenteiden kykyä vastustaa ilmavirtojen liikettä rakenteiden läpi
Ilmavuoto	Rakennusosassa, rakenteessa tai rakenneliitoksessa oleva epäjatkuvuuskohta, jonka kautta ilmavirtaus pääsee kulkeutumaan rakenteen läpi.
Konvektio	Lämmönsiirtymistapa, jossa energia siirtyy kaasun tai nesteen virtauksen mukana. Esimerkiksi ilmassa lämmin ilma siirtyy ylöspäin ja viileä ilma laskeutuu alaspäin.
Laadunvarmistusmenetelmä	Laadunvarmistuksella tutkitaan tehdyn korjaustoimenpiteen ja käytettyjen korjausmenetelmien/-suunnitelmien onnistumista. Menetelminä tiivistyskorjausten yhteydessä voidaan käyttää esimerkiksi merkkiainekoetta, lämpökuvausta ja tiiviysmittauksia.
Mallihuone	Ennalta valittu tila, johon tehdään ennalta tehtyjen suunnitelmien mukainen mallikorjaus. Korjauksella halutaan varmistaa materiaalien ja menetelmien soveltuvuus ja käyttö kohteessa. Mallihuoneen korjaukset tehdään samalla periaatteella, millä varsinaiset tilat on suunniteltu tehtäväksi. Mallihuoneeseen tehdään lisäksi laadunvarmistuskokeita, joiden pohjalta tehdään päätös käytettyjen tiivistyskorjausten sopivuudesta ja mahdollisista muutoksista.
Merkkiainekoe	Merkkiainekokeella tutkitaan mahdollisten ilmavuotokohtien sijaintia ja suuruutta rakenteissa.
Paine-ero	Vaipparakenteiden ulko- ja sisäpuolisten paineiden välillä vallitseva paineiden erotus, joka johtuu lämpötilaeroista, tuulesta, sekä ilmanvaihdosta.
Suhteellinen kosteus RH	RH (relative humidity) kuvastaa, kuinka monta prosenttia ilmamäärä sisältää vettä suhteessa siihen, kuinka paljon kyseisessä lämpötilassa oleva ilma voi sisältää vettä.



Tiiviyskorjaus	Korjausrakentamisen keino, jossa lähtökohtana on estää hallitsemattomat ilmavuodot tai ilmavirtaukset ja katkaista niiden mukana sisäilmaan tulevat epäpuhtaudet tiivistämällä epätiivis rakenne tai liitos.
Vaipparakenne	Tarkoitetaan rakennusosia ja rakenteita, jotka erottavat lämpimän tai puolilämpimän tilan kylmästä ulkoisesta tilasta.
VOC-yhdiste	(Volatile Organic Compound) Orgaaniset haihtuvat yhdisteet ovat kaasumaisessa muodossa olevia orgaanisia yhdisteitä, joiden lähteenä rakennuksessa voivat olla rakennus- ja sisustusmateriaalit sekä tekstiilit.

## 2 SISÄILMA

Sisäilmastolla ja sisäilmalla on suuri vaikutus ihmisen hyvinvointiin ja viihtyvyyteen. Koska nykyihminen viettää elämästään suurimman osan sisätiloissa, on erityisen tärkeää, että hengitettävä ilma on puhdasta, eikä aiheuta oireita. Tässä luvussa käsitellään, mitkä syyt voivat johtaa huonoon sisäilmaan sekä sisäilman laatuun vaikuttavat ja sitä heikentävät tekijät.

### 2.1 Sisäilma ja sisäilmasto

Usein kuullaan virheellisesti puhuttavan sisäilmasta ja sisäilmastosta samaa tarkoittavana asiana. Kun puhutaan sisäilmastasta, tarkoitetaan sitä ilmaa, joka rajautuu rakenteiden rajaamalle alueelle ja jota hengitämme. Sisäilma käsittää siis vain hengitysilman. Sisäilmastosta puhuttaessa tarkoitetaan kokonaisuutta, joka käsittää sisäilman hengitysilman lisäksi myös ilmanvaihtojärjestelmän ja lämpöolosuhteet. (Työterveyslaitos 2011, 10.)

Työsuojeluhallinnon mukaan työpaikan terveellinen ja hyvä sisäilma on edellytys tuottavalle ja turvalliselle työympäristölle (Työsuojelu.fi). Terveiden kannalta on tärkeää, että hengitysilma on riittävän puhdasta, eikä se sisällä haitallisia yhdisteitä tai epäpuhtauksia. Huono työpaikan sisäilma voi aiheuttaa moninaisia oireita. Huonolle sisäilmalle altistuneilla voi olla tavallista enemmän hengitystieinfektioita, kurkun käheyttä tai kuivuutta, väsymystä ja päänsärkyä, nenän tukkoisuutta tai vuotoa, silmien kutinaa sekä ärsytystä ja kirvelyä, kuumeilua sekä nivel- ja lihaskipuja. Lisäksi eri ihmiset voivat oireilla eri tavalla tai eivät lainkaan. Yleensä huonosta sisäilmasta kärsivät oireilevat vain kyseisissä tiloissa, joissa huonoa sisäilmaa esiintyy. Oireet usein häviävät nopeasti, kun tilasta poistutaan. (Työsuojelu.fi.) Koska oireet antavat usein vain epäilyksen huonosta sisäilmasta, tarvitaan sisäilmaongelman todentamiseksi lisäksi laajempia tutkimuksia.

Huonoon sisäilmaan on monta eri syytä, jotka voivat johtua yhdestä tai useammasta tekijästä.

Työsuojelu.fi sivuilla on lueteltu yleisimmät syyt seuraavasti:

- ilmanvaihto on riittämätön ja toimimaton
- homeitiöitä kulkeutuu kosteus- ja homevaurioituneista rakenteista sisäilmaan
- kosteus reagoi pinnoitemateriaalien kanssa
- haihtuvat epäterveelliset VOC-päästöt rakennus- ja sisustusmateriaaleista sekä kalusteista
- suojaamattomista ilmanvaihtokanavien äänenvaimentimista ja akustiikkalevyistä irtoavat hiukkaset
- työtiloihin varastoitu tavara
- riittämätön tilojen siivous.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on parantaa toimistorakennuksen sisäilmaa parantamalla rakennuksen epätiiveyskohtien ja vaipan ilmavuotojen tiiveyttä. Toimistorakennuksen sisäilmaa heikentävät tekijät johtuvat pääosin epätiiveyskohtien ja ilmavuotojen mukana tulevasta rakennepölystä ja hiukkasista.

## 2.2 Sisäilmaa heikentävät tekijät

Sisäilmaa voivat heikentää monet ilman erilaiset epäpuhtaudet, kuten kaasut ja hiukkaset. Niiden lähteenä voivat olla sisätiloissa käytetyt rakennus- ja sisustusmateriaalit tai ulkoa sisäilmaan epätiiveyskohdan kautta kulkeutuvat epäpuhtaudet. Myös kosteusvaurion seurauksena vaurioituneet materiaalit, kuten tasoitteet, matot ja maalit voivat aiheuttaa sisäilmaan haitallisia päästöjä. ([Hengitysliitto.fi](http://Hengitysliitto.fi) a.) Kuten voidaan havaita sisäilmaongelma ei aina johdu vain yhdestä laatu heikentävästä seikasta vaan on usein usean tekijän summa.

### 2.2.1 Mikrobit

Mikrobit ovat pieneliöitä, jotka koostuvat homeista ja lahottajasisienistä. Mikrobin kasvun edellytyksenä on riittävä kosteus, ravinto, ilma ja lämpötila. Sisäilman mikrobikantaan vaikuttavat sekä ulkoilman mikrobit, että sisäilman mikrobikanta, joiden lähteenä ovat esimerkiksi eläimet, ihmiset, pöly sekä orgaaniset materiaalit, kuten huonekasvit. ([Sisailmayhdistys.fi](http://Sisailmayhdistys.fi) a.)

Kosteudella on suurin merkitys mikrobin kasvun kannalta. Jotta rakennusmateriaalin mikrobikasvu alkaisi, on edellytyksenä kuitenkin, että materiaali sisältää ennestään kasvustoa tai mikrobeja. Rakennusta kuormittavat monesta eri lähteestä tulevat ulko- ja sisäpuoliset kosteusrasitukset. Mikäli rakennus ei toimi kosteusteknisesti oikein nämä rasitukset voivat saada aikaan kosteusvaurion. ([Sisailmayhdistys.fi](http://Sisailmayhdistys.fi) a.) Jotta home kasvu olisi mahdollista, on ilman suhteellisen kosteuden oltava yli 70 % ja lämpötilan +10–55 astetta.

Mikrobit tuottavat haihtuvia orgaanisia yhdisteitä eli mikrobi-VOC (mVOC). Nämä kaasumaiset epäpuhtaudet syntyvät sienten ja homeiden aineenvaihduntatuotteina kasvun aikana. Haihtuvien aineenvaihduntatuotteiden lisäksi mikrobit voivat tuottaa sisäilmaan myrkyllisiä yhdisteitä, toksiineja. Mykotoksiinit ovat homeiden aiheuttamia haitallisia yhdisteitä. Mykotoksiinit eli homemyrkyt ovat ns. sekundaarisia aineenvaihduntatuotteita, joita ilmaantuu vain epänormaaleissa hankalissa kasvuolosuhteissa. Tällaisia haastavan kasvuympäristön aiheuttajia ovat esimerkiksi pimeys, matala hiilidioksidipitoisuus ja tärkeiden ravintoaineiden puute. Muita kosteusvauriorakennuksissa kasvavien homeiden sisäilmaan päästäviä haittoja ovat itiöt, allergeenit sekä rihmaston kappaleet. ([Seuri ja Palomäki 2000, 49–53.](#)) Mikrobin aiheuttamien terveyshaittojen aiheuttajia on useita, eikä kaikkia sairauksien ja oireiden aiheuttajia tai syntymekanismia tunneta riittävästi. Terveyshaittoja ovat mm. nenän ja kurkun ylähengitioireet sekä hengitysvaikeudet, kuten astma ja yskä. ([Työterveyslaitos 2011, 32–33.](#)) Muita oireita ovat altistuksen aiheuttamat allergiset sairaudet sekä infektiot, kuumeilu ja nivelkivut ([Siikanen 2014, 215](#)).

Rakennuksista otetuista sisäilma- ja materiaalinäytteistä useimmin esiintyvät tavanomaiset mikrobit ovat Penicillium-, Cladosporium- ja Aspergillus-sukuiset sienet ja hiivat. Yleisin sisäilmassa esiintyvä suku on Penicillium-sieni. ([Siikanen 2014, 215](#).) Kosteusvaurioindikaattorina pidetään tietyn sukuisia mikrobeja, joita ei tavallisesta terveestä vaurioitumattomasta rakennuksesta löydy. Nämä mikrobit antavat viitteen siitä onko rakennuksen rakenteissa mahdollisesti kosteusvaurio. Kosteusvaurioindikaattorit voivat olla merkki myös mahdollisesta aiemmasta kosteusvauriosta. Myös tavanomaisia

mikrobeja voidaan pitää kosteusvaurioindikaattoreina, mikäli niitä löytyy otetuista materiaalinäytteistä runsaasti. (Sisäilmayhdistys.fi b.)

Tärkeimmät kosteusvaurioindikaattorit (Valvira.fi):

*Acremonium*  
*aktinomykeetit*  
*Aspergillus fumigatus*  
*Aspergillus ochraceus*  
*Aspergillus penicillioides / Aspergillus restrictus*  
*Aspergillus sydowii*  
*Aspergillus terreus*  
*Aspergillus ustus*  
*Aspergillus versicolor*  
*Chaetomium*  
*Eurotium*  
*Exophiala*  
*Fusarium*  
*Geomyces*  
*Oidiodendron*  
*Paecilomyces*  
*Phialophora sensu lato*  
*Scopulariopsis*  
*Sporobolomyces*  
*Sphaeropsidales*  
*Stachybotrys*  
*Trichoderma*  
*Tritirachium / Engyodontium*  
*Ulocladium*  
*Wallemia*

### 2.2.2 Orgaaniset kaasumaiset epäpuhtaudet, VOC-yhdisteet

VOC-yhdisteiden lähteitä ovat rakenteissa käytetyt rakennusmateriaalit, tekstiilit ja sisustusmateriaalit sekä ihmisten aineenvaihduntatuotteet ja kosmetiikka. Rakennusmateriaaleista haihtuvat orgaaniset yhdisteet voivat olla peräisin esimerkiksi käytetyistä liimoista, kuten sisäilmassa esiintyvä formaldehydi tai jos rakennusmateriaaleissa käytettyjen aineet eivät ole reagoineet keskenään, jolloin ilmaan voi vapautua esimerkiksi styreeniä. (Siikanen 2014, 214.) Sisäilmassa esiintyvät haihtuvat yhdisteet (VOC) voivat aiheuttaa useita erilaisia terveyshaittoja. VOC-yhdisteet voivat myös alentavat viihtyvyyttä aiheuttamalla hajuhaittoja sekä ärsytysoireita. Joidenkin puolihaihtuvien orgaanisten yhdisteiden (SVOC) on todettu aiheuttavan jopa syöpää.

(Siikanen 2014, Rakennusfysiikka, 213.)

VOC-yhdisteitä voidaan tutkia materiaalista otetuista näytepaloista eli bulk-näytteistä, materiaalin pintaemissiosta eli pintapäästöistä, tai diffuutoituvana materiaalin läpi, ja ilmasta. Toimistorakennuksissa VOC-yhdisteiden kokonaispitoisuus eli TVOC-pitoisuus ei saisi ylittää mittauksissa yli 100 µg/m<sup>3</sup>. (Työterveyslaitos).

### 2.2.3 Hiukkaset, kuidut ja pölyt

Sisäilmassa voi esiintyä haitallisia määriä erilaisia kuituja, pölyjä sekä hiukkasia. Lähteinä voivat olla rakennusmateriaalien sementti-, betoni- ja kipsipöly, ääneneristeistä ja eristevilloista peräisin olevat mineraalivillahiukkaset, ulkopuolinen katupöly sekä tupakan savu. Näitä kutsutaan hengitettäväksi hiukkasiksi, PM10, joiden halkaisija on pienempi kuin 10 mikrometriä. Näiden hiukkasten lisäksi on olemassa ns. pienhiukkasia PM2,5, joiden halkaisija on pienempi kuin 2,5 mikrometriä. Näiden hiukkasten lähteet ovat usein rakennusten ulkopuolisia, kuten liikenne. (Ympäristöopas 2016, 65.) Pölyn lähteenä voi sisätiloissa olla esimerkiksi rakennustöiden yhteydessä tai rasitetusta, pinnoittamattomasta betonista irronnut betonipöly. Betonipöly on alkalisuutensa takia hyvin haitallista limakalvoille ja hengitysteille. Betonin sisältämä kvartsipöly voi pitkäaikaisessa altistuksessa aiheuttaa keuhkosairauksia. (Ympäristöopas 2016, 65.)

Sisäilmassa esiintyvät tyypillisimmät mineraalivillakuidut ovat eristeinä käytetyt vuorivilla eli kivivilla, lasivilla ja lasikuidut (Työterveyslaitos 2011, 27). Ajan kuluessa eristeinä käytetyt mineraalivillat saattavat haurastua. Alipaineen seurauksena ulkoseinän lämpöeristeiden haurastuneet ja irronneet mineraalivillakuidut voivat kulkeutua epätiiveyskohtien kautta sisäilmaan. Mineraalivillakuidut voivat olla peräisin myös suojaamattomista akustiikkalevyistä, äänenvaimentimista tai ilmanvaihtolaitteiden rikkoutuneista ääneneristeistä (Hengitysliitto.fi). Mineraalivillakuidut aiheuttavat usein tilan käyttäjille silmien, ihon ja hengitysteiden ärsytystä. Myös kuitujen mahdollista yhteyttä syöpään on tutkittu paljon. Kuitenkin vuonna 2001 kansainvälinen syöpäsäätiö IARC on julkaissut raportin, jossa todetaan, ettei riittävää näyttöä mineraalivillahiukkasten syöpävaarallisuudesta ole saatu. (Työterveyslaitos 2011, 36.)

Sisäilmatutkimuksissa erilaisten pölyjen ja hiukkasten pitoisuuksia ja koostumusta selvitetään elektromikroskoopsilla menetelmillä ja alkuaineanalyysillä. Kuitujen määrää ilmasta voidaan selvittää suodatinnäytteellä tai pölylaskeumanäytteellä eli geeliteippinäytteellä. Hiukkaspitoisuuden selvittämiseksi käytetään hiukkaskeräimiä sekä -mittareita. (Työterveyslaitos 2011, 66.) Sosiaali ja terveysministeriön säätämän asetuksen 545/2015, "Asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista", mukaan teollisten mineraalikulitujen toimenpideraja kahden viikon aikana pinnoille laskeutuneessa pölyssä on 0,2 kuitua/cm<sup>2</sup>. Tuloilmanvaihtokanavan pinnalla mineraalivillakuitupitoisuus on yleensä 10 - 30 kuitua/cm<sup>2</sup>, joista yli 30 kuitua/cm<sup>2</sup> voidaan pitää toimenpiderajana (Työterveyslaitos).

### 3 TIIVIYSTARKASTELUT JA -MITTAUKSET

Tiiviyksmittauksilla suoritettavat rakennusten ilmanpitävyyksmittaukset ovat yleistyneet viime vuosina merkittävästi. Tähän syynä ovat uudet energiamääräykset ja energiatehokkuus, joiden myötä rakennuksista halutaan tehdä yhä tiiviimpiä. Nykyaikainen talo halutaan saada kokonaisuudeksi, jossa energiatehokas ilmanvaihto luo edellytykset hyvälle sisäilmalle ja tiivis vaippa takaa rakenteiden toimivuuden (Paloniitty 2012, 7).

Lähtökohtaisesti vaipparakenteiden ilmatiiveyden varmistaminen on tärkeää neljästä eri syystä.

#### - **Kosteustekninen toimivuus**

Halutaan varmistua, että vaipparakenne toimii kosteusteknisesti oikein. Koska vaipparakenteista tehdään yhä paremmin eristäviä, hallitsemattomat ilmapuodot voivat kuljettaa mukanaan kosteutta konvektiolla, joka kasvattaa rakenteiden home- ja kosteusvaurion riskiä.

#### - **Rakennuksen kokonaisenergian kulutus**

Halutaan varmistua mahdollisista ilmapuodoista, jotta niiden vaikutus energiakulutukseen saadaan minimoitua.

#### - **Asumisviihtyvyys ja sisäilma**

Ilmatiiveyden varmistaminen on tärkeää asumisviihtyvyyden kannalta, koska vuotoilma saattaa aiheuttaa vedontunnetta. Vaipan hyvä ilmanpitävyys parantaa sisäilman laatua, koska mahdolliset epäpuhtaudet, mikrobit, radon, eristeiden mikrokuidut ja muut haitalliset aineet eivät pääse rakenteiden ja liitosten läpi. Vaipan hyvän ilmanpitävyyden ansiosta myöskää kylmä ulkoilma, eikä kostea sisäilma pääse virtaamaan rakenteisiin. Yhdessä nämä ilmavirtaukset voivat muodostaa edulliset olosuhteet rakennemateriaalien rajapinnoissa sekä kosteus- että homevaurioille. (Paloniitty 2012, 7.)

#### - **Ilmaääneneristävyys**

Hyvällä rakennuksen vaipan ilmanpitävyydellä voi olla myönteinen vaikutus myös ilmaääneneristävyyden parantamisessa (Ympäristöopas 2016, 118).

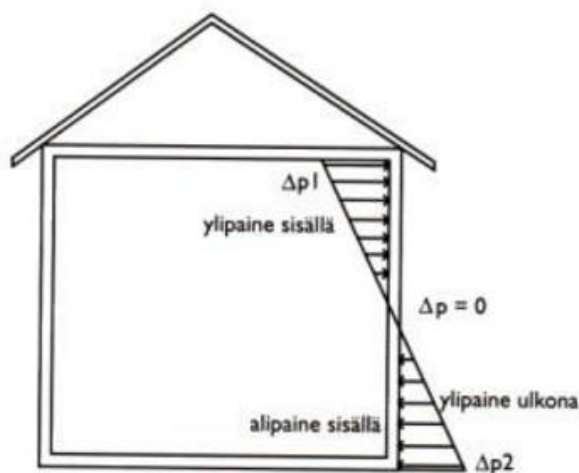
Tässä opinnäytetyössä tehtävät tiivystarkastelut suoritetaan korjausrakentamisen näkökulmasta, jossa lähtökohtana on laadukas sisäilma. Korjausrakentamisessa tiiviyksmittaukset ja niiden yhteydessä tehtävät muut tutkimukset, kuten lämpökuvaus, ovat osa laadunvarmistusta ja niitä käytetään paikantamaan mahdolliset ilmapuodot sekä epäpuhtauksien kulkeutumisreitien havainnoimiseen. Näiden tietojen pohjalta laaditaan tiivistyskorjaustoimenpiteet (Paloniitty 2012, 16).

Tiivyskorjaukset ovat opinnäytetyössä rajattu vaipan sisäpinnan rakenteiden ja liitosten vuotokohtien tiivistykseen. Kyseisessä kohteessa hallitsemattomat ilmavirtaukset ovat johtuneet pääasiassa liitoskohtien puutteellisesta tiivistyksestä. Näin ollen myös tiiviyksmittaukset ja menetelmät painottuvat vaipan yli tapahtuvien ilmavirtausten paikantamiseen ja korjausten jälkeen tiivistysten laadunvarmistukseen.

### 3.1 Paine-ero

Ilman siirtyminen rakenteiden vuotokohdista sisäilmaan johtuu ulko- ja sisäilman välillä vallitsevasta paine-erosta. Paine-eroon vaikuttavat tuuli, ilmanvaihto sekä lämpötilaerot eli savupiippuvaikutus. (RIL 107-2012 Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet.)

Savupiippuvaikutus on ilmiö, jossa kevyt lämmin ilma nousee tiheämpää kylmää ilmassa ylemmäs. Tasatiiviissä rakennuksessa kylmän ulkoilman ja lämpimän sisäilman välinen paine-ero aiheuttaa rakennuksena alaosiin alipaineen ja yläosiin ylipaineen ulkoilmaan verrattuna. Rakennuksen kohdalla, jossa alipaine vaihtuu ylipaineeksi, kutsutaan neutraaliakseliksi. Neutraaliakselin kohdalla vaipan sisä- ja ulkoilman välinen paine-ero on 0 Pa. Savupiippuvaikutuksen merkitys korostuu erityisesti talvella, jolloin sisä- ja ulkolämpötilojen ero voi olla suurikin. Jos lämpötilaero nousee suureksi, voi rakennuksen sisäpuolella vallita suurikin ylipaine, joka saattaa pahimmassa tapauksessa kumota ilmanvaihdosta aiheutuvat alipaineen. ([Sisailmayhdistys.fi](http://Sisailmayhdistys.fi) c.)

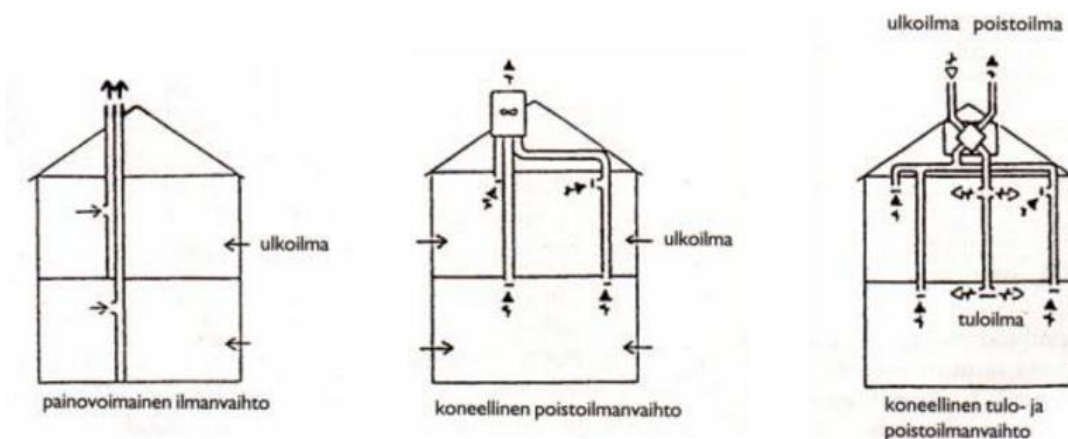


Kuva 1. Tasatiiviin rakennuksen ulkoseinän lämpötilaerosta johtuvien paineiden jakauma ([Sisailmayhdistys.fi](http://Sisailmayhdistys.fi) c)

Myös tuuli vaikuttaa vaipan paine-eroihin. Tuulen vaikutuksesta tuulen puoleisella seinällä syntyy alipaine ja suojan puoleisella sivulla ylipaine, joka johtuu tuulen aiheuttamasta imuvaikutuksesta. (RIL 107-2012 Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet). Tuulen aiheuttamaan paineen suuruuteen vaikuttavat tuulen suunnan ja nopeuden lisäksi rakennuksen geometria. ([Sisailmayhdistys.fi](http://Sisailmayhdistys.fi) c.)

Ilman paine-eroon voidaan vaikuttaa merkittävästi ilmanvaihdolla. Ilmanvaihdon toteutusmalleja ovat painovoimainen, koneellinen poisto- ja koneellinen poisto- ja tuloilmanvaihto. Painovoimaisen ilmanvaihdon toimivuus perustuu savupiippuvaikutukseen, jossa kylmä ulkoilma virtaa tuloilmaventtiilien tai vaipan epätiivelyskohtien kautta ja lämmennyt ilma nousee ylöspäin ja poistuu poistoventtiilien kautta. ([Paloniitty 2012, 11–12.](#)) Ilmanvaihtoa voidaan tehostaa käyttämällä koneellista poistoilmanvaihtoa. Koneellinen ilmanvaihto on tehokas ja hyödyllinen esimerkiksi lämpimällä ja tuulettomalla säällä, kun riittävää luonnollista paine-eroa ei ole. Koneellisessa poistoilmanvaihdossa likainen sisäilma puhalletaan koneellisesti poistoilmanvaihdon kautta ulkoilmaan. Koneellisessa tulo- ja poistoilmanvaihdossa, sekä tulo- että poistoilmanvaihto on toteutettu koneellisesti. Koneellinen tulo- ja

poistoilmanvaihto on säätelynsä vuoksi tehokkain tapa järjestää ilmanvaihto. (Paloniitty 2012, 11–12.)



Kuva 2. Ilmanvaihtojärjestelmien toimintaperiaate (Sisäilmayhdistys.fi c)

Rakenteiden tiivistäminen ja ilmatiiveyden parantaminen saattavat muuttaa rakennuksen painesuhteita. Tällöin on tärkeää varmistaa hallitun korvausilman määrä ja säätää tulo- ja poistoilmamäärä muuttuneiden painesuhteiden mukaisesti. (Ympäristöopas 2016, 119.) Kosteusteknisistä syistä ilmanvaihto mitoitetaan aina ulkoilmaan nähden hieman alipaineiseksi. Koneellisessa ilmanvaihtojärjestelmässä tämä on huomioitu siten, että poistoilmamäärä on tuloilmamäärää suurempi. (Paloniitty 2006, 28.) Tiiveys vaikuttaa merkittävästi koneellisen ilmanvaihdon tehokkuuteen ja mitoittamiseen. Mitä tiiviimmäksi vaippa saadaan, sitä tarkemmaksi voidaan säätää koneellista ilmanvaihtojärjestelmää. (Paloniitty 2012, 12.) Toisaalta, jos ilmanvaihtojärjestelmä on säädetty väärin, se saattaa pahentaa mahdollisten vaipan ilmapuotojen kautta tulevien haitta-aineiden kulkeutumista sisäilmaan.

Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa D2 (RakMK D2-2012) on määrätty, että ilmanvaihtojärjestelmää suunniteltaessa on otettava huomioon, ettei ilmanvaihtojärjestelmä aiheuta rakennuksille rasitusta, esimerkiksi kosteus- tai vesivahinkoja. Tämä tarkoittaa rakennusteknisesti sitä, ettei ilmanvaihto saa aiheuttaa sisätiloihin sitä rasittavaa ylipainetta. Koneellisessa tulo- ja poistoilmanvaihdossa tulisi pyrkiä paine-eroon, joka on suuruudeltaan 0...-2 Pascalia. (Ympäristöopas 2016, 121.)



## 3.2 Paine-eromittaus

Paine-eromittaukseen voidaan käyttää, kun tutkitaan tilojen välisiä sisäisiä painesuhteita esimerkiksi rakenteiden tai huoneistojen välillä. Mittauksilla saadaan tietoa myös ulko- ja sisäpuolisista painesuhteista. (Sisäilmäyhdistys.fi d). Paine-eromittauksella voidaan varmistaa, ettei ilmanvaihtojärjestelmä aiheuta rakennukseen liikaa yli- tai alipainetta ja toimii suunnitellun käyttötarkoituksen mukaisesti. (Ympäristöopas 2016, 34). Mittauksilla saadut tiedot ilmavirtojen aiheuttamasta paine-erosta ovat tärkeä osa tiivistyskorjaussuunnittelua, koska niitä voidaan käyttää suunnittelun lähtötietona. (Sisäilmäyhdistys.fi d.)

Paine-eromittaus voidaan tehdä joko nestemanometreillä tai sähköisillä paine-eromittareilla. Mittaus suoritetaan joko jatkuva tai hetkellisenä mittauksena. Jos mittaus tehdään hetkellisenä, on tärkeää ottaa huomioon mittausolosuhteet, kuten tuuli, ja niiden vaikutus mittaustuloksiin. Kun mittaus tehdään pitkäaikaismittauksilla, saadaan kattavin kuvaus ja mittaustulos paine-erosta. (Sisäilmäyhdistys.fi d.)

## 3.3 Ilmavuotokohdat ja niiden paikantaminen

Rakenteiden ilmavuotojen ja epäpuhtauksien kulkeutumisen tutkimiseen käytetyt menetelmät ovat merkkiainekoe, lämpökuvaus sekä merkki- ja puhdassavututkimukset. Tässä opinnäytetyössä käytetyt mittaustavat ovat merkkiainekoe ja lämpökuvaus.

Merkkisavu- ja puhdassavututkimuksia voidaan käyttää aistinvaraisten tutkimusten tukena. Merkkisavututkimuksessa savupullolla tai -kynällä puhalletaan savua tutkittavaan kohtaan määrittämään ilmavirtausten suuntaa ja suuruutta.

### 3.3.1 Merkkiainekoe

Merkkiainekokeen tutkimusmenetelmä perustuu mittaustapaan, jossa merkkikaasua ja sitä havaitsevaa mittaustaitetta käytetään selvittäessä rakenteen läpi ja rakenteen sisällä tapahtuvia ilmavirtauksia. Kokeella saadaan tietoa mahdollisista rakenteiden liitosten tiiviiden puutteista sekä vuotoilmojen reiteistä ja suuruudesta tarkkuudella, jotka eivät muilla menetelmillä ole mahdollisia. (RT 14-11197. Rakenteiden ilmatiiveyden tarkastelu merkkiainekokein.) Merkkiainekokeita voidaan käyttää mm. sisäilmaongelmien selvittämisessä, korjaussuunnittelun lähtötietona sekä laadunvarmistuksessa korjaus- ja uudisrakentamisessa.

Merkkiaineiden suorittamiseen on vasta hiljattain tullut Rakennustieto Oy:n julkaisema RT-kortti, RT 14-11197, jonka tavoitteena on vakioida merkkiainekoe suoritustapana. RT-kortin ansiosta merkkiainekokeiden avulla saadaan luotettavampaa tietoa, joka perustuu yhtenäiselle suoritustavalle. Näin ollen saadut tulokset ovat myös vertailukelpoisempia, kun vertaillaan keskenään eri kohteita, kokeen suorittajia tai rakenteita. (RT 14-11197. Rakenteiden ilmatiiveyden tarkastelu merkkiainekokein.)

Merkkiainekokeessa yleisimmin käytetyt kaasut ovat typpi-vety-seos (5% H<sub>2</sub> + 95% N<sub>2</sub>) ja rikkiheksafluoridi (SF<sub>6</sub>). Myös muita kaasuja esimerkiksi ilokaasua voidaan käyttää merkkiainemittauksissa. Typpi-vety-seoksessa havainnoitavana aineena on vety. Tyypeä käytetään laimentamaan vety käytöturvalliseksi syttymisrajan alapuolelle. Merkkiainekokeissa käytetty vety on normaaleissa käyttöolosuhteissa turvallinen ja myrkytön kaasu. Koska kaasuseos on kevyt ja leviää nopeasti, se myös kulkeutuu vuotokohdista suurella nopeudella ja haihtuu nopeasti. Nämä tekijät tulee ottaa huomioon merkkiainekokeen järjestelyissä ja syöttöreikien sijoittelussa. Rikkiheksafluoridi on voimakas kasvihuonekaasu, jota ei esiinny luonnossa. Merkkiainekokeissa käytettynä sen pitoisuus on kuitenkin niin pieni, ettei se aiheuta merkittävää haittaa. Kaasuseoksen hengittämistä tulee kuitenkin välttää. Rikkiheksafluoridi on ilmaa raskaampi kaasu, mikä tulee ottaa huomioon merkkiainekokeiden järjestelyssä sekä riittävänä paine-erona ja kaasun tasaantumisaikana mitattavaan rakenteeseen. (RT 14-11197. Rakenteiden ilmatiiveyden tarkastelu merkkiainekokein.)

Myös merkkiainekaasun havaitsemiseen käytettävät mittauslaitteet ovat yleisimpiin kaasuihin typpi-vety-seokseen sekä rikkiheksafluoridiin reagoivia mittauslaitteita. Merkkiainemittauksissa käytettävän mittauslaitteen tulee aina soveltua mitattavaan merkkiainekaasuun ja olla mahdollisimman herkkä. Mittauslaitteen herkkyys tulee olla vähintään 1ppm (parts per million). Muita mittauslaitteelta vaadittuja ominaisuuksia ovat nopea reagointi muuttuviin pitoisuuksiin ja havaintoherkkyyden muuttumattomuus toistuvien mittausten välillä. Mittauslaite ilmoittaa vuotokohdat joko nousevalla merkkiänellä tai näyttölaitteen lukuarvona. (RT 14-11197. Rakenteiden ilmatiiveyden tarkastelu merkkiainekokein.)

Merkkiainekoe on merkittävä tutkimusmenetelmä kuntotutkimuksessa, koska sen paikantamien ilma-voitoreittien kautta saadaan tietoa sisäilmaan tulevien orgaanisten yhdisteiden eli mikrobien ja VOC-yhdisteiden sekä muiden haitta-aineiden mahdollisista kulkureiteistä. Kuntotutkimuksissa merkkiainekoe suoritetaan tavallisesti normaaleissa käyttöolosuhteissa, jotta rakenteen ilmapuodoista saadaan mahdollisimman todenmukainen kuva. Kuntotutkimuksissa käytetyt merkkiainekokeet antavat lähtötiedot korjaustoimenpiteisiin, joissa tavoitteena on parempi laadukas sisäilma. (RT 14-11197. Rakenteiden ilmatiiveyden tarkastelu merkkiainekokein.)

Merkkiainekoetta voidaan käyttää laadunvarmistuksessa sekä korjaus- että uudiskohteissa. Laadunvarmistuksessa käytetään yleensä tarkasteltavan rakenteen yli paine-eroa, joka on suuruudeltaan -10...-15 Pa. Alipaineella halutaan varmistaa, että olosuhteet olisivat kokeen suorituskerroilla mahdollisimman samanlaiset sekä estää esimerkiksi tuulesta mahdollisesti aiheuvan mittauksiin vaikuttavan paine-eron vaihtelun. Kokeen aikana tilan alipaineen pysyminen tasaisena varmistetaan paine-eromittarilla. Laadunvarmistus olisi hyvä tehdä ennen pintamateriaalin asennusta, jotta mahdollisten tiivistysten virheet voidaan tarkasti havaita ja korjata. Laadunvarmistusten yhteydessä merkkiainekokeella löydetty puutteet ja vuotokohdat merkitään esimerkiksi värillisellä teipillä. Laadunvarmistuksen jälkeen löydetty puutteet korjataan. Tarvittaessa laadunvarmistuskokeet toistetaan, kunnes vuotokohtia ei enää löydetä. (RT 14-11197. Rakenteiden ilmatiiveyden tarkastelu merkkiainekokein.)

### 3.3.2 Lämpökuvaus

Lämpökuvaus on menetelmä, jolla voidaan rakennetta rikkomatta saada tietoa rakenteiden sekä rakennusmaterialien laadusta, kunnosta ja toimivuudesta. Se soveltuu käytettäväksi uudisrakennuskohteissa laadunvalvonnassa ja vanhojen rakennusten kuntotutkimuksissa esimerkiksi tiiviysmittausten yhteydessä. (Paloniitty, 2006, 7.) Lämpökuvauksella on mahdollista selvittää rakennusmateriaalien ominaisuuksia, kuten rakennusten lämpöteknistä toimivuutta, viihtyvyyttä ja ilmanpitävyyttä. Lisäksi lämpökameralla on mahdollista saada tietoa mahdollisista kosteus- ja homevaurioista sekä talotekniikan puutteista ja vioista. (Paloniitty, 2006, 11.)

Ennen lämpökuvauksen aloittamista tulee kuvaajan olla selvittänyt kuvauksen kannalta oleelliset tiedot, joita ovat olosuhdetiedot ja rakennuksen tiedot. Kuvaukseen liittyvät tärkeät olosuhdetiedot ovat ulkoilman lämpötila, tuulen voimakkuus, auringonaiheuttama lämpösäteily (eli onko ilma aurinkoinen, pilvinen vai puolipilvinen), sisälämpötila asteen tarkkuudella sekä painesuhteet 1 Pa:n tarkkuudella. Rakennuksen tietoihin kuuluvat selvitykset olemassa olevista rakenteista, rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmästä ja lämmitys- ja lämmönjakojärjestelmästä. Muita kuvauksen aikana ylös kirjattavia ja selvitettäviä tietoja ovat pinnan emissiokerroin ja kuvauksetäisyys. Lisäksi on tärkeää muistaa kalibroida lämpökamera sekä kuvauksen aloituksen yhteydessä, että lopussa. Kalibrointi tehdään vertaamalla kameran mittaamaa lämpötilaa samassa pisteessä olevaan pintakosteusmittarilla mitattavaan lämpötilaan. Kuvaus tehdään siten, että koko rakennus ja tilat kuvataan järjestyksessä oikealta vasemmalle eli myötäpäivään. (Paloniitty 2006, 50–53.)

Lämpötilaindeksi on suure, jolla voidaan arvioida rakennuksen vaipparakenteiden lämpöteknistä toimivuutta. Lämpöindeksiä käyttämällä voidaan arvioida pintalämpötiloja tilanteessa, kun lämpötilojen mittauksia ei voida tehdä  $-5\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ :n ulkolämpötilassa tai  $20 \pm 1\text{ °C}$ :n sisälämpötilassa. (RT 14-11239. Rakennuksen lämpökuvaus.)

Lämpötilaindeksi lasketaan kaavasta

$$TI = (T_{sp} - T_o) / (T_i - T_o) \times 100[\%], \quad (1)$$

jossa

TI = lämpötilaindeksi

$T_{sp}$  = sisäpinnan lämpötila (°C)

$T_i$  = sisäilman lämpötila (°C)

$T_o$  = ulkoilman lämpötila (°C).

(RT 14-11239. Rakennuksen lämpökuvaus.)

Kun keskimääräinen alipaine ylittää 5 Pa tulee alipaineisuus ottaa huomioon paine-erokorjauksena lämpötilaindeksiä laskiessa. Tällöin lämpötilaindeksiä nostetaan 0,5 yksikköä jokaista 1 Pa kohden välillä -6...-15 Pa. Jos paine-ero on suurempi kuin -16 Pa, ei lämpötilaindeksiä ilmoiteta. (RT 14-11239. Rakennuksen lämpökuvaus.)

Myös ilmapuotokohtien paikantamiseen käytettäessä lämpökuvauksessa on tärkeää olla perillä vallitsevista painesuhteista. Ilmapuotokohtia paikantaessa on rakennusten yli vallittava paine-ero. Kuvaus tapahtuu aina alipaineistetulta puolelta. Kun ilmanvaihto on toteutettu koneellisesti, vallitsee sisätiloissa automaattisesti alipaine, jonka ansiosta vuotokohdat näkyvät sisäpuolella, mikäli ilmanvaihtojärjestelmä on säädetty oikein. Ilmapuotojen paikantamisessa rakennuksen kuvattava tila kuvataan ensin normaalipainesuhteiden vallitessa, jonka jälkeen kuvatut kohdat kuvataan uudelleen -50 Pa:n alipaineessa. Alipaineessa mahdolliset kylmäsilat on mahdollista erottaa ilmapuodoista. (Paloniitty 2006, 58.) Tilat alipaineistetaan -50 Pa alipaineiseksi käyttäen tiiviysmittauksissa käytettävää tiiviysmittauslaitteistoa, josta käytetään myös termiä *Blower Door Systems*. Tiiviysmittauslaitteistoon kuuluvat ilmamäärämittauksella varustettu puhallin, paine-eromittausyksikkö, ohjausyksikkö, paine-eroletkut, virtajohdot, ovi- tai ikkuna-asennuskehikko ja lakana. (Paloniitty 2012, 30.)

Lämpökuvauksia varten on olemassa seuraavia määräyksiä ja ohjeita:

- (5/2015) Asumisterveysasetus 545/2015
- (1/2016) Oppikirja: Lämpökuvaus rakentamisessa
- (3/2016) Valviran julkaisema Asumisterveysasetuksen soveltamisohje
- (11/2016) RT 14-11239 Rakennuksen lämpökuvaus

Kyseiset ohjeet ja määräykset on viime aikoina päivitetty. Päivitysten ja muutosten syinä ovat olleet lämpökameramallien kehittyminen ja yleistyminen, lyhentyneet pakkasjaksot, lämmöneristystason parantuminen, asumisterveysasetusten vaatimat tarkemmat pintalämpötilat ja ilmatiiviiden parantuminen (Paloniitty).

## 4 TIIVISTYSKORJAUKSET

Tiivistyskorjausten ensisijainen tavoite on estää hallitsemattomien ilmavirtausten kulkeutuminen rakenteissa tai rakenteiden liitosten läpi sisäilmaan ja samalla estää epäpuhtauksien kulku ilmavirtausten mukana. Rakenteiden liitosten tiivistämisellä estetään tehokkaasti myös lämmön ja kosteuden konvektio. Kun rakenne on tiivistetty oikein, estetään, ettei korvausilmaa oteta vaipan vuotokohtien kautta.

Theseuksessa julkaistussa opinnäytetyössä (Sobott 2014) kerrotaan, että tiiviyskorjaus voidaan toteuttaa joko pääasiallisena korjaustoimenpiteenä, siirtävänä korjaustoimenpiteenä tai peruskorjauksen yhteydessä. Siirtävässä korjaustoimenpiteessä tavoitteena on, että rakennuksen käyttöolosuhteet ovat sillä tasolla, että kohdetta voidaan käyttää aina kohteen peruskorjaukseen saakka. Kun tiivistyskorjaus on varsinainen toimenpide, on tarkoituksena tukkia ja tiivistää ilmavuodot, ettei ilma mahdollisesti vaurioituneista rakenteista pääse sisäilmaan. Vaurioitunut rakenne jätetään paikalleen. Peruskorjauksen yhteydessä tehtävässä tiivistyskorjauksessa vaurioituneiden rakenteiden korjauksen ja uusimisen lisäksi myös rakenteiden ilmavuodot katkaistaan tiivistämällä.

### 4.1 Tiivistyskorjauksessa käytettävät materiaalit

Theseuksessa julkaistussa opinnäytetyössä (Laine 2014) kerrotaan, ettei tiiveyskorjauksissa käytettäville materiaaleille ole olemassa yhtenäisiä viranomaismääräyksiä. Materiaaleille on kuitenkin olemassa ominaisuuksia koskevia standardeja.

Tiivistyskorjauksissa käytettäville materiaalit tulee aina valita käyttökohteen mukaisesti ja suunnitellusti. Käytettyjen materiaalejen tulee olla käyttötarkoitukseen testattuja, elastisia ja hyvän muodonmuutoskyvyn omaavia, pitkäaikaiskestäviä sekä vähäpäästöisiä M1-luokan materiaaleja.

#### **M1-luokitus**

Rakennusmateriaalit jaetaan luokkiin niiden aiheuttamien haitallisten emissioiden eli päästöjen perusteella. Rakennusmateriaalien päästöluokat jaetaan kolmeen luokkaan M1, M2 ja M3, joista vaativin on M1. Rakennusmateriaaleista aiheutuvia haitallisia päästöjä ovat mm. VOC-yhdisteet, ammoniakki, formaldehydi sekä hajuhaitat. M1-luokituksen materiaalit on testattu puolueettomassa laboratoriossa ja materiaali on täyttänyt sille asetetut vaatimukset neljän viikon testausolosuhteissa. (Rakennustieto.fi)

Taulukko 5. M1-luokituksen emissio- eli päästövaatimukset (Rakennustieto.fi)

Tutkittavat ominaisuudet	M1 [mg/m <sup>2</sup> h]	M 2 [mg/m <sup>2</sup> h]
Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (TVOC) kokonaisemissio. Yhdisteistä tunnistettava vähintään 70%.	< 0,2	< 0,4
Formaldehydin (HCOH) emissio	< 0,05	< 0,125
Ammoniakin (NH <sub>3</sub> ) emissio	< 0,03	< 0,06
(EC) No 1272/2008 luokittelun mukaisten luokkaan 1A ja 1B kuuluvien karsinogeenisten aineiden emissio <sup>1*</sup>	< 0,005	< 0,005
Haju (epämiellyttävien havaintojen määrä alle 15%) <sup>2*</sup>	ei haise	ei haise

1\* ei koske formaldehydiä

2\* Aistinvaraisen arvioinnin tulos on oltava vähintään +0,0

### Vedeneristeet

Märkätilojen vedeneristykseen käytettäviä levitettäviä vedeneristeitä voidaan käyttää myös tiivistyskorjauksissa. Vedeneristeitä on käytetty tiivistyskorjauksissa noin 30 vuoden ajan ja ne ovat hyvin testattuja ja sertifikoituja tuotteita. Sertifikoinnista vastaa Teknologian tutkimuskeskus VTT. Sisäilmakorjauksissa käytettäessä vedeneristeiden käyttöikä on vähintään sama kuin märkätiloissa käytettäessä johtuen huomattavasti pienemmistä rasituksista. (Laine 2014, 48.) Esimerkiksi Ardexin vedeneriste Ardex 8+9 on vähäpäästöinen ja kaasutiivis M1-luokan vedeneriste, jota voidaan käyttää sisäilmakorjauksissa tiivistämiseen esimerkiksi ikkunan ja seinän välisissä liitoksissa.

### Saumanauhat ja teipit

Tiivistykseen käytettävät teipit ovat tiivistystarkoitukseen testattuja ja soveltuvia erikoisteippejä. Teipit ovat taipuisia ja niissä on hyvä itseliimautuva tartuntapinta, joko yksi- tai kaksipuolinen. Tiivistykseen käytettäviä teippejä ovat kumimassaiset teipit, höyrynsulkuteipit, sekä butyyli-teipit. (Laine 2014, 50–51.) Teippien käytössä tulee huolehtia alustan puhtaudesta ja tasaisuudesta riittävän tartunnan varmistamiseksi. Butyyli nauhaa voidaan käyttää lisäksi osana vedeneristeiden kanssa, jolloin tartuntana voidaan käyttää, joko butyyli nauhan liimapintaa tai vedeneristettä.

## Liima-tiivistemassat ja vaahdot

Tiivistyskorjauksissa käytetyiltä tiiviste- ja liimamassoilta vaaditaan joustavuutta, kutistumattomuutta, hyvää tarttuvuutta ja vähäpäästöisyyttä. Myös UV-valonkestävyys on tärkeä ominaisuus esimerkiksi ikkunan karmin ja seinän välisissä liitoksissa. Tässä opinnäytetyössä käsiteltävässä kohteessa tiivistykseen käytettiin Kiillon Kiiltofix Masa –liima-tiivistemassaa, joka soveltuu käytettäväksi useimpien eri materiaalien välillä.

Tiivistyksissä käytetyt polyuretaanivaahdot ovat erikoistuotteita. Johtuen liitoskohtien mahdollisista liikkeistä on suositeltavampaa käyttää joustavia polyuretaanivaahtoja, jolla estetään mahdollinen liikkeistä aiheutuva ratkeaminen. Polyuretaanivaahdolla tehtyä tiivistystä voidaan pitää täysin tiiviinä vasta leikkaamattomana ja useaan kertaan pursotettuna. Polyuretaania voidaan käyttää pohjana varsinaiselle tiivistysmateriaalille. (Laine 2014, 49–50.)

## Pinnoitteet

Tiivistyskorjauksissa yleisimmin käytetyt pinnoitteet ovat epoksinpinnoitteita. Pinnoitteita käytetään tiivistyskorjauksissa liitosten ja saumojen ilmapuotitiivistyksen lisäksi pinnoilla parantamaan ilmanpitävyyttä ja haitta-aineiden kulkeutumista vaipan sisäpuolisten pintakerrosten läpi diffuusiolla, eli ns. kapselointituotteena. Haitta-aineiden kapseloinnilla tarkoitetaan tuotteita, joilla pyritään estämään, sekä haitta-aineiden kulkeutuminen, että ilmapuodot rakenteiden läpi. Pinnoitteet sopivat erinomaisesti saumojen tiivistykseen johtuen erinomaisesta joustavuudesta ja kutistumattomuudesta.

Esimerkiksi TKR-pinnoitemassa on pinnoite, jota voidaan käyttää haitta-aineiden kapselointiin ja tiivistyskorjauksiin. Sitä voidaan käyttää joko vedeneristeenä tai valmiina pintana. (Tkr.fi).

### 4.2 Kohteen tiivistyskorjausten toteutus ja mallihuone

Kohteeseen tehtiin 18.1.2017 ennalta sovittujen suunnitelmien mukaisesti rakenteiden avaus sekä mallikorjaus. Rakenneavausten tavoitteena oli saada selville ulkoseinän sekä ulkoseinän ja ikkunan välisten liitosten tarkka rakenne.

Mallikorjaus on laadunvarmistustapa, jonka ensisijainen tavoite on saada selville suunniteltujen korjaustapojen ja materiaalejen soveltuvuus kyseiseen kohteeseen. Mallikorjauksen kohteena oleva huone toimii lähtökohtana muiden toimistotilan huoneistojen tiiveyskorjauksille.

Tiivistyskorjaukset toteutettiin LIITE 2 tiivistyskorjaustyöselostuksen mukaisesti. Työt alkoivat huoneen suojauksella, jossa pinnat suojattiin, huone alipaineistettiin ja ilmanvaihtoventtiilit suojattiin sekä tukittiin töiden ajaksi. Huoneen suojauksessa käytettiin staattista itsekiinnittyvää Grip-N-Guard-suojamuovia. Suojamuovi on hyödyllinen suojaratkaisu, koska se sekä suojaa pintoja, että imee itseensä haitallista remonttipölyä. Lisäksi huone alipaineistettiin käyttämällä alipainepuhallinta, jonka avulla estettiin remontin aikaisen pölyn siirtyminen muihin tiloihin. Alipainepuhaltimen poistoputki ohjattiin ikkunan kautta ulos.

#### 4.3 Korjausten jälkeiset mittaukset ja laadunvarmistus

Kohteeseen tehtiin torstaina 16.3.2017 laadunvarmistus merkkiainekokeella, jonka tarkoituksena oli tutkia tiivistyskorjausten onnistuminen mallihuoneessa. Merkkiainekokeessa merkkiaineena käytettiin typpi-vety (5% H<sub>2</sub> + 95% N<sub>2</sub>) kaasua ja kaasunilmaisimena Adixen XRS9012 Hydrogen Leak Detector -kaasunilmaisinlaitetta.



Kuva 12. Merkkiainekoe vuodonhakulaite, Adixen 9012 XRS (Passi 2017-03-16)





Kuva 13. Merkkiainekokeessa käytetty kaasu typpi-vety-seos (Passi 2017-03-16)

## 5 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINNAT

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia lähtötietojen perusteella, kuinka kohteen sisäilmaa voitaisiin parantaa tiivistyskorjauksilla. Kohteeseen tehtyjen laajojen tutkimusten perusteella suurimman ongelman toimistotilojen sisäilmaan aiheuttivat epätiiveyskohdista sisäilmaan johtuvat ilmavirtaukset ja niiden mukana tulevat epäpuhtaudet, pääasiassa mineraalivillakuidut sekä ulkopuoliset hiukkaset, kuten esimerkiksi katupöly. Myös yläpohjassa havaitut mineraalivillalla tukitut reiät ovat olleet tiiveyden ja sisäilman kannalta haitallisia. Tutkimuksissa oli tärkeää saada tietoa erityisesti mahdollisten kosteusvaurioiden ja mikrobien esiintyvyydestä, jotta voitiin varmistaa, ettei tiivistyskorjauksilla ohiteta mahdollista vauriota ja pahenna mahdollisten vaurioiden laajuutta entisestään.

Syksyllä 2016 tehtyjen tutkimusten jälkeen ilmanvaihtoa on tehostettu ja huollettu. Ilmanvaihdon säädöllä on ratkaiseva merkitys paine-erosuhteisiin. Lisäksi ilmanvaihdon huollon yhteydessä tehdyt puhdistustoimenpiteet vähentävät ilmanvaihdon vaikutuksesta leviäviä epäpuhtauksia, kuten pölyä. Yhdessä tiivistyskorjausten kanssa nämä toimenpiteet tulevat parantamaan toimistorakennuksen sisäilmaa. Hyvä tiivis rakenne estää tilojen ulkopuolisten haittojen kulkeutumisen ja hyvä ilmanvaihto tehostaa tilan ilmanvaihtuvuutta ja puhtautta entisestään.

Ottaen huomioon tiukka aikataulu tutkimukset ja korjaukset onnistuivat hyvin. Osa suunnitelluista mittauksista kuitenkin jäi tekemättä. Näin ollen opinnäytetyön kannalta mahdollinen jatkoselvitys voisi esimerkiksi olla, kuinka paljon ilmanvaihdon säädöllä ja tiivistyskorjauksilla on voitu vaikuttaa itse rakennuksen ilmanpitävyyteen. Tässä tapauksessa varsinaiset ilmanpitävyyden tiiveysmittaukset olisi suoritettu ennen tiivistyskorjaustoimenpiteitä ja ilmanvaihdon säätöä, ilmanvaihdon tehostamisen ja huollon jälkeen sekä lopulta tiivistyskorjausten ja ilmanvaihdon huoltotoimenpiteiden jälkeisenä mittauksena. Näin olisi voinut vertailla ilmanvaihdon huoltotoimenpiteiden vaikutusta sekä tiivistyskorjausten vaikutusta itse lähtötilanteeseen.

Opinnäytetyö oli opettavainen kokemus siitä, kuinka tiivistyskorjauksissa koko rakennus tulee ottaa huomioon kokonaisuutena. Vaikka opinnäytetyön alue oli rajattu pääasiassa toimistorakennuksen tiettyyn kerrokseen ja tilaan ei mahdollisia muiden tilojen ongelmia voinut siitä huolimatta olla ottamatta huomioon. Lisäksi tiivistyskorjauksissa ei riitä, että kiinnitetään vain huomiota mahdollisiin epätiiveyskohtiin vaan tulee ymmärtää ilmanvaihdon merkitys sekä mahdolliset haitta-aine-esiintymät, kosteusvauriot ja mikrobit.

## LÄHTEET

Hengitysliitto.fi a [verkkoaineisto]. [viitattu 23.1.2017]. Saatavissa: <http://www.hengitysliitto.fi/>  
Polku: hengitysliitto.fi/fi. Sisäilma. Sisäilman hiukkasmaiset epäpuhtaudet.

Hengitysliitto.fi b [verkkoaineisto]. [viitattu 23.1.2017]. Saatavissa: <http://www.hengitysliitto.fi/>  
Polku: hengitysliitto.fi/fi. Sisäilma. Sisäilman hiukkasmaiset epäpuhtaudet. Mineraalivillakuidut.

LAINEN, Katariina 2014. Tiiveystarkastelut ja tiivistyskorjaukset toimisto- ja palvelurakennuksiin. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Ylempi AMK. Korjausrakentamisen koulutusohjelma. Opinnäytetyö. [viitattu 2017-03-16]. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2014112416476>

PALONIITTY, Sauli. 2006. Rakennusten Lämpökuvaus. Helsinki: Rakennusteollisuuden Kustannus RTK Oy.

PALONIITTY, Sauli. 2012. Rakennusten tiiviysmittaus. Helsinki: Suomen Rakennusmedia Oy.

Paloniitty. Uudistuvat ohjeet rakennuksen lämpökuvaukseen [verkkoaineisto]. [Viitattu 2017-05-06]  
Saatavissa: <http://paloniitty.fi/files/Uudistuneet%20lämpökuvausohjeet%20Heureka%202.2.2017%20.pdf>

Rakennustieto.fi [verkkoaineisto]. [viitattu 2017-03-26] Saatavissa: <http://www.rakennustieto.fi/>  
Polku: Rakennustieto.fi. Rakennustieto. Rakennusmateriaalien paastoluokitus. M1-vaatimukset ja luokiteltujen tuotteiden käyttö.

RAKENTEIDEN ILMATIIVEYDEN TARKASTELU MERKKIAINEKOKEIN. RT 14-11197. [online]. Helsinki: Rakennustieto [viitattu 2017-02-13] Saatavissa: <https://www.rakennustieto.fi/kortistot/rt/kortit/11197.html.stx>

RAKENNUKSEN LÄMPÖKUVAUS. RT 14-11239. [online]. Helsinki: Rakennustieto [Viitattu 2017-02-14] Saatavissa: <https://www.rakennustieto-fi.ezproxy.savonia.fi/kortistot/tuotteet/113910.html.stx>

SIIKANEN, Unto. 2014. Rakennusfysiikka, Perusteet ja sovelluksia. Helsinki: Rakennustieto Oy.

Sirate.fi [verkkoaineisto]. [viitattu 2017-01-21] Saatavissa: <http://www.sirate.fi>

Sisäilmayhdistys.fi a [verkkoaineisto]. [viitattu 2017-02-24] Saatavissa: <http://www.sisailmayhdistys.fi/> Polku: Sisäilmayhdistys.fi. Terveelliset tilat. Kosteusvauriot. Mikrobit. Mikrobikasvun edellytykset.

Sisäilmayhdistys.fi b [verkkoaineisto]. [viitattu 2017-02-25] Saatavissa: <http://www.sisailmayhdistys.fi/> Polku: Sisäilmayhdistys.fi. Terveelliset tilat. Kosteusvauriot. Mikrobit. Katsaus-mikrobeihin.

Sisäilmayhdistys.fi c [verkkoaineisto]. [viitattu 2017-02-25] Saatavissa: <http://www.sisailmayhdistys.fi/> Polku: Sisäilmayhdistys.fi. Terveelliset tilat. Kosteusvauriot. Kosteustekninen toiminta. Ilmavirtaukset rakennuksessa.

Sisäilmayhdistys.fi d [verkkoaineisto]. [viitattu 2017-02-22] Saatavissa: <http://www.sisailmayhdistys.fi/> Polku: Sisäilmayhdistys.fi. Terveelliset tilat. Ongelmien tutkiminen. Rakennustekniset tutkimukset. Ilmavirtaus ja paine-ero.

SOBOTT, Jimmy. 2014. Tiiveystarkastelut ja tiivistyskorjaukset toimisto- ja palvelurakennuksiin. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Ylempi AMK. Korjausrakentamisen koulutusohjelma. Opinnäytetyö. [Viitattu 2017-03-15] Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2014112416476>

SOSIAALI- JA TERVEYSMINISTERIÖN ASETUS ASUNNON JA MUUN OLESKELUTILAN TERVEYDELLISISTÄ OLOSUHTEISTA SEKÄ ULKOPUOLISTEN ASIANTUNTIJOIDEN PÄTEVYYSVAATIMUKSISTA 545/2015 [verkkoaineisto] Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20150545>

TKR.FI [verkkoaineisto]. [Viitattu 2017-03-25]. Saatavissa <http://www.tkr.fi> Polku: Tuotteet. Pinnoittaminen.

TOMPURI, Vesa ja MÖLSÄ, Seppo. 2016-02-05. Tiivistyskorjausten epäonnistumisista otettu opiksi Vantaalla. Rakennuslehti.fi. [Viitattu 2017-03-30]. Saatavissa: <http://www.rakennuslehti.fi/2016/02/tiivistyskorjausten-epaonnistumisista-otettua-opiksi-vantaalla/>

TYÖSUOJELU.FI [verkkoaineisto]. [Viitattu 2017-01-24]. Saatavissa <http://www.tyosuojelu.fi/> Polku: www.tyosuojelu.fi. Työolot. Työympäristö. Sisäilma.

TYÖTERVEYSLAITOS. 2011. Toimiston sisäilmaston tutkiminen. Helsinki: Työterveyslaitos

Työterveyslaitos. Työterveyslaitos Kooste toimistoympäristöjen epäpuhtaus ja olosuhdetasoista, joiden ylittyminen voi viitata sisäilmaongelmiin [verkkoaineisto]. [viitattu 2017-03-26]. Saatavissa: <https://www.ttl.fi/wp-content/uploads/2016/09/sisaympariston-viitearvoja.pdf>

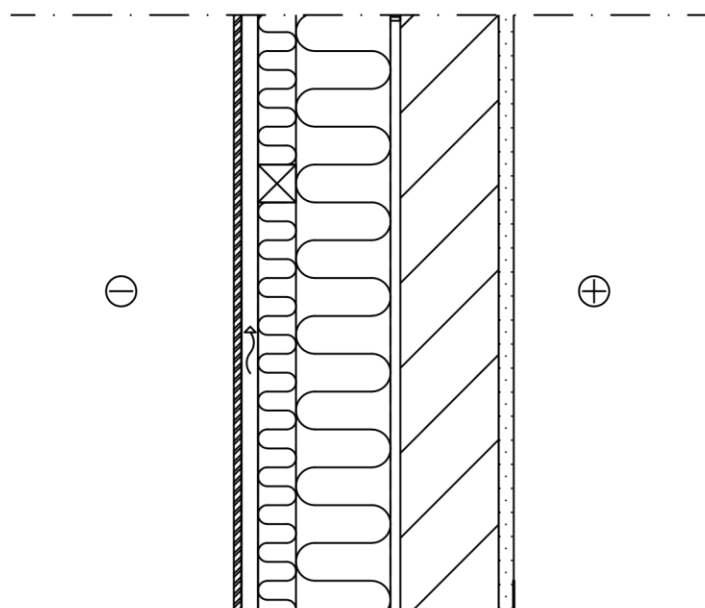
Valvira.fi [verkkoaineisto]. [Viitattu 2017-02-25]. Saatavissa <http://www.valvira.fi/> Polku: Valvira.fi Ympäristöterveys. Terveysturvallisuus. Asumisterveys. Osa IV Asumisterveysasetuksen pykälä 20.

YMPÄRISTÖOPAS. 2016. Rakennusten kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus. Helsinki: Ympäristöministeriö

## LIITE 1: MALLIHUONEEN ULKOSEINÄRAKENNE

Gummerus-talo			US1
1	25.3.2017	Joonas Passi	

MK 1:10



## Rakennekerrokset:

8 mm	Mineritlevy
22 mm	Pystykoolaus k600
50 mm	Runkokarhulevy + naulausvälikkeet
100 mm	Runko 50x100 k600, + mineraalivilla
0,2 mm	muovikalvo 0,2
10 mm	Ilmarako
130 mm	NT 130
10 mm	Tasoite + pintakäsittely

LIITE 2: TIIVISTYSKORJAUSTYÖSELOSTUS